

УДК 551

ИНТЕНСИВНОСТЬ ХИМИЧЕСКОГО ВЫВЕТРИВАНИЯ В ПОЗДНЕМ ДОКЕМБРИИ: НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО СТРАТОТИПУ РИФЕЯ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)¹

© 2023 г. А. В. Маслов¹, *, В. Н. Подковыров², **

¹Геологический институт РАН, Москва, Россия

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

*e-mail: amas2004@mail.ru

**e-mail: vpodk@mail.ru

Поступила в редакцию 14.05.2022 г.

После доработки 14.07.2022 г.

Принята к публикации 01.09.2022 г.

Проведено сопоставление характерных для тонкозернистых обломочных пород рифея Южного Урала величин Ni/Co, La/Sc и Th/Cr (индикаторы состава размывавшихся на палеоводосборах комплексов пород), а также значений CIA, Rb/Al, K/Al и K/Rb (индикаторы интенсивности химического выветривания на суше) с данными, приведенными в публикации Bayon G., Bindeman I.N., Trinquier A., Retallack G.J., and Bekker A. “Long-term evolution of terrestrial weathering and its link to Earth’s oxygenation” (Earth Planet. Sci. Lett., 2022, v. 584, 117490). Показано, что свойственное глинистым породам Южного Урала отношение $Rb/Al_{\text{среднее}}$ (0.0014 ± 0.0006 , $n = 66$) вкпе с другими данными позволяет считать, что на протяжении более 1.10 млрд лет (от ~1.75 до ~0.60 млрд лет) интенсивность химического выветривания на палеоводосборах была относительно невелика. Это хорошо соотносится с данными, полученными Ж. Байоном с соавторами. Приведенный нами материал дает основание полагать, что композитные “мировые” кривые K/Al, Rb/Al и K/Rb, предложенные Ж. Байоном с соавторами, и такие же кривые для глинистых пород рифея Южного Урала в достаточной мере сопоставимы. Таким образом, данные по литогеохимическим характеристикам тонкозернистых обломочных/глинистых пород стратотипа рифея существенно расширяют наши представления о характере процессов химического выветривания на суше в интервале 1.75–0.60 млрд лет назад.

Ключевые слова: долговременная эволюция выветривания, тонкозернистые обломочные породы, рифей, Южный Урал

DOI: 10.31857/S0869592X23020060, EDN: MELMIU

ВВЕДЕНИЕ

Долговременные изменения состава коры и литогеохимических характеристик осадочных образований привлекают внимание исследователей на протяжении уже длительного времени. Не претендуя на обзор этого интереснейшего направления исследований в области наук о Земле, укажем только хорошо известные монографические работы С. Тейлора и С. Мак-Леннана (Taylor, McLennan, 1985 и др.) и А.Б. Ронова (1993), а также ряд публикаций, рассматривающих многие весьма важные аспекты эволюции различных геологических процессов в истории Земли (Эволюция ..., 1993; Condie et al., 2001; Маслов и др., 2006, 2016, 2022; Scott et al., 2008; Frei et al., 2009; Gonzalez-Alvarez, Kerrich, 2012; Stueken et al., 2015; Partin et al.,

2013; Large et al., 2014; Dzombak, Sheldon, 2022 и др.). Эволюции осадочных процессов в истории Земли было посвящено и 8-е Всероссийское литологическое совещание (2015 г.).

Одна из недавних работ подобного рода — публикация (Bayon et al., 2022), в которой анализируется коэволюция насыщения кислородом земной атмосферы и интенсивности химического выветривания на суше на протяжении последних 3.5 млрд лет. Важно иметь в виду, что во многих публикациях, например в работах (Bjerrum, Canfield, 2002; Planavsky et al., 2010; Lenton et al., 2012; Ozaki, Tajika, 2013; Lyons et al., 2014; Reinhard et al., 2017 и др.), взаимосвязь между ростом окисленности атмосферы Земли и химическим выветриванием на континентах рассматривается сквозь призму поступления в прилежащие к суше бассейны основных нутриентов (фосфор и др.) и появления окислительного фотосинтеза в гидросфере. Авторы

¹ Дополнительная информация для этой статьи доступна по doi 10.31857/S0869592X23020060 для авторизованных пользователей.

указанной выше работы подошли к исследованию связей между химическим выветриванием, поступлением питательных веществ в океаны и концентрацией кислорода в атмосфере с конца архея до настоящего времени на основе анализа систематики ряда редких и рассеянных элементов и изотопов Lu–Hf/Sm–Nd в тонкозернистых алюмосиликокластических осадочных породах (метапелиты, мелкозернистые глинистые алевролиты, глинистые сланцы, аргиллиты). Этот достаточно традиционный для нескольких последних десятилетий подход претерпел в указанной публикации некоторую модификацию, что, на наш взгляд, требует подробного анализа.

Считая, что процессы накопления осадков, диагенез и метаморфизм заметно трансформируют запечатленные в глинистых сланцах “сигналы” химического выветривания, а сами сланцы представляют смесь глинистых минералов, образовавшихся в результате химического выветривания на континенте, обломочных (кварц, полевые шпаты, циркон и др.) и аутигенных компонентов и органических соединений, авторы публикации (Bayon et al., 2022) предпочли исследовать выделенную из тонкозернистых обломочных пород фракцию, размерность которой сопоставима с размерностью глинистых минералов (<2 мкм). При этом процесс выделения такой фракции представлял простое дробление образцов (см. далее).

В качестве индикатора химического выветривания авторами работы (Bayon et al., 2022) использовано отношение Rb/Al (при химическом выветривании полевого шпата подвижность Rb по сравнению с Al существенно выше), так как предполагается, что этот параметр в тонкозернистых обломочных породах меньше зависит от процессов взаимодействия вода–порода в отличие от отношения K/Al или химического индекса изменения (CIA; Nesbitt, Young, 1982). В целом Ж. Байон с соавторами исследовали содержание основных породообразующих оксидов, редких и рассеянных элементов, а также соотношение изотопов Nd и Hf в 107 образцах глинистых сланцев и других тонкозернистых обломочных пород различного возраста (3.5–0.003 млрд лет), степень метаморфизма которых не превышала низов зеленосланцевой фации. Предварительно эти образцы были очищены от аутигенных и органических компонентов, раздроблены и подвергнуты медленному центрифугированию с целью отделения наиболее тонкой (<2 мкм) фракции и удаления зерен циркона размером >1.5 мкм и фосфатных фаз (монацит, ксенотим), содержащих легкие лантаноиды. Эффективное удаление циркона и выделение обломочных фракций частиц с размерностью глины (далее мы будем называть эти фракции глинистыми в кавычках – “глинистые фракции”), по мнению Ж. Байона с соавторами, представляет важное условие для анализа изотопного состава Hf и

Nd и использования полученных данных для исследования процессов выветривания (присутствие циркона сдвигает изотопный состав Hf в сторону нерадиогенных значений). У нас, к сожалению, нет возможности исследовать изотопный состав Hf и Nd в глинистых породах рифея Южного Урала, поэтому далее речь идет только об их геохимических характеристиках.

Среднее содержание Zr в полученных “глинистых фракциях” равно 165 ± 133 мкг/г (2 σ , стандартное отклонение, $n = 105$; n здесь и далее – количество проанализированных Ж. Байоном с соавторами и нами образцов). Это сопоставимо со средним содержанием Zr в современных флювиальных глинах (139 ± 67 мкг/г, $n = 52$; Bayon et al., 2015). В то же время в некоторых “глинистых фракциях” докембрийских глинистых сланцев содержание Zr существенно выше. По мнению Ж. Байона с соавторами (Bayon et al., 2022, Supplementary Material, S3), это связано с тем, что “в процессе измельчения исходных образцов иногда могло происходить частичное разрушение крупных минералов, включая циркон”. Такой “контаминационный” эффект во время механического истирания может быть оценен по соотношению Zr/Th и Al₂O₃ (Zr, Th и Al считаются немобильными во время выветривания и постседиментационных процессов): Zr накапливается в основном в алевритовой фракции, Th обогащает глинистую фракцию (Bayon et al., 2022 и ссылки в этой работе), следовательно, отношение Zr/Th во флювиальных осадках контролируется их гранулометрическим составом. Это же характерно и для Al. Подавляющее большинство исследованных Ж. Байоном с соавторами (Bayon et al., 2022) “глинистых фракций” на графике Al₂O₃–Zr/Th локализовано в поле современных “флювиальных глин”. “Глинистые фракции” с величинами Zr/Th > 30, по-видимому загрязненные во время измельчения фрагментами первичных минералов, а также имеющие содержание Al₂O₃ < 10 мас.%, из обсуждения изотопного состава Hf и Nd, как индикатора наземного выветривания, были Ж. Байоном с соавторами исключены.

Примерно соответствующий современному пониманию длительности рифея (~1.75–0.60 (0.64) млрд лет; Семихатов и др., 2015; Маслов, 2020; Маслов и др., 2022 и др.) интервал времени от 1.8 до 0.7 млрд лет представлен в исследованной Ж. Байоном с соавторами (Bayon et al., 2022) выборке всего 20 “глинистыми фракциями” (обр. 38–57). Две из них (обр. 56 и 57), принадлежащие палеопротерозойской формации Стирлинг Рейндж (возраст ~1.8 млрд лет), Западная Австралия, по результатам описанной выше селекции были Ж. Байоном с соавторами из рассмотрения исключены. Содержание Zr в “глинистых фракциях” обр. 41 и 42 (формация Винниатт, Канада) и обр. 51 (серия Мизула надсерии Белт-Перселл, США) составляет

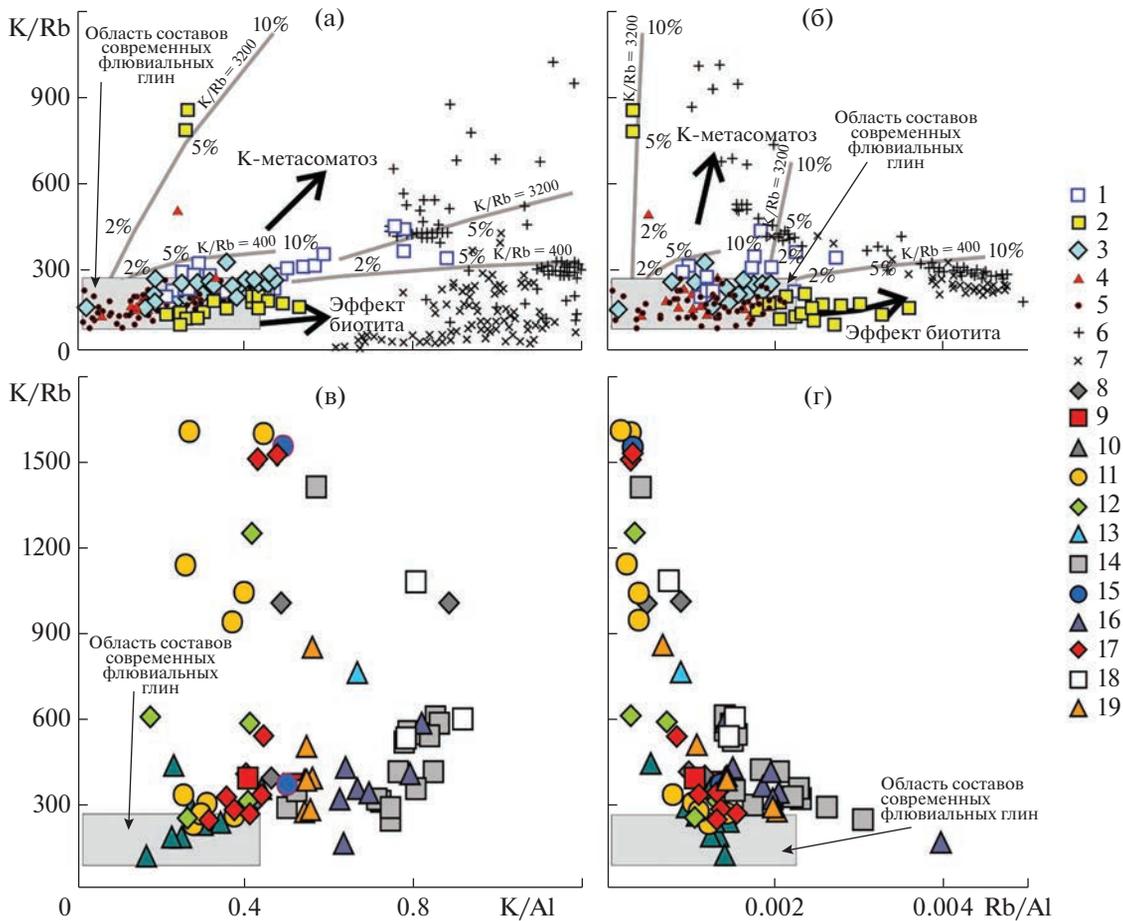


Рис. 1. Положение фигуративных точек “глинистых фракций” Ж. Байона с соавторами (а, б) и точек состава глинистых пород рифея Южного Урала (в, г) на диаграммах $K/Al-K/Rb$ и $Rb/Al-K/Rb$. 1–4 – “глинистые фракции” тонкозернистых обломочных пород разного возраста (1 – 2.73–2.60 млрд лет, 2 – 2.50–2.39 млрд лет, 3 – 2.32–0.54 млрд лет, 4 – менее 539 млн лет); 5–7 – современные речные осадки (5 – глинистые фракции, 6 – калиевый полевой шпат, 7 – биотит); 8–19 – тонкозернистые обломочные породы рифея Южного Урала (8 – айская свита, 9 – саткинская свита, 10 – бакальская свита, 11 – машакская свита, 12 – зигазино-комаровская свита, 13 – авзянская свита, 14 – бирьянская подсвита, 15 – нугушская подсвита, 16 – бедерышинская подсвита, 17 – инзерская свита, 18 – миньярская свита, 19 – укская свита).

> 280 мкг/г; эти образцы также отнесены к некондиционным. В итоге рифейский интервал в исследованной Ж. Байоном с соавторами коллекции представлен 15 “глинистыми фракциями” тонкозернистых обломочных пород, формировавшихся в разных климатических условиях (формации Гринелл/Аппекуни, Причард, Ньюланд и Грейсон надсерии Белт-Перселл, США; формация Арктик Бей, Канада; серия Атар, Мавритания, тоттинская свита и уйская серия Учуро-Майского региона, Россия; формации Ред Пайнир и Покателло, США (Cullers, Podkovurov, 2002; Rouxel et al., 2005; Подковыров и др., 2007; Rooney et al., 2010; Thomson et al., 2015; Rettalack, 2020; Bindeman, 2021)).

Большинство фигуративных точек “глинистых фракций” Ж. Байона с соавторами располагается в пределах поля с величинами K/Rb , K/Al

и Rb/Al , типичными для современных аллювиальных обломочных глин (рис. 1а, 1б). Образцы со значениями $K/Rb > 240$ исключены из обсуждения долговременных трендов изменения параметров Rb/Al и K/Al , так как считается, что они испытали вторичные преобразования.

ОБЩИЕ ПОДХОДЫ К ПОСТРОЕНИЮ “МИРОВЫХ” КРИВЫХ

Ранее мы уже отмечали, что анализ долговременных вариаций различных, в том числе хемотратиграфических, индикаторов требует довольно сложной процедуры (Маслов, 2020). Тренды их изменения на протяжении длительных временных интервалов приходится составлять из фрагментов, полученных для осадочных последовательностей, накапливавшихся в разных палео-

геодинамических, палеоклиматических и палеогеографических обстановках, а также в результате размыва различных по составу комплексов пород на палеоводосборах (такие кривые можно называть “композитными”). Например, в конце 1990-х гг. были исследованы особенности распределения в докембрии черносланцевых толщ и связь морских черных сланцев с эпохами интенсивного химического выветривания на суше (Condie et al., 2001). Эта работа базировалась на данных анализа 62 (!) осадочных последовательностей. В публикации (Gonzalez-Alvarez, Kerrich, 2012) суммированы сведения о вариациях индекса CIA для 50 (!) осадочных последовательностей мира. В работе (Bayon et al., 2022) для характеристики химического выветривания в интервале 3.5–0.003 млрд лет использованы данные о более 60 (!) объектах. Все это может накладывать существенные ограничения на корректность выводов. Для карбонатных последовательностей, формировавшихся, как правило, в мелководных морских бассейнах с хорошей связью с Мировым океаном, этих ограничений меньше (см., например, Кузнецов и др., 2018), тогда как для терригенных толщ, накапливавшихся в более широком спектре обстановок, в том числе при разном климате и разном составе петрофонда, ограничения, несомненно, более существенны. Очевидно, что при составлении композитных кривых для крупных временных интервалов из большого числа локальных отрезков невозможно учесть все факторы, контролировавшие образование отдельных осадочных последовательностей.

На наш взгляд, исходя из опыта, полученного при обработке больших массивов литогеохимических данных по древним осадочным породам (Маслов и др., 2006, 2010, 2022 и др.), более корректным было бы построение “мировых” кривых с использованием результатов, полученных при исследовании протяженных во времени осадочных последовательностей, не имеющих длительных перерывов и накапливавшихся при относительно постоянных внешних факторах (палеогеодинамика, палеоклимат и палеогеографические обстановки, а также состав пород на палеоводосборах). Однако таких примеров в геологической летописи немного, и при указанном подходе существенно возрастает влияние локальных факторов на процессы формирования осадочных толщ.

РИФЕЙ ЮЖНОГО УРАЛА: КОНСТРУКЦИЯ РАЗРЕЗА, ИСТОЧНИКИ ТОНКОЙ АЛЮМОСИЛИКОКЛАСТИКИ

Одним из наиболее представительных в указанном отношении для позднего докембрия разрезов, на наш взгляд, является расположенный на западном склоне Южного Урала в пределах западной и центральной зон Башкирского мегантиклинория стратотип рифея (Chumakov, Semikhatov,

1981; Стратотип..., 1983; Semikhatov, 1991; Маслов и др., 2001, 2002). Суммарное время формирования этих рифейских отложений, с учетом перерывов различной длительности (от десятков до 250? млн лет), можно оценить примерно в 1150 млн лет (Семихатов и др., 2015; Маслов, 2020). Примерами длительно формировавшихся структур с осадочным выполнением существенной мощности являются также Камско-Бельский авлакоген (Белоконь и др., 2001) и Алдано-Майский бассейн (Семихатов, Серебряков, 1983; Худолей, 2003; Развозжаева, 2020 и др.) в России, бассейн Officer в Австралии (Lindsay, Leven, 1996 и др.) и некоторые др.

Данный разрез сложен интра- и перикратонными терригенными и карбонатно-терригенными осадочными последовательностями и объединяет три крупные седиментационные серии (рис. 2): бурзьянскую (тип нижнего рифея), юрматинскую (тип среднего рифея) и каратаускую (тип верхнего рифея) (Стратотип..., 1983; Нижний..., 1989; Семихатов и др., 2015 и др.). Бурзьянская серия залегает несогласно на породах архея–нижнего протерозоя (тараташский комплекс) и объединяет на северо-востоке Башкирского мегантиклинория айскую, саткинскую и бакальскую свиты. Айская свита представлена преимущественно терригенными породами. В нижней ее части присутствуют вулканы с возрастом цирконов 1752 ± 11 млн лет (Краснобаев и др., 2013б). Саткинская свита сложена доломитами; возраст раннего диагенеза известняков в ее кровле составляет 1550 ± 30 млн лет (Кузнецов и др., 2008). Бакальская свита представлена низкоуглеродистыми глинистыми сланцами и несколькими алюмосиликокластическими и карбонатными пачками. Возраст раннего диагенеза известняков свиты оценивается в 1430 ± 30 млн лет (Кузнецов и др., 2003).

На породах бурзьянской серии с перерывом и угловым несогласием залегают терригенные и терригенно-карбонатные образования юрматинской серии, объединяющей машакскую, зигальгинскую, зигазино-комаровскую и авзянскую свиты. Машакская свита представлена терригенными породами, метабазальтами и метариолитами. Цирконы последних имеют U–Th–Pb возраст от 1383 ± 3 до 1386 ± 6 млн лет (Краснобаев и др., 2013а; Семихатов и др., 2015). По представлениям (Ковалев и др., 2019), начальные этапы “машакского магматического события” отвечают времени 1409 ± 89 млн лет (Sm–Nd метод). Зигальгинская свита сложена преимущественно кварцевыми песчаниками. Зигазино-комаровская свита состоит из пачек переслаивания глинистых сланцев, алевролитов и песчаников. Pb–Pb изотопный возраст раннедиагенетических фосфоритовых конкреций из основания свиты составляет 1330 ± 20 млн лет (Овчинникова и др., 2013). Авзянская свита включает несколько карбонатных и алюмосиликокластических толщ. На основании C-хемостратиграфических данных

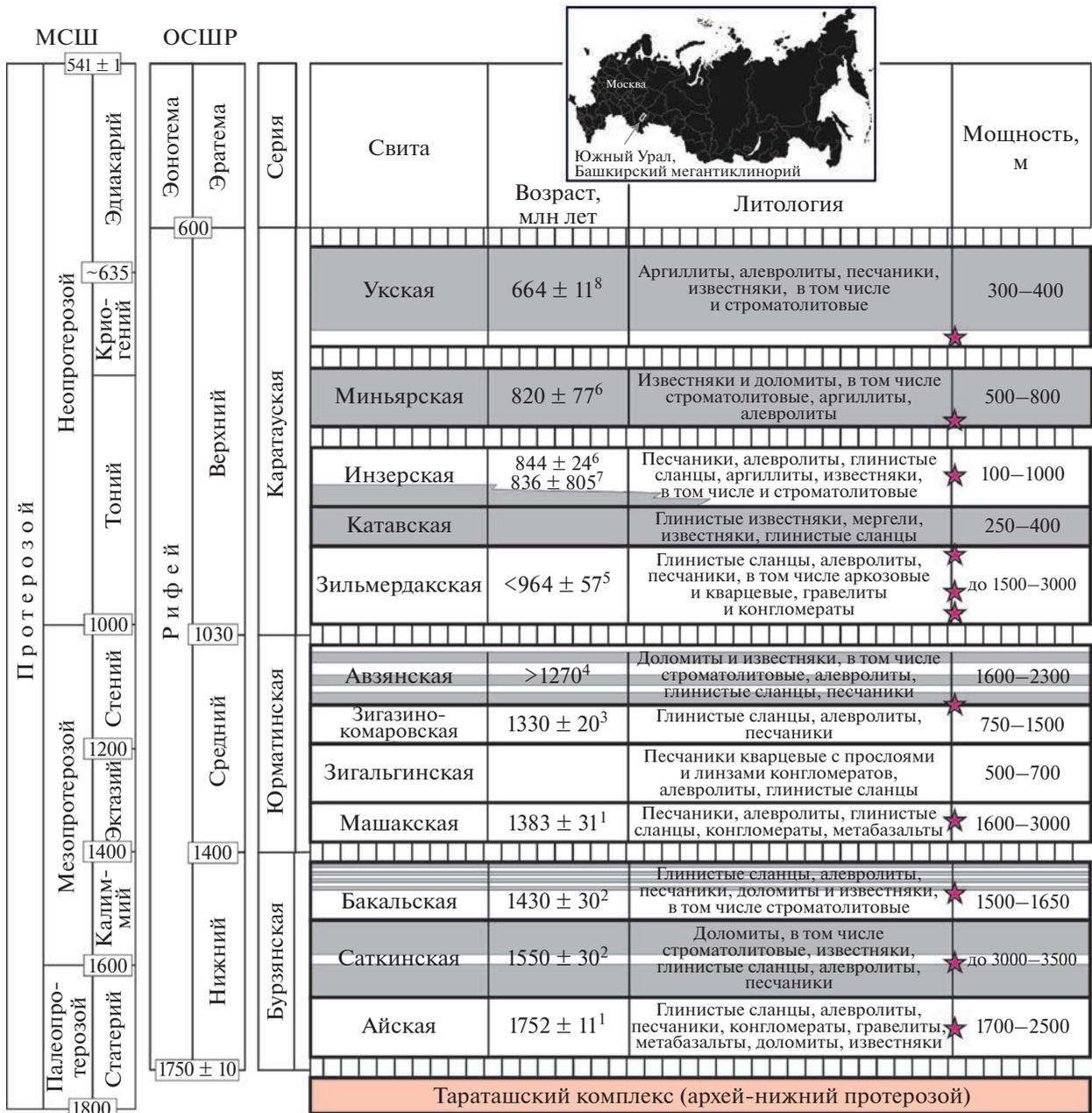


Рис. 2. Обзорная схема и сводная стратиграфическая колонка рифея западного склона Южного Урала, по (Маслов и др., 2022 и ссылки в этой работе), с некоторыми изменениями.

Серый фон – интервалы развития карбонатных пород, вертикальная штриховка – перерывы без указания длительности. (1) U–Th–Pb (SIMS) датировки цирконов магматических пород; (2) Pb–Pb возраст карбонатных пород; (3) Pb–Pb возраст диагенетических фосфатных конкреций; (4) оценочные данные Sr-хемостратиграфии; (5) минимальный U–Th–Pb возраст обломочных цирконов; (6) Pb–Pb возраст известняков и доломитов; (7) Rb–Sr возраст 1M иллита; (8) Rb–Sr возраст глауконита. МСШ – Международная стратиграфическая шкала (версия v2020/03, www.stratigraphy.org); ОСШР – Общая стратиграфическая (геохронологическая) шкала России (по состоянию на 2019 г., http://www.vsegei.com/ru/info/stratigraphy/stratigraphic_scale/); возраст нижних границ среднего и нижнего рифея показан в соответствии с представлениями (Краснобаев и др., 2013а, 2013б; Семихатов и др., 2015), возраст нижней границы венда показан согласно (Стратиграфический..., 2019). Звездочки – литостратиграфические уровни глинистых пород, аналитические данные по которым обсуждаются в этой работе.

(Bartley et al., 2007) считается, что формирование отложений этого уровня стратотипа рифея произошло не позже ~1270 млн лет назад. Иных корректных оценок возраста пород авзянской свиты нет.

Каратауская серия объединяет в западной и центральной зонах Башкирского мегантиклинория зильмердакскую, катавскую, инзерскую, миньярскую и уксую свиты. Зильмердакская свита

включает аркозовые песчаники (бирьянская подсвита), пачки переслаивания песчаников, алевролитов и глинистых сланцев (нугушская и бедерышинская подсвиты), а также толщу кварцевых песчаников (лемезинская подсвита). U–Th–Pb изотопный возраст самого молодого зерна обломочного циркона из аркозовых песчаников бирьянской подсвиты составляет 964 ± 57 млн лет (Маслов и др., 2018). Катавская свита сложена преимущественно пестроцветными глинистыми известняками и мергелями. Инзерская свита представлена глауконито-кварцевыми песчаниками, алевролитами и аргиллитами. В западных ее разрезах в основании свиты присутствуют известняки (подинзерские слои). Rb–Sr изотопный возраст раннедиагенетического иллита из аргиллитов свиты составляет 805–835 млн лет (Горохов и др., 2019). Ранний диагенез в известняках подинзерских слоев имел место 844 ± 25 млн лет назад (Kuznetsov et al., 2017). Миньярская свита сложена преимущественно доломитами, Pb–Pb изотопный возраст которых равен 820 ± 77 млн лет (Kuznetsov et al., 2017). Укская свита в нижней части представлена терригенными и карбонатными породами, а в верхней – известняками. Al-разности глауконита из песчаников нижеуекской подсвиты имеют K–Ar и Rb–Sr изотопный возраст соответственно 669 ± 16 и 664 ± 11 млн лет (Зайцева и др., 2008), однако в литературе существуют и иные представления о возрасте укской свиты (Kuznetsov et al., 2017; Дуб, Гражданкин, 2021).

В раннем и среднем рифее в пределах современного Башкирского мегантиклинория и прилежащих к нему районах Восточно-Европейской платформы (ВЕП) существовали, по всей видимости, относительно небольшие эпикратонные/надрифтовые бассейны (Иванов и др., 1982, 1988; Формирование..., 1986). Для позднего рифея реконструирован латеральный ряд формаций, напоминающий последовательность отложений пассивной континентальной окраины (Маслов и др., 2002, 2010; Bogdanova et al., 2008; Пучков, 2010).

Основная масса алюмосиликокластики в указанных области осадконакопления в рифее поступала с ВЕП (Акимова, 1967; Карта..., 1983; Маслов, 1988; Кузнецов и др., 2013; Романюк и др., 2013, 2014 и др.). Обломочным цирконам из песчаников айской свиты свойственны следующие максимумы плотности вероятности U–Th–Pb изотопных возрастов: 2942, 2760, 2705, 2476 и 2063 млн лет, цирконам из пород бакальской свиты – 2744, 2547, 2028 и 1923 млн лет, а цирконам из пород зигальгинской свиты – 2936, 2734, 2477, 2138, 2002 и 1787 млн лет (Романюк и др., 2017, 2018; Кузнецов и др., 2017). Обломочные цирконы в песчаниках бирьянской подсвиты зильмердакской свиты имеют как дорифейские максимумы, так и более молодые пики – 1590, 1560, 1480, 1392, 1338, 1238, 1171 и 1056 млн лет (Маслов и др., 2018).

Возраст цирконов из песчаников лемезинской подсвиты той же свиты варьирует от 3070 ± 27 до 1817 ± 59 млн лет (Романюк и др., 2013). Диапазон возрастов обломочных цирконов из оолитовых известняков нижеуекской подсвиты составляет от 3236 ± 4 до 1129 ± 15 млн лет (Зайцева и др., 2022). Средние значения $t_{Nd(DM)}$ в глинистых породах рифея Южного Урала изменяются в интервале 2.8–2.0 млрд лет (Маслов и др., 2022). Это позволяет предполагать, что формирование осадочных последовательностей раннего и среднего рифея происходило преимущественно за счет продуктов размыва комплексов пород цоколя ВЕП. В позднем рифее дополнительно к ним в области размыва появились новые источники тонкой алюмосиликокластики, часть из которых располагалась, по всей видимости, на северо-западе ВЕП (Зайцева и др., 2022).

ОБЩИЕ ЛИТОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ГЛИНИСТЫХ ПОРОД РИФЕЯ ЮЖНОГО УРАЛА

Общая характеристика состава глинистых пород, а также особенности изменения снизу вверх по стратотипическому разрезу рифея ряда индикаторных отношений редких и рассеянных элементов рассмотрены ниже по данным 76 валовых химических анализов (ДМ² табл. 1) тонкозернистых обломочных пород, истертых до состояния пудры (400–500 меш, 0.037–0.030 мм). Анализы выполнены в аналитических лабораториях Института геологии УНЦ РАН (г. Уфа), а также Института геологии и геохимии УрО РАН (г. Екатеринбург) методами рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS). Методика этих работ была близка к описанной в (Маслов и др., 2011; Чашин и др., 2020). Перед исследованием образцов подвергались какой-либо специальной обработке за исключением удаления корочек выветривания и хорошо видимых посторонних прожилков. Мы также не выделяли из них “глинистые фракции”, считая, что истертый до состояния пудры материал достаточно близок к ним по составу. Следует иметь в виду, что столь обширная выборка образцов глинистых пород стратотипа рифея, для которых одновременно имеются и сведения о содержании основных пороодообразующих оксидов, и данные о содержании редких и рассеянных элементов, публикуется впервые.

Свойственные исследованным нами образцам глинистых сланцев и аргиллитов средние значения K/Al и Mg/Al (соответственно 0.38 ± 0.14 и 0.14 ± 0.08) дают основание считать, что глинистые породы нижнего и среднего рифея близки к составу (соответственно 0.31 и 0.13) иллитовых

² ДМ – дополнительные материалы.

глин и среднего постархейского австралийского глинистого сланца (PAAS; Taylor, McLennan, 1985). Глинистые породы каратауской серии обладают несколькими большими величинами K/Al (среднее значение 0.64 ± 0.16). Это особенно характерно для глинистых сланцев и аргиллитов бирьянской и бедерышинской подсвит зильмердакской свиты и аргиллитов основания миньярской свиты. Вследствие сказанного они смещены в область значений указанного параметра, свойственную иллитовым глинам с заметной примесью тонкорастертого калиевого полевого шпата (рис. 3а) (Маслов и др., 2016, 2022). Такого типа тонкозернистые обломочные породы достаточно характерны для аридных обстановок (Юдович, Кетрис, 2000; Подковыров и др., 2017, 2022; Подковыров, Котова, 2020). При сходных значениях Mg/Al , выборка “глинистых фракций”, исследованных в (Bayon et al., 2022), отличается низкими величинами K/Al , что видно по минимальному перекрытию областей состава глинистых пород рифея Южного Урала и “глинистых фракций”, построенных по средним значениям K/Al и Mg/Al с учетом $\pm 1\sigma$ (рис. 3б).

На классификационной диаграмме $(Na_2O + K_2O)/Al_2O_3 - (Fe_2O_3^* + MgO)/SiO_2$ (Юдович, Кетрис, 2000) точки состава глинистых пород рифея присутствуют в областях I (преимущественно каолиновые глины), II (преимущественно смектитовые глины с примесью каолинита и иллита), V (хлорит-смектит-иллитовые глины) и VI (иллитовые глины со значительной примесью дисперсных полевых шпатов). К последней области тяготеют фигуративные точки глинистых сланцев и аргиллитов бирьянской и бедерышинской подсвит зильмердакской свиты, а также аргиллиты основания миньярской свиты (рис. 3в). Фигуративные точки “глинистых фракций” Ж. Байона с соавторами на этой же диаграмме сосредоточены в областях I, II и V, т.е. принципиально не отличаются от валовых проб глинистых пород рифея Южного Урала. Перекрытие полей состава глинистых пород рифея и “глинистых фракций” здесь достаточно невелико (рис. 3г).

На диаграмме $K_2O/Na_2O - SiO_2/Al_2O_3$ (Bolnar et al., 2005) большинство фигуративных точек тонкозернистых обломочных пород рифея со значениями $K_2O/Na_2O < 20$ расположены вне области составов, для которых можно предполагать проявление К-метасоматоза (рис. 3д). Значениями $K_2O/Na_2O > 20$ характеризуется ~80% точек глинистых сланцев бирьянской подсвиты зильмердакской свиты, но мы не склонны считать, что эти образцы в какой-то мере подверглись влиянию К-метасоматоза, так как заметное количество в них тонкорастертого обломочного калиевого полевого шпата, установленного при микропетрографических исследованиях, является, скорее всего, след-

ствием накопления отложений данного уровня рифея в близких к аридным климатических обстановках за счет разрушения гранитоидов. В области рассматриваемой диаграммы со значениями $K_2O/Na_2O > 20$ присутствует и порядка 15–20% точек “глинистых фракций” Ж. Байона с соавторами, при этом перекрытие полей, образуемых ими и глинистыми породами рифея Южного Урала, приближается к 100% (рис. 3е). Окремнение для обеих выборок не характерно; значения SiO_2/Al_2O_3 в подавляющем большинстве “глинистых фракций” и глинистых пород рифея не превышают 5.

Свойственные глинистым породам рифея Южного Урала значения Zr/Sc и Th/Sc обуславливают тяготение их фигуративных точек к тренду, определяемому составом пород в областях размыва (рис. 4а). В соответствии с представлениями (McLennan et al., 1993), они являются осадками первого седиментационного цикла, для которых реконструкции состава пород-источников тонкой алюмосиликокластики по литогеохимическим характеристикам достаточно корректны.

Распределение точек состава глинистых сланцев и аргиллитов рифея на диаграмме $La/Sc - Th/Co$ (Cullers, 2002) свидетельствует о размыве в областях питания на протяжении почти всего времени их формирования преимущественно кислых магматических пород (рис. 4б). При этом очевидно, что тонкозернистые обломочные породы некоторых уровней рифея, например машакской свиты, содержат больше продуктов размыва основных магматических пород, чем глинистые породы других стратиграфических интервалов. Этот вывод подтверждает и локализация фигуративных точек глинистых пород рифея на диаграмме $Cr/Th - Th/Sc$ (Condie, Wronkiewicz, 1990; Bracciali et al., 2007) (рис. 4в). Точки состава мелкозернистых глинистых алевролитов машакской свиты расположены здесь в области линии смешения продуктов размыва кислых и основных магматических пород с содержанием последних от 40 до 70%. Точки состава тонкозернистых обломочных пород айской свиты и бирьянской подсвиты зильмердакской свиты, напротив, тяготеют к области с минимальным вкладом продуктов эрозии основных магматических образований.

На диаграмме $Sc - Th/Sc$ фигуративные точки глинистых пород рифея Южного Урала нашей коллекции занимают довольно широкую область (рис. 5а); средняя их точка тяготеет к точке состава гранодиорита (тут можно отметить, что средний состав верхней континентальной коры близок именно к гранодиориту (Rudnick, Gao, 2003; McLennan et al., 2006; Rollinson, 2008)), что не противоречит и приведенным выше данным. Эта точка выбрана нами, соответственно, как ориентировочный средний состав размывавшейся в рифее континентальной коры на диаграмме $Al_2O_3 - (CaO +$

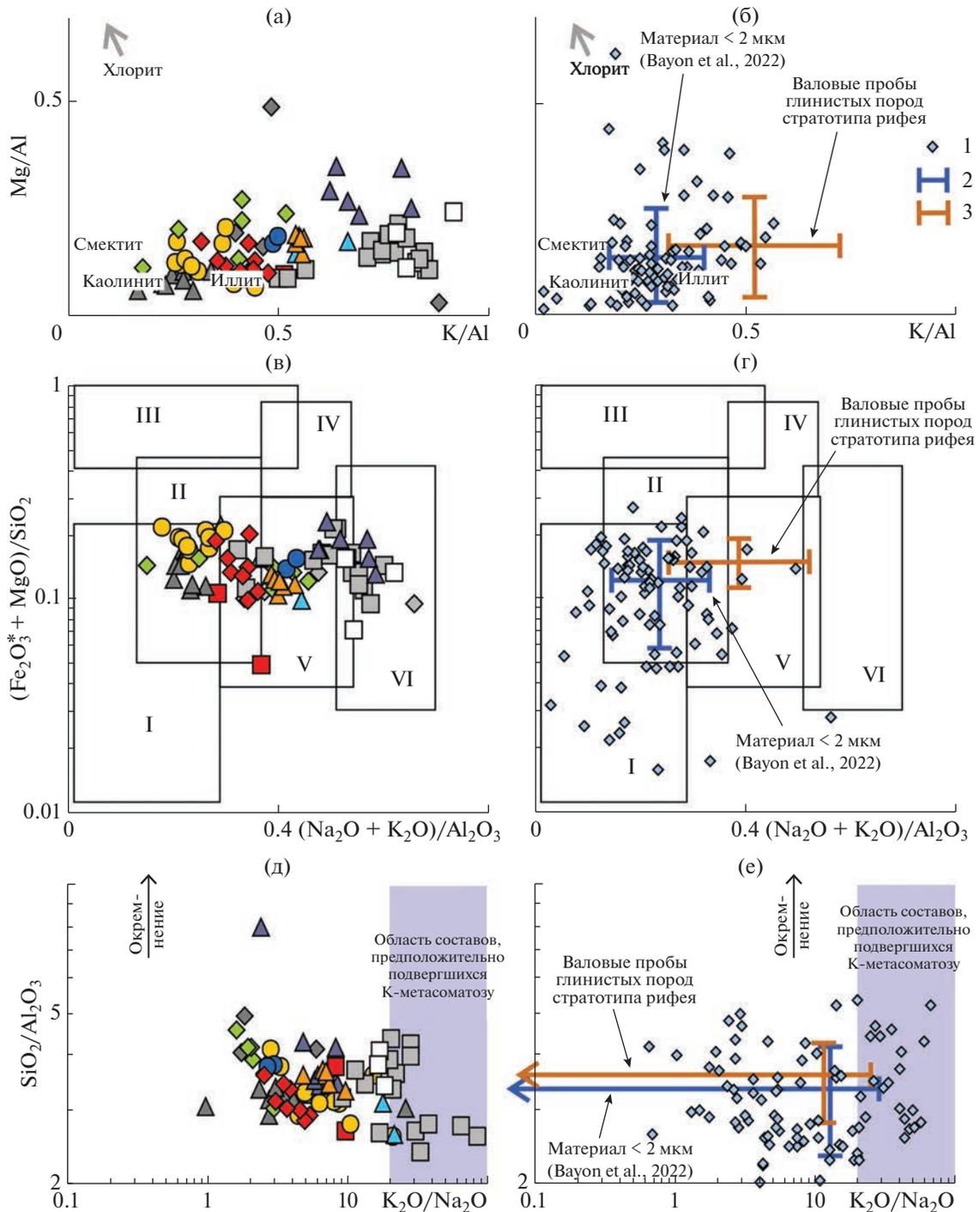


Рис. 3. Распределение точек состава тонкозернистых обломочных пород рифея Южного Урала и “глинистых фракций” Ж. Байона с соавторами на диаграммах $K/Al-Mg/Al$ (а, б), $(Na_2O + K_2O)/Al_2O_3-(Fe_2O_3^* + MgO)/SiO_2$ (в, г) и $K_2O/Na_2O-SiO_2/Al_2O_3$ (д, е).

1 – точки состава “глинистых фракций”; 2, 3 – стандартные отклонения ($\pm 1\sigma$) соответственно для совокупности “глинистых фракций” и тонкозернистых обломочных пород рифея. Остальные условные обозначения см. рис. 1.

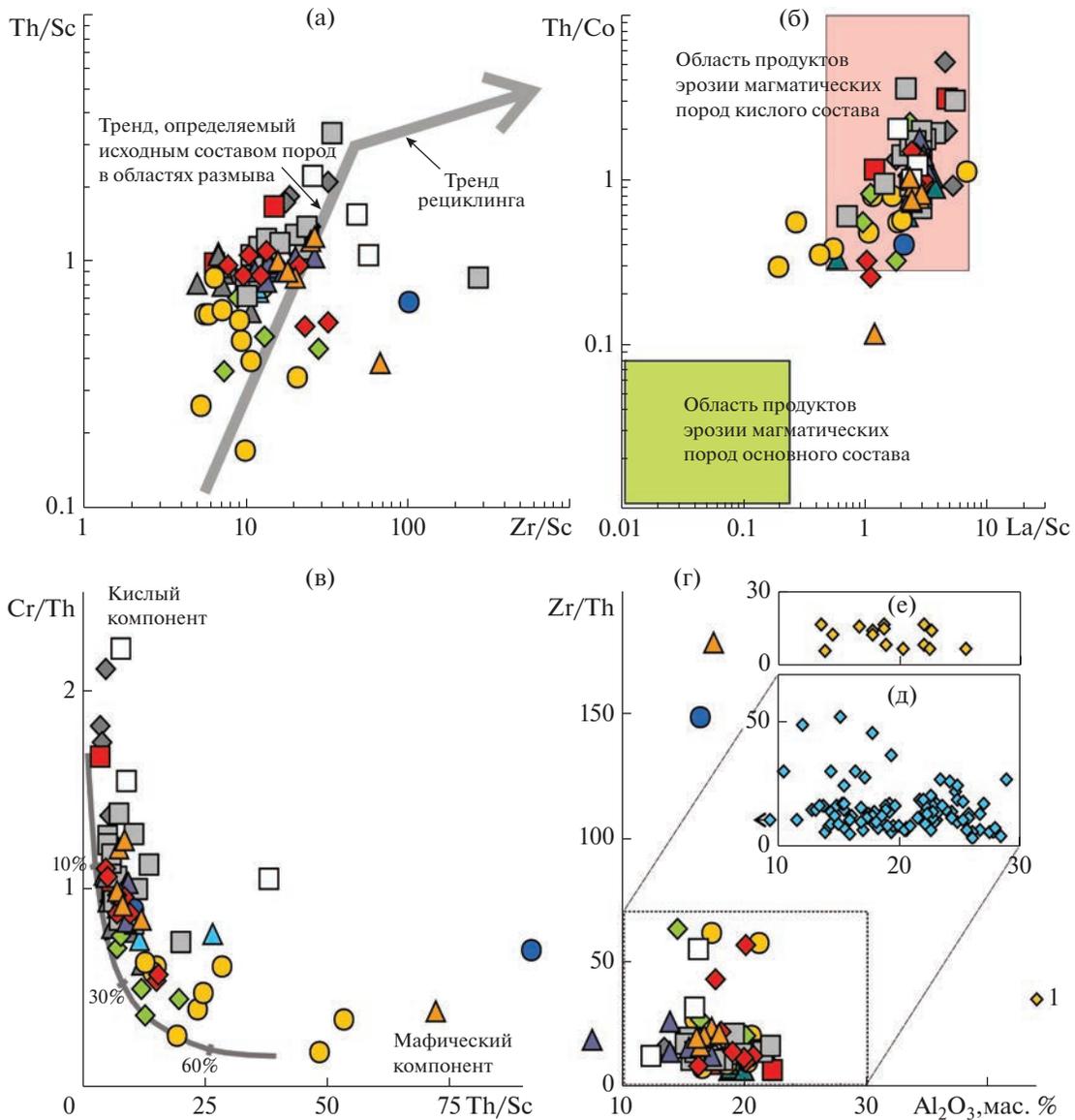


Рис. 4. Положение фигуративных точек тонкозернистых обломочных пород рифея Южного Урала и “глинистых фракций” на диаграммах Zr/Sc–Th/Sc (а), La/Sc–Th/Co (б), Cr/Th–Th/Sc (в) и Al₂O₃–Zr/Th (г–е). 1 – “глинистые фракции” тонкозернистых обломочных пород с возрастом 1.47–0.70 млрд лет из коллекции Ж. Байона с соавторами. Остальные условные обозначения см. рис. 1.

+ Na₂O)–K₂O (Nesbitt, Young, 1984; Fedo et al., 1995). Исследование распределения точек состава глинистых пород всего верхнедокембрийского разреза Южного Урала на указанной диаграмме выполнено нами ранее (Маслов и др., 2016). В настоящей работе на ней показано положение точек состава глинистых сланцев, мелкозернистых глинистых алевролитов и аргиллитов только некоторых из свит стратотипа рифея, а также приведены средние точки состава ряда крупных комплексов (свияжского, нурлатского, туймазинского, миннибаевского, кинельского и бакалинского), слагающих преобладающую часть кристаллического

фундамента Волго-Уралии (рис. 5б). Из распределения этих точек можно сделать вывод, что источники тонкой алюмосиликокластики для осадочных последовательностей рифея Южного Урала были близки по своему составу, скорее всего, к бакалинскому комплексу в понимании С.В. Богдановой (1986). Другие комплексы сложены преимущественно основными породами, и на диаграмме Al₂O₃–(CaO + Na₂O)–K₂O их средние точки расположены левее (вследствие весьма низких величин параметра К) точки состава гранодиорита. Это обстоятельство, как и ряд других (Маслов и др., 2022), предполагает, что проблема источников

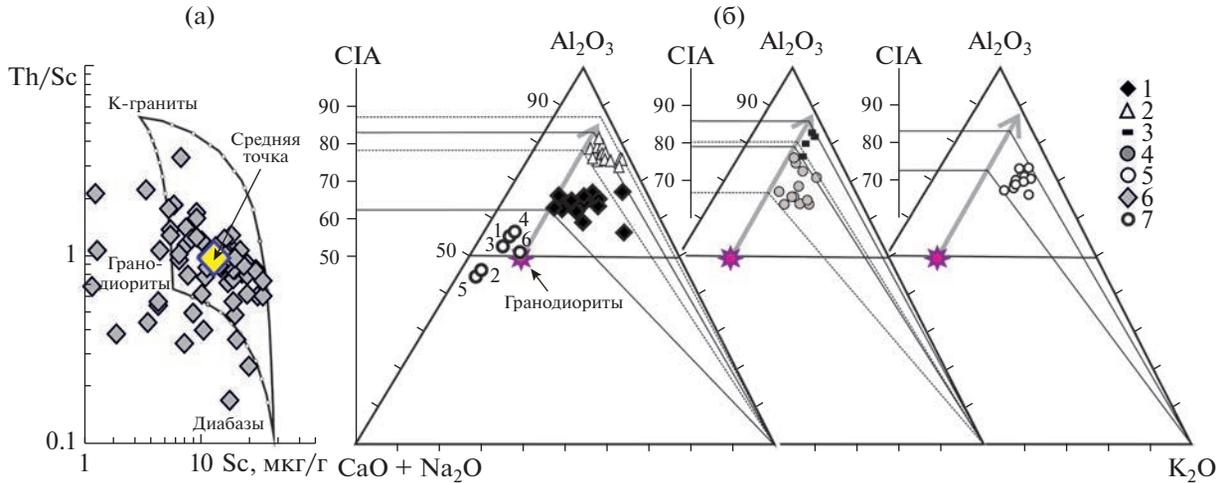


Рис. 5. Положение точек состава глинистых пород рифея Южного Урала на диаграмме Sc–Th/Sc (а) и распределение фигуративных точек тонкозернистых обломочных пород ряда свит стратотипа рифея на диаграмме Al_2O_3 –(CaO + Na₂O)–K₂O (б), по (Маслов и др., 2016) с изменениями. 1–5 – свиты (1 – айская, 2 – бакальская, 3 – машакская, 4 – зигазино-комаровская, 5 – инзерская); 6 – точки состава глинистых пород рифея, входящих в состав рассматриваемой в данной работе коллекции образцов; 7 – средние точки крупных комплексов пород кристаллического фундамента Волго-Уралии (цифры у кружков: 1 – свияжский комплекс, позднеархейская кора “тоналитового” типа, 2 – нурлатский комплекс, позднеархейская кора “диоритового” типа, 3 – туймазинский комплекс, позднеархейская кора “базальтового” типа, 4 – миннибаевский комплекс, позднеархейская кора “сланцевого” типа, 5 – кинельский комплекс, позднеархейская кора “базальтового” слоя, 6 – бакалинский комплекс, “гранито-метаморфический” слой раннепротерозойской континентальной коры. Возраст и интерпретация природы перечисленных комплексов дается в соответствии с представлениями С.В. Богдановой (1986), хотя, очевидно, что за прошедшие годы указанная информация могла кардинальным образом измениться, прежде всего, в отношении возраста комплексов).

обломочного материала для стратотипа рифея еще далека от решения.

Наконец, исходя из свойственных образцам глинистых сланцев и аргиллитов рифея Южного Урала значений Zr/Th и содержания Al_2O_3 (рис. 4г, 4д), можно сделать вывод, что они принципиально не отличаются от всех тех “глинистых фракций” тонкозернистых обломочных пород, которые детально проанализированы в публикации (Bayon et al., 2022). Только три образца (один образец глинистых сланцев бирьянской подсвиты, другой – нугушской подсвиты, третий – укской свиты) обладают значениями $Zr/Th > 145$. Если же исключить из рассмотрения фигуративные точки глинистых пород рифея с величинами Zr/Th в интервале 30–70 (это 7 образцов из оставшихся 73), то окажется, что область распределения оставшихся 66 образцов на диаграмме Al_2O_3 – Zr/Th примерно такова, как и область, образуемая “глинистыми фракциями” тонкозернистых обломочных пород с возрастными рамками 1.47–0.70 млрд лет из работы (Bayon et al., 2022) (рис. 4е). Из сказанного следует, что по данному критерию необработанные образцы глинистых пород Южного Урала кардинально не отличаются от специальным образом обработанных образцов “глинистых фракций” тонкозернистых обломочных пород Ж. Байона с соавторами.

Средняя величина отношения K/Rb в исследованной нами выборке глинистых пород Южного Урала составляет 428 ± 251 ($n = 66$). В подвергнутой некоторой селекции выборке Ж. Байона с соавторами, возрастные рамки которой шире рифея, $K/Rb_{\text{среднее}}$ равно 198 ± 59 ($n = 87$). Параметр $K/Al_{\text{среднее}}$ для глинистых пород рифея составляет 0.52 ± 0.21 . Для выборки Ж. Байона с соавторами он равен 0.29 ± 0.11 ($n = 87$). Такое различие средних величин названных параметров связано, по всей видимости, с тем, что накопление осадочных последовательностей рифея Южного Урала на протяжении значительной части времени шло за счет продуктов разрушения геохимически зрелых пород цоколя ВЕП в условиях семиаридного/семигумидного и/или сходного с аридным климата (Маслов и др., 2016 и ссылки в этой работе). Это, вероятно, способствовало накоплению в глинистых породах тонкорастертого полевого шпата и появлению в них заметных концентраций калия.

Наконец, средняя величина Rb/Al для глинистых пород рифея составляет 0.0014 ± 0.0006 ($n = 66$), тогда как “глинистые фракции” большей части протерозоя (2.32–0.70 млрд лет) характеризуются значением $Rb/Al_{\text{среднее}}$ 0.0016 ± 0.0003 (Bayon et al., 2022). Распределение фигуративных точек глинистых пород рифея Южного Урала на диа-

граммах $K/Al-K/Rb$ и $Rb/Al-K/Rb$ можно видеть на рис. 1в, 1г.

ОБСУЖДЕНИЕ

Ж. Байон и соавторы (Bayon et al., 2022) полагают, что аутигенез глинистых минералов в докембрийских океанах не оказал существенного влияния на распределение РЗЭ в глинистых сланцах. Предполагается также, что на значения Rb/Al , как индикатора химического выветривания, не влияет состав размывавшейся верхней континентальной коры, практически не изменившийся с начала раннего протерозоя. Аргументом в пользу сказанного считается примерно постоянное на протяжении последних 2.5 млрд лет значение отношения Ni/Co (4 ± 3 , $n = 73$) – индикатора вклада в состав осадков ультраосновного материала (в современных глинах $Ni/Co = 4 \pm 1$; Condie, 1993; Greber et al., 2017).

Формировавшиеся на протяжении большей части протерозоя (2.32–0.70 млрд лет) “глинистые фракции” Ж. Байона с соавторами (Bayon et al., 2022) обладают почти постоянной величиной Rb/Al (0.0016 ± 0.0003 , $n = 22$), сопоставимой с характерной для современных водосборов с преобладанием процессов физического выветривания (0.0018 ± 0.0003). Этот вывод подтверждается и собственными указанным “глинистым фракциям” значениями K/Al (0.32 ± 0.06 , $n = 22$). Такая же величина K/Al характерна для современных флювиальных глин холодного климата (Bayon et al., 2022).

Известно, что глобальные похолодания связаны с интенсивным выветриванием базальтов и/или ультраосновных пород и сокращением количества CO_2 в атмосфере после орогенических фаз (Dessert et al., 2003; Macdonald et al., 2019; Bayon et al., 2022 и ссылки в последней работе). Предполагается, что на протяжении большей части протерозоя при низком содержании в атмосфере кислорода в континентальных обстановках преобладало слабое химическое выветривание. В пользу такого вывода свидетельствуют относительно высокие значения Rb/Al , характерные для исследованных Ж. Байоном с соавторами “глинистых фракций” с возрастом от ~2.3 до 0.7 млрд лет.

Все перечисленные выше выводы получены авторами работы (Bayon et al., 2022) при анализе композитной кривой, построенной путем обобщения данных для более 60 различных осадочных последовательностей. А как ведут себя указанные индикаторы (K/Rb , Rb/Al и др.) в одном относительно полном разрезе рифея Южного Урала, осадочные последовательности которого сформированы за счет размыва достаточно близких по составу комплексов пород в условиях семиаридного/семигумидного или близкого к нему климата?

Среднее значение отношения Ni/Co в глинистых породах рифея Южного Урала на протяжении первых ~900 млн лет растет от ~1.81 (айская свита) до ~5.87 (нугушская подсвита зильмердакской свиты) (рис. 6а). После этого наблюдается существенное его снижение: в течение почти всего позднего рифея (~0.92–0.78 млрд лет) значения $Ni/Co_{\text{среднее}}$ находятся в интервале 2.12–3.83. Это показывает, что с начала раннего рифея и до начала позднего рифея доля ультраосновного материала в источниках сноса, по-видимому, постепенно росла. Максимум ее пришелся на начало позднего рифея, что достаточно ярко отражено в геохимических характеристиках тонкозернистых обломочных пород нижней части зильмердакской свиты (Маслов и др., 2022). Несмотря на все сказанное, средняя величина отношения Ni/Co в глинистых породах рифея Южного Урала (4 ± 2 , $n = 66$) принципиально не отличается от его значений для глинистых пород (4 ± 3 , $n = 73$), формировавшихся в течение большего по длительности интервала времени (~2.5 млрд лет). Таким образом, и для одной длительно формировавшейся осадочной мегапоследовательности, и для композитной кривой, составленной по данным для нескольких десятков разных осадочных толщ, средние величины Ni/Co статистически неотличимы друг от друга. Это дает основание считать, что величина данного параметра действительно контролируется глобальными факторами (состав верхней континентальной коры).

Два других индикатора состава размывавшихся на палеоводосборах комплексов пород – отношения La/Sc и Th/Cr – ведут себя на протяжении рифея несколько иначе. Параметр $La/Sc_{\text{среднее}}$ в течение раннего рифея и первой половины среднего рифея постепенно снижается от ~3.64 (айская свита, ~1700 млн лет назад) до 2.57 (авзянская свита, ~1280–1260 млн лет назад) (рис. 6б). Минимальное значение $La/Sc_{\text{среднее}}$ (1.63) характерно для глинистых пород машакской свиты (время “машакского рифтогенного события”, ~1410–1380 млн лет назад; Ронкин и др., 2005; Пучков, 2018; Ковалев и др., 2019). В глинистых сланцах и аргиллитах различных свит верхнего рифея значения $La/Sc_{\text{среднее}}$ примерно такие же – от 2.33 (миньярская свита, ~820 млн лет назад) до 2.75 (бедерышинская подсвита зильмердакской свиты, ~920 млн лет назад). В целом для тонкозернистых обломочных пород рифея Южного Урала существенных вариаций указанного отношения не наблюдается.

Значения $Th/Cr_{\text{среднее}}$ в глинистых породах айско-авзянского интервала устойчиво снижаются от 0.23 до 0.06. Минимальная средняя величина Th/Cr здесь составляет 0.05 и характерна (как и значения Th/Sc) для тонкозернистых обломочных пород машакского уровня. Для глинистых пород позднерифейского интервала свойственны

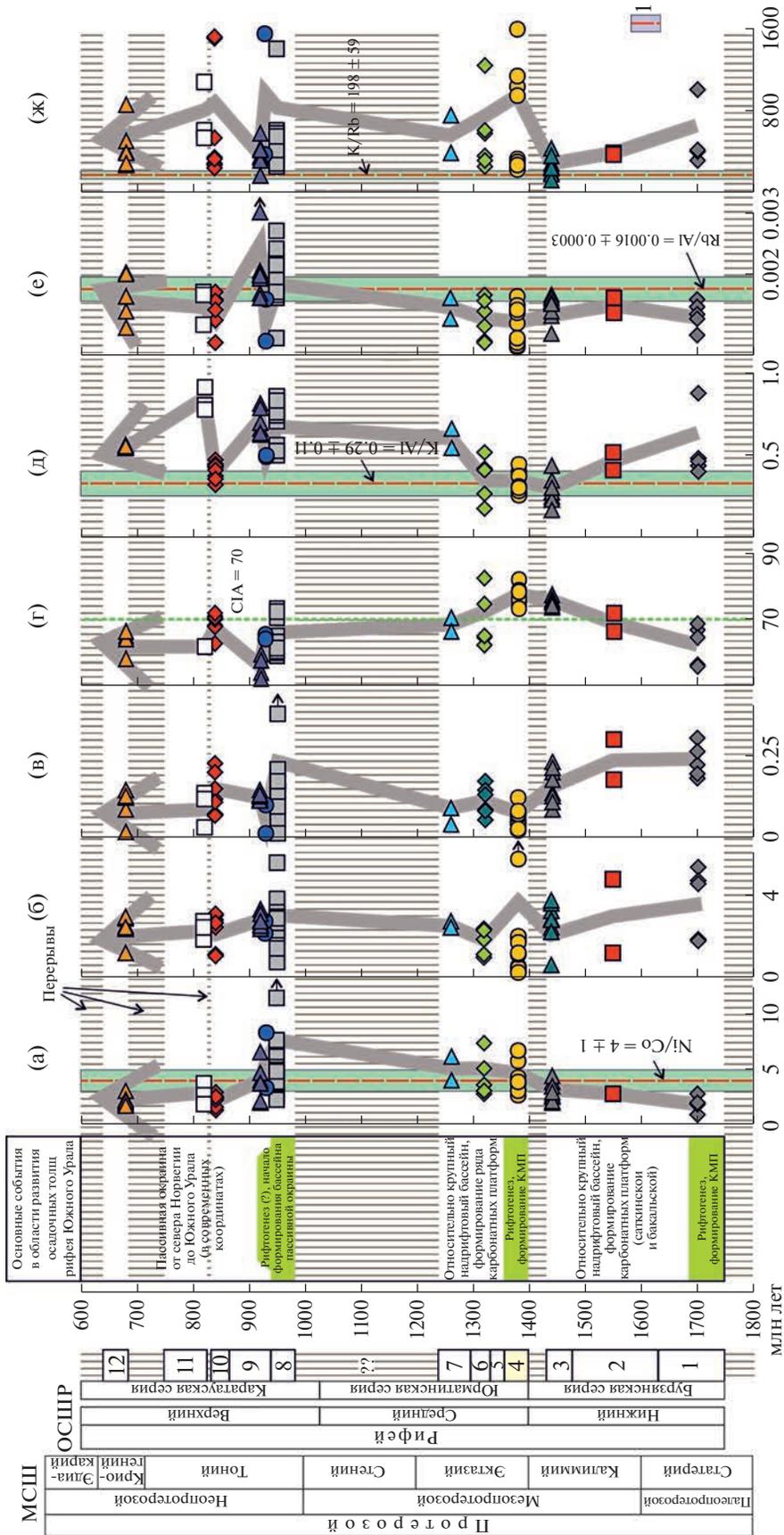


Рис. 6. Вариации индикаторных соотношений в глинистых породах рифея Южного Урала (а – Ni/Co, б – La/Sc, в – Th/Cr, г – CIA, д – K/Al, е – Rb/Al, ж – K/Rb). Основные события в области развития осадочных толщ рифея Южного Урала приведены по (Маслов и др., 2022 и ссылки в этой работе). Серые стрелки – тренды изменения средних значений индикаторных соотношений. 1 – средние значения соответствующих параметров и ± 1σ для “глинистых фракций” Ж. Бай-она с соавторами. Вертикальная штриховка – перерывы. Цифры в прямоугольниках слева – свиты рифея Южного Урала: 1 – айская; 2 – саггинская; 3 – бакальская; 4 – машакская; 5 – зигальгинская; 6 – зигатино-комаровская; 7 – авзянская; 8 – зильмердакская; 9 – катавская; 10 – инзерская; 11 – миньярская; 12 – уская. Остальные условные обозначения см. рис. 2.

достаточно хорошо выраженные пилообразные изменения значений $\text{Th}/\text{Cr}_{\text{среднее}}$: в глинистых сланцах бирьянской подсвиты зильмердакской свиты (~950–940 млн лет назад) этот параметр равен 0.15 ($n = 16$), в глинистых сланцах перекрывающей ее нугушской подсвиты – 0.05 ($n = 2$), в тонкозернистых обломочных породах бедерышинской подсвиты той же свиты и аргиллитах инзерского уровня – 0.12 ($n = 7$) и 0.13 ($n = 8$) соответственно (рис. 6в). Несколько меньшие величины $\text{Th}/\text{Cr}_{\text{среднее}}$ характерны для глинистых пород миньярской и укской (~660 или 730? млн лет назад) свит (соответственно 0.09, $n = 3$, и 0.10, $n = 6$). Таким образом, наиболее резкое снижение параметра $\text{Th}/\text{Cr}_{\text{среднее}}$ в глинистых породах рифея Южного Урала приходится, как и для отношения Ni/Co , на зильмердакское время.

Средние значения индекса химического изменения в глинистых породах Южного Урала растут от начала раннего рифея к началу среднего рифея: для глинистых сланцев айской свиты величина $\text{CIA}_{\text{среднее}}$ составляет 62, бакальской свиты – 76, машакской свиты – 77 (рис. 6г). Это указывает на рост с течением времени интенсивности химического выветривания на водосборах, окружавших область седиментации, или вовлечение в размыв все более зрелых, преимущественно осадочных, образований. Выше по разрезу (зигазино-комаровская и авзянская свиты) значения $\text{CIA}_{\text{среднее}}$ снижаются почти на 10 единиц (до 68). Глинистые сланцы и аргиллиты зильмердакской свиты характеризуются значениями $\text{CIA}_{\text{среднее}}$ 64 (бирьянская подсвита), 65 (нугушская подсвита) и 56 (бедерышинская подсвита). Это дает основание предполагать, что в середине среднего и начале позднего рифея на палеоводосборах преобладало физическое выветривание.

Тонкозернистые обломочные породы инзерской свиты сложены несколько более зрелым материалом. Величина $\text{CIA}_{\text{среднее}}$ для них составляет 69, но ассоциирующие с существенно доломитовыми и известняковыми последовательностями миньярского и укского уровней аргиллиты вновь характеризуются весьма низкими средними значениями CIA (соответственно 62 и 63). Средняя величина CIA для 15 “глинистых фракций”, выделенных из тонкозернистых обломочных пород с возрастом от 1.47 до 0.70 млрд лет, принадлежащих коллекции Ж. Байона с соавторами, составляет 76 ± 5 (минимум 66, максимум 84). Это позволяет считать, что формирование их происходило при ощутимом влиянии процессов химического выветривания (значение $\text{CIA} = 70$, в соответствии с представлениями авторов работы (Visser, Young, 1990), разделяет отложения аридного/нивального и гумидного климата). Глинистые породы рифея Южного Урала имеют $\text{CIA}_{\text{среднее}}$ 68 ± 8 , и, следовательно, процессы химического выветривания на

палеоводосборах во время формирования слагающей их тонкой алюмосиликокластики были, по всей видимости, заметно слабее.

Средние значения K/Al в тонкозернистых обломочных породах нижнего рифея (интервал айская свита → бакальская свита) снижаются от 0.53 ± 0.20 до 0.28 ± 0.08 (рис. 6д). Этот тренд зеркален по отношению к изменению в этом же интервале параметра $\text{CIA}_{\text{среднее}}$. В глинистых породах машакской и зигазино-комаровской свит среднего рифея величины $\text{K}/\text{Al}_{\text{среднее}}$ сопоставимы (0.33 ± 0.07 и 0.37 ± 0.12). Выше, несмотря на то, что авзянская и зильмердакская свиты разделены предположительно перерывом длительностью ~250 млн лет, значения $\text{K}/\text{Al}_{\text{среднее}}$ для присутствующих в их разрезах тонкозернистых обломочных пород также примерно сопоставимы, но они ощутимо выше, чем для машакско-зигазино-комаровского интервала (соответственно 0.60 ± 0.09 , авзянская свита; 0.74 ± 0.12 , бирьянская подсвита, 0.70 ± 0.08 , бедерышинская подсвита). Глинистые породы средней и верхней частей верхнего рифея демонстрируют пилообразные изменения параметра $\text{K}/\text{Al}_{\text{среднее}}$: инзерская свита – 0.41 ± 0.05 , миньярская – 0.84 ± 0.07 , укская – 0.55 ± 0.01 . Средняя величина K/Al для глинистых пород всего разреза рифея Южного Урала равна 0.52 ± 0.21 ($n = 66$), что существенно выше, чем значение $\text{K}/\text{Al}_{\text{среднее}}$ (0.32 ± 0.06 , $n = 22$) для “глинистых фракций” из коллекции Ж. Байона с соавторами, возраст которых отвечает интервалу ~2.32–0.70 млрд лет. С указанным значением сопоставимы только значения $\text{K}/\text{Al}_{\text{среднее}}$ для глинистых пород бакальской, машакской и зигазино-комаровской свит. Это предполагает, что во время накопления отложений рифея интенсивность выветривания на палеоводосборах была менее выраженной, чем это следует из данных, использованных при построении композитной кривой Ж. Байона с соавторами.

Значения Rb/Al для индивидуальных образцов большинства стратиграфических уровней рифея Южного Урала несколько меньше, чем средняя величина Rb/Al для “глинистых фракций” большей части протерозоя (2.32–0.70 млрд лет) из коллекции Ж. Байона с соавторами (0.0016 ± 0.0003) (рис. 6е). Только глинистые породы бирьянской и бедерышинской подсвит зильмердакской свиты характеризуются как более высокими, так и более низкими, чем 0.0016, значениями данного параметра. Это, пожалуй, единственный уровень стратотипического разреза рифея, где мы видим довольно высокоамплитудные вариации отношения Rb/Al . С учетом того, что $\text{Rb}/\text{Al}_{\text{среднее}}$ для глинистых пород рифея составляет 0.0014 ± 0.0006 ($n = 66$), все это также позволяет считать, что на протяжении рифея интенсивность химического выветривания на палеоводосборах – источниках

тонкой алюмосиликокластики — была относительно невелика.

Величины K/Rb в подавляющей части индивидуальных образцов глинистых пород рифея Южного Урала существенно выше, чем $K/Rb_{\text{среднее}}$ (198 ± 59 , $n = 87$) в выборке Ж. Байона с соавторами, возрастные рамки которой несколько шире, чем возрастные рамки рифея (рис. бж). Связано это, как мы отмечали уже выше, скорее всего, с размывом на палеоводосборах достаточно зрелых в литогеохимическом отношении комплексов пород цоколя ВЕП, имевшем место в условиях семиаридного/семигумидного и/или сходного с аридным климата. Ранее на невысокую интенсивность процессов химического выветривания на палеоводосборах во время накопления осадочных толщ верхнего докембрия Южного Урала мы указывали, опираясь на рассчитанные для глинистых пород величины гидролизатного модуля, SiA , K_2O/Al_2O_3 , Ga/Rb и ряда других индикаторов (Маслов и др., 2016).

ВЫВОДЫ

Средняя величина отношения Ni/Co для тонкозернистых обломочных пород рифея Южного Урала равна 4 ± 2 , что статистически не отличается от значения данного параметра (4 ± 3) для глинистых пород, формировавшихся в течение последних ~ 2.5 млрд лет. Равенство величин Ni/Co и для одной длительно накапливавшейся осадочной мегапоследовательности, и для композитной “мировой” кривой, составленной с учетом данных для нескольких десятков осадочных толщ меньшей длительности накопления, дает основания считать, что данный параметр контролируется факторами глобальными или, как предполагают некоторые авторы, только составом пород в источниках сноса.

Отношения La/Sc и Th/Cr , два других индикатора состава размывавшихся на суше комплексов пород, ведут себя в глинистых породах рифея Южного Урала несколько иначе. Параметр $La/Sc_{\text{среднее}}$ на протяжении раннего рифея и первой половины среднего рифея постепенно снижается, что указывает на рост доли пород основного и ультраосновного состава на палеоводосборах, поставивших в области осадконакопления тонкую алюмосиликокластику. Значения $La/Sc_{\text{среднее}}$ в глинистых породах верхнего рифея принципиально не отличаются от свойственных подстилающим их образованиям. Значения $Th/Cr_{\text{среднее}}$ в глинистых породах раннего и начала среднего рифея устойчиво снижаются, а тонкозернистые обломочные породы верхнего рифея обладают достаточно хорошо выраженными пилообразными вариациями рассматриваемого параметра. Все это предполагает, что оба индикатора реагируют не только на глобальные вариации петрофонда, но и на локальные факторы (ре-

гиональная палеогеодинамика, палеогеография, особенности выветривания и транспортировки кластики и др.).

Входящие в состав исследованной Ж. Байоном с соавторами (Bayon et al., 2022) коллекции “глинистые фракции” тонкозернистых обломочных пород обладают на протяжении большей части протерозоя ($2.32-0.70$ млрд лет) почти постоянной величиной отношения Rb/Al (0.0016 ± 0.0003). Указанное значение близко к величине Rb/Al , характерной для продуктов эрозии современных водосборов с преобладанием физического выветривания (0.0018 ± 0.0003). Среднее значение Rb/Al для глинистых пород рифея Южного Урала составляет 0.0014 ± 0.0006 . Это, вкуче с другими аргументами, позволяет считать, что на протяжении всего рифея ($\sim 1750-600$ млн лет назад) интенсивность химического выветривания на палеоводосборах, выступавших источниками тонкой алюмосиликокластики для осадочных последовательностей Южного Урала, была относительно невелика.

Средняя величина SiA для “глинистых фракций”, выделенных Ж. Байоном с соавторами из тонкозернистых обломочных пород с возрастом от 1.47 до 0.70 млрд лет, составляет, по нашим расчетам, 76 ± 5 . В отличие от всего сказанного выше, это указывает на формирование исходных для них осадков при достаточно хорошо выраженных процессах химического выветривания. Глинистые породы рифея Южного Урала имеют $SiA_{\text{среднее}}$ 68 ± 8 , и, соответственно, процессы химического выветривания на палеоводосборах во время формирования слагающей их тонкой алюмосиликокластики были слабее, что согласуется и с выводами, полученными при анализе свойственных им значений Rb/Al .

Средняя величина K/Al для глинистых пород рифея Южного Урала составляет 0.52 ± 0.21 ($n = 66$). Это почти в 2 раза выше, чем $K/Al_{\text{среднее}}$ (0.32 ± 0.06 , $n = 22$) для “глинистых фракций” из коллекции Ж. Байона с соавторами, возраст которых отвечает интервалу $\sim 2.32-0.70$ млрд лет, а также для современных флювиальных глин холодного климата.

Среднее значение K/Rb (428 ± 251 , $n = 66$) в глинистых породах рифея Южного Урала также существенно выше, чем $K/Rb_{\text{среднее}}$ (198 ± 59 , $n = 87$) для коллекции “глинистых фракций” Ж. Байона с соавторами, возрастные рамки которой несколько шире, чем возрастные рамки рифея. Связано это, по всей видимости, с присутствием на водосборах во время формирования осадочной мегапоследовательности рифея достаточно зрелых в литогеохимическом отношении комплексов пород. Разрушение их в обстановках семиаридного/семигумидного и/или сходного с аридным климата способствовало поступлению в области осадконакопления значительного количества тонкорастертого калиевого полевого шпата, что вело к увеличению

значений и K/Al, и K/Rb. Такое предположение хорошо согласуется с выводами, полученными ранее (Маслов и др., 2016).

Приведенный материал позволяет считать, что построенные по разным принципам “мировые” композитные кривые K/Al, Rb/Al и K/Rb (Вауон et al., 2022) и такие же кривые для глинистых пород рифея Южного Урала (эта работа) в достаточной мере сопоставимы. Таким образом, данные по литогеохимическим характеристикам тонкозернистых обломочных/глинистых пород стратотипа рифея существенно расширяют наши представления о характере процессов химического выветривания 1.75–0.6 млрд лет назад.

Благодарности. При подготовке настоящей работы использованы аналитические данные по ряду образцов тонкозернистых обломочных пород рифея Южного Урала, предоставленные Э.З. Гаревым, М.Т. Крупениным и В.М. Горожаниным и ранее обсуждавшиеся в наших совместных с ними публикациях. Авторы искренне признательны рецензентам, советы и замечания которых в немалой степени способствовали улучшению рукописи.

Источники финансирования. Исследования проведены в рамках госзадания ГИН РАН (тема 0135-2019-0043) и ИГГД РАН (тема FMUW-2021-0003).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акимова Г.Н. Косая слоистость в породах зильмердакской свиты на Южном Урале // *Материалы по стратиграфии и тектонике Урала*. Л.: ВСЕГЕИ, 1967. С. 36–65.
- Белоконь Т.В., Горбачев В.И., Балашова М.М. Строение и нефтегазонасыщенность рифейско-вендских отложений востока Русской платформы. Пермь: ИПК “Звезда”, 2001. 108 с.
- Богданова С.В. Земная кора Русской плиты в раннем докембрии (на примере Волго-Уральского сегмента). М.: Наука, 1986. 224 с.
- Горохов И.М., Зайцева Т.С., Кузнецов А.Б., Овчинникова Г.В., Аракелянц М.М., Ковач В.П., Константинова Г.В., Турченко Т.Л., Васильева И.М. Изотопная систематика и возраст аутигенных минералов в аргиллитах инзерской свиты Южного Урала // *Стратиграфия. Геол. корреляция*. 2019. Т. 27. № 2. С. 3–30.
- Дуб С.А., Гражданкин Д.В. Литология и обстановки осадконакопления карбонатных отложений уксской свиты верхнего рифея (неопротерозой) Южного Урала // *Литология и полезн. ископаемые*. 2021. № 6. С. 513–537.
- Зайцева Т.С., Горохов И.М., Ивановская Т.А., Семихатов М.А., Кузнецов А.Б., Мельников Н.Н., Аракелянц М.М., Яковлева О.В. Мессбауэровские характеристики и Rb–Sr и K–Ar возраст верхнерифейских глауконитов уксской свиты Южного Урала // *Стратиграфия. Геол. корреляция*. 2008. Т. 16. № 3. С. 3–25.
- Зайцева Т.С., Кузнецов А.Б., Сергеева Н.Д., Адамская Е.В., Плоткина Ю.В. U–Th–Pb возраст детритового циркона из оолитовых известняков уксской свиты: следы гренвилльских источников сноса в позднем рифее Южного Урала // *Докл. АН. Науки о Земле*. 2022. Т. 503. № 2. С. 14–20.
- Иванов С.Н., Краснобаев А.А., Русин А.И. Докембрий Урала // *Докембрий в фанерозойских складчатых поясах*. Л.: Наука, 1982. С. 81–94.
- Иванов С.Н., Коротеев В.А., Пучков В.Н. Этапы тектонического развития и металлогения Урала // *Актуальные проблемы тектоники СССР*. М.: Наука, 1988. С. 72–78.
- Карта докембрийских формаций Русской платформы и ее складчатого обрамления (со снятыми фанерозойскими отложениями). Масштаб 1 : 2 500 000. Отв. ред. Беккер Ю.Р. Объяснительная записка. Л.: ВСЕГЕИ, 1983. 172 с.
- Ковалев С.Г., Маслов А.В., Ковалев С.С., Высоцкий С.И. Sm–Nd-возраст цирконов Лысогорского комплекса (Южный Урал): свидетельства инициального средне-рифейского магматизма // *Докл. АН*. 2019. Т. 488. № 1. С. 595–598.
- Краснобаев А.А., Козлов В.И., Пучков В.Н., Сергеева Н.Д., Бушарина С.В., Лепехина Е.Н. Цирконология навывших вулканитов айской свиты и проблема возраста нижней границы рифея на Южном Урале // *Докл. АН*. 2013а. Т. 448. № 4. С. 437–442.
- Краснобаев А.А., Козлов В.И., Пучков В.Н., Бушарина С.В., Сергеева Н.Д., Падерин И.П. Цирконовая геохронология машакских вулканитов и проблема возраста границы нижний–средний рифей (Южный Урал) // *Стратиграфия. Геол. корреляция*. 2013б. Т. 21. № 5. С. 3–20.
- Кузнецов А.Б., Овчинникова Г.В., Горохов И.М., Каурова О.К., Крупенин М.Т., Маслов А.В. Sr-изотопная характеристика и Pb–Pb возраст известняков бакальской свиты (типовой разрез нижнего рифея, Южный Урал) // *Докл. АН*. 2003. Т. 391. № 6. С. 794–798.
- Кузнецов А.Б., Овчинникова Г.В., Семихатов М.А., Горохов И.М., Каурова О.К., Крупенин М.Т., Васильева И.М., Гороховский Б.М., Маслов А.В. Sr изотопная характеристика и Pb–Pb возраст карбонатных пород саткинской свиты, нижнерифейская бурзянская серия Южного Урала // *Стратиграфия. Геол. корреляция*. 2008. Т. 16. № 2. С. 16–34.
- Кузнецов А.Б., Семихатов М.А., Горохов И.М. Стронциевая изотопная хемостратиграфия: основы метода и его современное состояние // *Стратиграфия. Геол. корреляция*. 2018. Т. 26. № 4. С. 3–23.
- Кузнецов Н.Б., Маслов А.В., Белоусова Е.А., Романюк Т.В., Крупенин М.Т., Горожанин В.М., Горожанина Е.Н., Серегина Е.С., Цельмович В.А. Первые результаты U–Pb LA-ICP-MS-изотопного датирования обломочных цирконов из базальных уровней стратотипа рифея // *Докл. АН*. 2013. Т. 451. № 3. С. 308–313.
- Кузнецов Н.Б., Белоусова Е.А., Романюк Т.В., Дегтярев К.Е., Маслов А.В., Горожанин В.М., Горожанина Е.Н., Пыжова Е.С. Первые результаты U–Pb-датирования детритовых цирконов из среднерифейских песчаников зигальгинской свиты (Южный Урал) // *Докл. АН*. 2017. Т. 475. № 6. С. 659–664.
- Маслов А.В. Литология верхнерифейских отложений Башкирского мегантиклинория. М.: Наука, 1988. 133 с.
- Маслов А.В. Индикаторы эндо- и экзосферных процессов в осадочных последовательностях и разрез верхне-

- го докембрия Южного Урала // Литология и полезн. ископаемые. 2020. № 4. С. 309–336.
- Маслов А.В., Крупенин М.Т., Гареев Э.З., Анфимов Л.В.* Рифей западного склона Южного Урала (классические разрезы, седименто- и литогенез, минералогия, геологические памятники природы). Т. 1. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2001. 351 с.
- Маслов А.В., Оловянишников В.Г., Ишерская М.В.* Рифей восточной, северо-восточной и северной периферии Русской платформы и западной мегазоны Урала: литостратиграфия, условия формирования и типы осадочных последовательностей // Литосфера. 2002. № 2. С. 54–95.
- Маслов А.В., Подковыров В.Н., Ронкин Ю.Л., Крупенин М.Т., Гареев Э.З., Горожанин В.М.* Долговременные вариации состава верхней коры по данным изучения геохимических особенностей глинистых пород позднего докембрия западного склона Южного Урала и Учуро-Майского региона // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2006. Т. 14. № 2. С. 26–51.
- Маслов А.В., Гареев Э.З., Подковыров В.Н.* Песчаники верхнего рифея и венда Башкирского мегантиклинория // Литология и полезн. ископаемые. 2010. № 3. С. 320–338.
- Маслов А.В., Крупенин М.Т., Киселева Д.В.* Литогеохимия тонкозернистых алюмосиликокластических пород серебрянской серии венда Среднего Урала // Геохимия. 2011. № 10. С. 1032–1062.
- 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 полезн. ископаемые. 2016. № 2. С. 129–149.
- Маслов А.В., Ерохин Е.В., Гердес А., Ронкин Ю.Л., Иванов К.С.* Первые результаты U–Pb LA-ICP-MS-изотопного датирования обломочных цирконов из аркозовых песчаников бирьянской подсвиты зильмердакской свиты верхнего рифея (Южный Урал) // Докл. АН. 2018. Т. 482. № 5. С. 558–561.
- Маслов А.В., Кузнецов А.Б., Крамчанинов А.Ю., Шпакович Л.В., Гареев Э.З., Подковыров В.Н., Ковалев С.Г.* Источники сноса верхнедокембрийских глинистых пород Южного Урала: результаты геохимических и Sm–Nd изотопно-геохимических исследований // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2022. Т. 30. № 1. С. 33–54.
- Нижний рифей Южного Урала. Отв. ред. Семихатов М.А. М.: Наука, 1989. 208 с.
- Овчинникова Г.В., Кузнецов А.Б., Васильева И.М., Горохов И.М., Крупенин М.Т., Гороховский Б.М., Маслов А.В.* Pb–Pb возраст и Sr-изотопная характеристика средне-рифейских фосфоритовых конкреций: зигазино-комаровская свита Южного Урала // Докл. АН. 2013. Т. 451. № 4. С. 430–434.
- Подковыров В.Н., Котова Л.Н.* Литогеохимия и условия формирования отложений верхнего венда и нижнего кембрия северо-запада Балтийской моноклинали // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2020. Т. 65. № 3. С. 600–620.
- Подковыров В.Н., Котова Л.Н., Котов А.Б., Ковач В.П., Граунов О.В., Загорная Н.Ю.* Области сноса и источники рифейских песчаников Учуро-Майского региона (Восточная Сибирь): результаты геохимических и Sm–Nd изотопно-геохимических исследований // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2007. Т. 15. № 1. С. 47–62.
- Подковыров В.Н., Маслов А.В., Кузнецов А.Б., Ершова В.Б.* Литостратиграфия и геохимия отложений верхнего венда–нижнего кембрия северо-востока Балтийской моноклинали // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2017. Т. 25. № 1. С. 3–23.
- Подковыров В.Н., Маслов А.В., Котова Л.Н.* Литохимия глинистых пород верхнего венда–нижнего кембрия центральной части Московской синеклизы: общие особенности формирования // Геохимия. 2022. Т. 67. № 1. С. 19–36.
- Пучков В.Н.* Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.
- Пучков В.Н.* Плюмы – новое слово в геологии Урала // Литосфера. 2018. Т. 18. № 4. С. 483–499.
- Развозжаева Е.П.* Сейсмостратиграфическая модель Алдано-Майского осадочного бассейна (юго-восток Сибирской платформы) // Тихоокеанская геология. 2020. Т. 39. № 5. С. 25–47.
- Романюк Т.В., Кузнецов Н.Б., Маслов А.В., Белоусова Е.А., Ронкин Ю.Л., Горожанин В.М., Горожанина Е.Н.* Геохимическая и (LA-ICP-MS) Lu–Hf-систематика детритных цирконов из лемезинских песчаников верхнего рифея Южного Урала // Докл. АН. 2013. Т. 453. № 6. С. 657–661.
- Романюк Т.В., Кузнецов Н.Б., Маслов А.В., Белоусова Е.А., Крупенин М.Т., Ронкин Ю.Л., Горожанин В.М., Горожанина Е.Н.* Геохимическая и Lu/Hf-изотопная (LA-ICP-MS) систематика детритных цирконов из песчаников базальных уровней стратотипа рифея // Докл. АН. 2014. Т. 459. № 3. С. 340–344.
- Романюк Т.В., Кузнецов Н.Б., Горожанин В.М., Горожанина Е.Н., Белоусова Е.А., Пыжова Е.С.* Результаты изучения детритовых цирконов по методике Ter-gapetchon из бакальской и зигальгинской свит типового разреза рифея (Башкирское поднятие, Южный Урал) // Тектоника современных и древних океанов и их окраин. Материалы XLIX Тектонического совещания, посвященного 100-летию академика Ю.М. Пушаровского. М.: ГЕОС, 2017. С. 152–157.
- Романюк Т.В., Кузнецов Н.Б., Белоусова Е.А., Горожанин В.М., Горожанина Е.Н.* Палеотектонические и палеогеографические обстановки накопления нижнерифейской айской свиты Башкирского поднятия (Южный Урал) на основе изучения детритовых цирконов методом “TerraneChrono®” // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 1. С. 1–37.
- Ронкин Ю.Л., Маслов А.В., Матуков Д.И., Лепихина О.П., Попова О.Ю.* “Машакское рифтогенное событие” рифея типовой области (Южный Урал): новые изотопно-геохронологические рамки // Строеение, геодинамика и минерагенические процессы в литосфере. Материалы IX Международной науч. конф. Сыктывкар: Геопринт, 2005. С. 305–307.
- Ронов А.Б.* Стратисфера, или осадочная оболочка Земли (количественное исследование). М.: Наука, 1993. 144 с.

- Семихатов М.А., Серебряков С.Н.* Сибирский гипостратотип рифея. М.: Наука, 1983. 224 с.
- Семихатов М.А., Кузнецов А.Б., Чумаков Н.М.* Изотопный возраст границ общих стратиграфических подразделений верхнего протерозоя (рифей и венда) России: эволюция взглядов и современная оценка // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2015. Т. 23. № 6. С. 16–27.
- Стратиграфический кодекс России. Издание третье, исправленное и дополненное. СПб.: ВСЕГЕИ, 2019. 96 с.
- Стратотип рифея. Стратиграфия. Геохронология. Отв. ред. Келлер Б.М., Чумаков Н.М. М.: Наука, 1983. 184 с.
- Формирование земной коры Урала. Отв. ред. Иванов С.Н., Самыгин С.Г. М.: Наука, 1986. 248 с.
- Худoley А.К.* Тектоника пассивных окраин древних континентов (на примере восточной окраины Сибирской и западной окраины Североамериканской платформ). Автореф. дисс. ... докт. геол.-мин. наук. М.: ГИИ РАН, 2003. 35 с.
- Чащин В.В., Баянова Т.Б., Савченко Е.Э., Киселева Д.В., Серов П.А.* Петрогенезис и возраст пород нижней платиноносной зоны Мончегундского базитового массива, Кольский полуостров // Петрология. 2020. Т. 28. № 2. С. 150–183.
- Эволюция геологических процессов в истории Земли. Отв. ред. Лаверов Н.П. М.: Наука, 1993. 239 с.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П.* Основы литохимии. СПб.: Наука, 2000. 479 с.
- Bartley J.K., Kah L.C., McWilliams J.L., Stagner A.F.* Carbon isotope chemostratigraphy of the Middle Riphean type section (Avzyan Formation, Southern Urals, Russia): signal recovery in a fold-and-thrust belt // Chem. Geol. 2007. V. 237. P. 211–232.
- Bayon G., Bindeman I.N., Trinquier A., Retallack G.J., Bekker A.* Long-term evolution of terrestrial weathering and its link to Earth's oxygenation // Earth Planet. Sci. Lett. 2022. V. 584. 117490.
- Bayon G., Toucanne S., Skonieczny C., Andre L., Bermell S., Cheron S., Dennielou B., Etoubleau J., Freslon N., Gauchery T., Germain Y., Jorry S.J., Menot G., Monin L., Ponzevera E., Rouget M.-L., Tachikawa K., Barrat J.A.* Rare earth elements and neodymium isotopes in world river sediments revisited // Geochim. Cosmochim. Acta. 2015. V. 170. P. 17–38.
- Bindeman I.N.* Triple oxygen isotopes in evolving continental crust, granites, and clastic sediments // Rev. Min. Geochem. 2021. V. 86. P. 241–290.
- Bjerrum C.J., Canfield D.E.* Ocean productivity before about 1.9 Ga ago limited by phosphorus adsorption onto iron oxides // Nature. 2002. V. 417. P. 159–162.
- Bogdanova S.V., Bingen B., Gorbatshev R., Kheraskova T.N., Kozlov V.I., Puchkov V.N., Volozh Yu.A.* The East European Craton (Baltica) before and during the assembly of Rodinia // Precambrian Res. 2008. V. 160. P. 23–45.
- Bolnar R., Kamber B.S., Moorbath S., Whitehouse M.J., Collier K.D.* Chemical characterization of Earth's most ancient clastic metasediments from the Isua Greenstone Belt, southern West Greenland // Geochim. Cosmochim. Acta. 2005. V. 69. P. 1555–1573.
- Braccialli L., Marroni M., Pandolfi L., Rocchi S.* Geochemistry and petrography of Western Tethys Cretaceous sedimentary covers (Corsica and Northern Apennines): from source areas to configuration of margins // Sedimentary Provenance and Petrogenesis: Perspectives from Petrography and Geochemistry. Eds. Arribas J., Critelli S., Johnson M.J. Geol. Soc. Am. Spec. Pap. 2007. V. 420. P. 73–93.
- Chumakov N.M., Semikhatov M.A.* Riphean and Vendian of the U.S.S.R. // Precambrian Res. 1981. V. 15. P. 229–253.
- Condie K.C.* Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales // Chem. Geol. 1993. V. 104. P. 1–37.
- Condie K.C., Wronkiewicz D.A.* The Cr/Th ratio in Precambrian pelites from the Kaapvaal Craton as an index of craton evolution // Earth Planet. Sci. Lett. 1990. V. 97. P. 256–267.
- Condie K.C., Des Marais D.J., Abbott D.* Precambrian superplumes and supercontinents: a record in black shales, carbon isotopes, and paleoclimates? // Precambrian Res. 2001. V. 106. P. 239–260.
- Cullers R.L.* Implications of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA // Chem. Geol. 2002. V. 191. P. 305–327.
- Cullers R.L., Podkovyrov V.N.* The source and origin of terrigenous sedimentary rocks in the Mesoproterozoic Uj group, southeastern Russia // Precambrian Res. 2002. V. 117. P. 157–183.
- Dessert C., Dupré B., Gaillardet J., Francois L.M., Allegre C.J.* Basalt weathering laws and the impact of basalt weathering on the global carbon cycle // Chem. Geol. 2003. V. 202. P. 257–273.
- Dzombak R.M., Sheldon N.D.* Terrestrial records of weathering indicate three billion years of dynamic equilibrium // Gondwana Res. 2022. V. 109. P. 376–393.
- 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.
- Frei R., Gaucher C., Poulton S.W., Canfield D.E.* Fluctuations in Precambrian atmospheric oxygenation recorded by chromium isotopes // Nature. 2009. V. 461. P. 250–253.
- Gonzalez-Alvarez 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.
- Greber N.D., Dauphas N., Bekker A., Ptáček M.P., Bindeman I.N., Hofmann A.* Titanium isotopic evidence for felsic crust and plate tectonics 3.5 billion years ago // Science. 2017. V. 357. P. 1271–1274.
- Kuznetsov A.B., Bekker A., Ovchinnikova G.V., Gorokhov I.M., Vasilyeva I.M.* Unradiogenic strontium and moderate-amplitude carbon isotope variations in early Tonian seawater after the assembly of Rodinia and before the Bitter Springs Excursion // Precambrian Res. 2017. V. 298. P. 157–173.
- Large R.R., Halpin J.A., Danyushevsky L.V., Maslennikov V.V., Bull S.W., Long J.A., Gregory D.D., Lounejeva E., Lyons T.W., Sack P.J., McGoldrick P.J., Calver C.R.* Trace element content of sedimentary pyrite as a new proxy for deep-time ocean-atmosphere evolution // Earth Planet. Sci. Lett. 2014. V. 389. P. 209–220.
- Lenton T.M., Crouch M., Johnson M., Pires N., Dolan L.* First plants cooled the Ordovician // Nat. Geosci. 2012. V. 5. P. 86–89.

- Lindsay J.F., Leven J.H.* Evolution of a Neoproterozoic to Palaeozoic intracratonic setting, Officer Basin, South Australia // *Basin Res.* 1996. V. 8. P. 403–424.
- Lyons T.W., Reinhard C.T., Planavsky N.J.* The rise of oxygen in Earth's early ocean and atmosphere // *Nature.* 2014. V. 506. P. 307–315.
- Macdonald F.A., Swanson-Hysell N.L., Park Y., Lisiecki L., Jagoutz O.* Arc–continent collisions in the tropics set Earth's climate state // *Science.* 2019. V. 364. P. 181–184.
- McLennan S.M., Hemming S.R., McDaniel D.K., Hanson G.N.* Geochemical approaches to sedimentation, provenance and tectonics // *Processes controlling the composition of clastic sediments.* Eds. Johnsson M.J., Basu A. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.* 1993. V. 284. P. 21–40.
- McLennan S.M., Taylor S.R., Hemming S.R.* Composition, differentiation, and evolution of the continental crust: constraints from sedimentary rocks and heat flow // *Evolution and Differentiation of the Continental Crust.* Eds. Brown M., Rushmer T. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. P. 92–134.
- 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.
- Nesbitt H.W., Young G.M.* Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1984. V. 48. P. 1523–1534.
- Ozaki K., Tajika E.* Biogeochemical effects of atmospheric oxygen concentration, phosphorus weathering, and sea-level stand on oceanic redox chemistry: implications for greenhouse climates // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2013. V. 373. P. 129–139.
- Partin C.A., Bekker A., Planavsky N.J., Scott C.T., Gill B.C., Li C., Podkovyrov V., Maslov A., Konhauser K.O., Lalonde S.V., Love G.D., Poulton S.W., Lyons T.W.* Large-scale fluctuations in Precambrian atmospheric and oceanic oxygen levels from the record of U in shales // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2013. V. 369–370. P. 284–293.
- Planavsky N.J., Rouxel O.J., Bekker A., Lalonde S.V., Konhauser K.O., Reinhard C.T., Lyons T.W.* The evolution of the marine phosphate reservoir // *Nature.* 2010. V. 467. P. 1088–1090.
- Reinhard C.T., Planavsky N.J., Gill B.C., Ozaki K., Robbins L.J., Lyons T.W., Fischer W.W., Wang C., Cole D.B., Konhauser K.O.* Evolution of the global phosphorus cycle // *Nature.* 2017. V. 541. P. 386–389.
- Retallack G.* Boron paleosalinity proxy for deeply buried Paleozoic and Ediacaran fossils // *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 2020. V. 540. 109536.
- Rollinson H.* Secular evolution of the continental crust: implications for crust evolution models // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2008. V. 9. Q12010. <https://doi.org/10.1029/2008GC002262>
- Rooney A.D., Selby D., Houzay J.P., Renne P.R.* Re–Os geochronology of a Mesoproterozoic sedimentary succession, Taoudeni basin, Mauritania: implications for basin-wide correlations and Re–Os organic-rich sediments systematic // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2010. V. 289. P. 486–496.
- Rouxel O.J., Bekker A., Edwards K.J.* Iron isotope constraints on the Archean and Paleoproterozoic ocean redox state // *Science.* 2005. V. 307. P. 1088–1091.
- Rudnick R.L., Gao S.* The composition of the continental crust // *Treatise on Geochemistry.* Eds. Holland H.D., Turekian K.K. V. 3. Oxford, N.Y.: Elsevier, 2003. P. 1–64.
- Semikhatov M.A.* General problems of Proterozoic stratigraphy in the USSR. Reading: Harwood Academic Press, 1991. 192 p.
- Scott C.T., Lyons T.W., Bekker A., Shen Y., Poulton S.W., Chu X., Anbar A.D.* Tracing the stepwise oxygenation of the Proterozoic ocean // *Nature.* 2008. V. 452. P. 456–459.
- Stueken E.E., Buick R., Bekker A., Catling D., Foriel J., Guy B.M., Kah L.C., Machel H.G., Montanez I.P., Poulton S.W.* The evolution of the global selenium cycle: secular trends in Se isotopes and abundances // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2015. V. 162. P. 109–125.
- 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.
- Thomson D., Rainbird R.H., Planavsky N.J., Lyons T.W., Bekker A.* Chemostratigraphy of the Shaler Supergroup, Victoria Island, NW Canada: a record of ocean composition prior to the Cryogenian glaciations // *Precambrian Res.* 2015. V. 263. P. 232–245.
- Visser J.N.J., Young G.M.* Major element geochemistry and paleoclimatology of the Permo-Carboniferous glaciogenic Dwyka Formation and post-glacial mudrocks in Southern Africa // *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 1990. V. 81. P. 49–57.

Рецензенты А.Б. Котов,
А.А. Сорокин, С.И. Школьник

Intensity of Chemical Weathering in Late Precambrian: New Data on the Riphean Stratotype (Southern Ural)

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

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

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

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

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

The values of Ni/Co, La/Sc, and Th/Cr (indicators of the composition of rock complexes eroded in paleowatersheds) and the values of CIA, Rb/Al, K/Al and K/Rb (indicators of the intensity of chemical weathering on land), typical for fine-grained clastic rocks of the Riphean of the Southern Urals were compared to the

data given in the publication “Long-term evolution of terrestrial weathering and its link to Earth’s oxygenation” by Bayon G., Bindeman I.N., Trinquier A., Retallack G.J., and Bekker A. (Earth Planet. Sci. Lett., 2022, v. 584. 117490). It was shown that the average Rb/Al ratio (0.0014 ± 0.0006 , $n = 66$) typical of the Riphean clayey rocks of the Southern Urals, together with other data, suggests that for more than 1.10 Ga (from ~1.75 to ~0.60 Ga) the intensity of chemical weathering in paleowatersheds was relatively low. This is in good agreement with the data obtained by Bayon et al. The material presented in the article allows us to consider that the composite “world” curves of K/Al, Rb/Al, and K/Rb by Bayon et al. and the same curves for clayey rocks of the Riphean of the Southern Urals are sufficiently comparable. Thus, data on the lithogeochemical characteristics of fine-grained clastic/clayey rocks of the Riphean stratotype significantly expand our understanding of the nature of chemical weathering processes on land in the interval 1.75–0.60 Ga ago.

Keywords: long-term evolution of weathering, fine-grained clastic rocks, Riphean, South Urals