

УДК 550.4+552.52:551.583.7

DOI: 10.24930/1681-9004-2025-25-4-725-747

Химический состав глинистых пород стратотипа рифея и некоторые количественные характеристики палеоклимата

О. Ю. Мельничук, А. В. Маслов

Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, 620110, г. Екатеринбург,
ул. Академика Вонсовского, 15, e-mails: o.u.melnichuk@mail.ru; amas2004@mail.ru

Поступила в редакцию 14.03.2024 г., принята к печати 15.04.2024 г.

Объектом исследования являются глинистые породы нижнего, среднего и верхнего рифея стратотипической местности – Башкирского мегантиклинория на западном склоне Южного Урала. Всего в данной работе проанализирован валовый химический состав (основные породобразующие оксиды) 154 проб глинистых сланцев, аргиллитов и глинистых алевролитов. Методика исследований. С использованием ряда современных подходов проведено вычисление среднегодовых палеотемператур (СГТ) водосборов, а также суммы атмосферных осадков (СГСО) и индекса аридизации Кёппена ($AI_{Köppen}$). Основой для указанных вычислений являлись значения величины CIA_{corr} , полученные при корректировке значений CIA с учетом положения точек составов глинистых пород стратотипа рифея на диаграмме $Al_2O_3-(CaO^* + Na_2O)-K_2O$ по реальному (не предполагаемому) тренду выветривания гранитов в умеренном климате. Кластеризация базы данных осуществлена не только по стратонам, но и с использованием величин RW -индекса. Результаты. На основании палеотемпературных характеристик водосборные площади различных эпох рифея можно рассматривать как существовавшие главным образом в умеренных либо сухих холодных климатических обстановках. Однако вычисленные нами значения СГСО и $AI_{Köppen}$ не представляются хоть сколько-нибудь валидными ввиду прямой корреляционной связи между величинами СГСО и СГТ, рассчитанными с помощью применяемых в настоящей статье подходов. Приведено несколько примеров вычисления СГСО с использованием величин СГТ и пограничных значений $AI_{Köppen}$ для позднерифейского времени. Выводы. Наиболее полезной тактикой при реконструкции количественных характеристик палеоклимата докембрийских (и, скорее всего, не только) водосборных площадей, на наш взгляд, является вычисление палеотемператур и последующее использование минеральных индикаторов палеоклимата вместе с индексом аридизации Кёппена для расчета минимальных для гумидного климата либо максимально возможных среднегодовых сумм атмосферных осадков для сухого климата.

Ключевые слова: рифей, Башкирский мегантиклинорий, глинистые породы, петрогенные оксиды, палеоклимат, среднегодовая температура, среднегодовая сумма атмосферных осадков

Источник финансирования

Исследования выполнены в рамках темы государственного задания ИГГ УрО РАН (номер госрегистрации 123011800013-6)

Riphean stratotype mudrocks composition and some paleoclimate quantitative characteristics

Oleg Yu. Melnichuk, Andrey V. Maslov

A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS, 15 Academician Vonsovsky st.,
Ekaterinburg 620110, Russia, e-mails: o.u.melnichuk@mail.ru; amas2004@mail.ru

Received 14.03.2024, accepted 15.04.2024

The object of research is Lower, Middle and Upper Riphean mudrocks in the stratotype area – southern Urals western slope Bashkirian megaanticlinorium. We analyzed major element oxides composition of the 154 samples selected from shales and mudstones. Research method. Mean annual temperature (MAT) and precipitation (MAP), also as Köppen aridity index ($AI_{Köppen}$) was calculated by using different modern approach for ancient catchments. Such computations became possible thanks to CIA values corrected via $Al_2O_3-(CaO^* + Na_2O)-K_2O$ diagram and granites actual (not predicted) weathering

Для цитирования: Мельничук О.Ю., Маслов А.В. (2025) Химический состав глинистых пород стратотипа рифея и некоторые количественные характеристики палеоклимата. Литосфера, 25(4), 725-747. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-4-725-747>. EDN: VFXEJM

For citation: Melnichuk O.Yu., Maslov A.V. (2025) Riphean stratotype mudrocks composition and some paleoclimate quantitative characteristics. Lithosphere (Russia), 25(4), 725-747. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-4-725-747>. EDN: VFXEJM

© О.Ю. Мельничук, А.В. Маслов, 2025

trend in humid temperate climate. In addition, we apply not only strata but RW-index value clusterization for our data base. *Results.* According to estimated paleotemperature values different Riphean catchment areas may be considered as the they existed in humid temperate or cold arid climate. However calculated MAP and $AI_{Köppen}$ are more likely to be invalid through positive correlation between MAP and MAT variables. That is why we also present few examples of MAP estimation for Upper Riphean era by using $AI_{Köppen}$ boundary values and MAT values. *Conclusions.* We think that such reconstruction tactics as paleotemperature evaluation in complex with subsequent applying of Köppen aridity index and the paleoclimate mineral proxies are the best for the quantitative paleoclimate characteristics estimation for Precambrian and, more than likely, beyond. This approach makes possible computation of the MAP lower limit for humid climates and MAP upper limit for arid climates.

Keywords: *Riphean, Bashkirian meganticlinorium, mudrocks, major element oxides, paleoclimate, mean annual temperature, mean annual precipitation*

Funding information

The research was carried out in accordance with the State Contract No. 123011800013-6 of the Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of RAS

Acknowledgements

In preparing this work, a number of data were used, kindly provided to the authors by E.Z. Gareev and M.T. Krupenin. Analytical materials obtained from samples of mudrocks selected by V.M. Gorozhanin and S.G. Kovalev were also involved. Illustrations for the article were made by N.S. Glushkova. The authors are sincerely grateful to all of the listed colleagues, as well as to the anonymous reviewers who took the trouble to familiarize themselves with the text and contributed to its improvement.

ВВЕДЕНИЕ

Давно и хорошо известно, что для реконструкции климата прошлых геологических эпох используются в основном разнообразные приемы и подходы, основывающиеся на анализе литологического состава осадочных последовательностей (породы – прямые индикаторы палеоклимата, минералы – индикаторы палеоклимата и др.) (Страхов, 1963 и др.; Сеницын, 1967; Негруца, 1985; Методы..., 1985; Ясаманов, 1985; Гольберт, 1987; и др.). Параллельно с ними, а в последние несколько десятилетий и более активно, развиваются различные литогеохимические методы, среди которых есть как уже традиционные/широко используемые (например, анализ присущих обломочным породам значений различных модулей и индексов) (Ронов, Хлебникова, 1961; Ruxton, 1968; Parker, 1970; Мележик, Предовский, 1982; Nesbitt, Young, 1982; Harnois, 1988; Юдович, Кетрис, 2000; Duzgoren-Aydin et al., 2002; Babechuk et al., 2014; Garzanti, Resentini, 2016; Маслов, Подковыров, 2023а; и др.), так и экзотичные. К ним, на наш взгляд, можно отнести публикации Г. Реталляка начала и середины 1980-х гг. по докембрийским почвам (Retallack et al., 1984; Retallack, 1986а, 1986б; и др.), актуалистические реконструкции начала XXI в. палеоклиматических обстановок накопления осадочных последовательностей надсерии Белт (Gonzalez-Alvarez, 2005; Gonzalez-Alvarez, Kerrich, 2012), исследования взаимосвязи количественных характеристик палеоклимата, в том числе среднегодовых температур (СГТ) и/или среднегодовых суммарных норм осадков (СГСО) и химического состава почв Северной

Америки (Sheldon et al., 2002), речных осадков Китая (Li, Yang, 2010), нижнепермских ледниковых и постледниковых отложений различных палеоширот (Yang et al., 2014, 2016), приведшие в итоге к рассмотрению глобальной взаимосвязи интенсивности силикатного выветривания и различных факторов окружающей среды (Deng et al., 2022). Кроме того, в последние десятилетия рядом специалистов используются индексы химического выветривания, рассчитанные с помощью метода главных компонент, и “обученные” на выборках аналитических данных для кор выветривания по кислым, средним и основным магматическим породам, сформированным в различных климатических условиях (Ohta, Arai, 2007; Cho, Ohta, 2022). Очевидно, что не все из перечисленных экзотичных практик будут широко применяться при палеоклиматических реконструкциях, но посмотреть – что они дают или могут дать на примере хорошо исследованного в настоящее время по многим направлениям стратотипического разреза рифея – целесообразно. В этом и состоит цель нашей работы.

ЛИТОСТРАТИГРАФИЯ И ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ОСАДОЧНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ СТРАТОТИПА РИФЕЯ

Стратотип рифея, объединяющий три крупные осадочные серии – бурзьянскую, юрматинскую и каратаускую (рис. 1), расположен в пределах западной и центральной зон Башкирского мегантиклинория на западном склоне Южного Урала. Названные серии сложены разнообразными терригенными

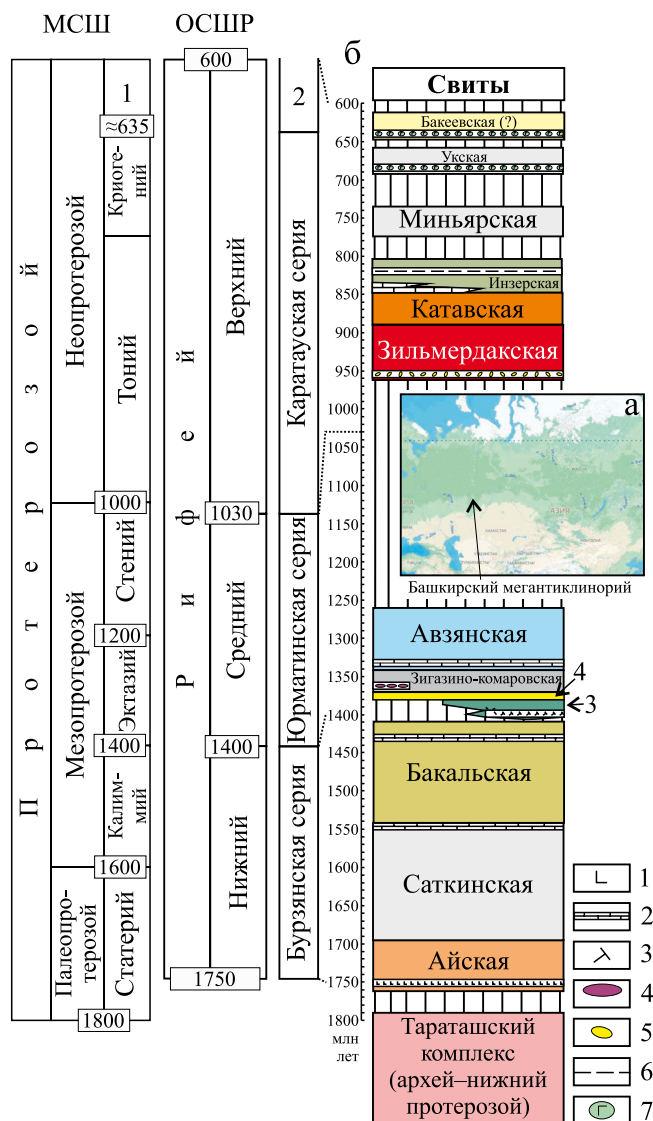


Рис. 1. Обзорная схема (а) и сводная стратиграфическая колонка стратотипа рифея (б).

а: географическая основа заимствована с сайта www.yandex.ru/maps/?ll=48.507137%2C56.097075&z=3.16; б: 1 – эдиакарий, 2 – ашинская серия, 3 – машакская свита, 4 – зигалинская свита. Вертикальная штриховка – перерывы. МСШ – Международная стратиграфическая шкала (версия v2020/03, www.stratigraphy.org). ОСШР – Общая стратиграфическая (геохронологическая) шкала России (по состоянию на 2022 г., www.vsegei.com/ru/info/stratigraphy/stratigraphic_scale/); возраст нижних границ среднего и нижнего рифея показан в соответствии с представлениями (Краснобаев и др., 2013а, б; Семихатов и др., 2015). Объекты датирования: 1 – циркон метабазальтов; 2 – карбонатные породы; 3 – циркон метариолитов; 4 – конкреции фосфоритов; 5 – обломочный циркон; 6 – разноразмерные фракции глинистых пород; 7 – глауконит.

Fig. 1. Overview diagram (a) and a summary stratigraphic column of the Riphean stratotype (b).

а: geographical basis taken from the site www.yandex.ru/maps/?ll=48.507137%2C56.097075&z=3.16; б: 1 – Ediacaran, 2 – Asha Group, 3 – Mashak Formation, 4 – Zigal-

ga Formation. Vertical shading – hiatuses. МСШ – International Stratigraphic Scale (version v2020/03, www.stratigraphy.org). ОСШР – General stratigraphic (geochronological) scale of Russia (as of 2022, www.vsegei.com/ru/info/stratigraphy/stratigraphic_scale/); the age of the lower boundaries of the Middle and Lower Riphean is shown in accordance with the ideas (Krasnobaev et al., 2013a, б; Semikhatov et al., 2015). Dating objects: 1 – zircon of metabasalts; 2 – carbonate rocks; 3 – zircon of metarhyolites; 4 – phosphorite nodules; 5 – detrital zircon; 6 – different-sized fractions of mudrocks; 7 – glauconite.

ми и карбонатными породами. В основании бурзянской и юрматинской серий среди них встречаются вулканиты (Стратотип..., 1983). Подробная послойная характеристика подавляющего большинства естественных разрезов всех трех указанных серий приведена в четырехтомной монографии (Маслов и др., 2001). Исходя из современных представлений о возрасте нижней границы венда (600 млн лет (Стратиграфический..., 2019)), можно предполагать, что рифейский возраст имеет также бакаевская свита ашинской серии, хотя существуют и другие точки зрения.

В бурзянии и юрматинии на востоке Восточно-Европейской платформы (в области сочленения ее с современным Башкирским мегантиклинорием) существовали, по всей видимости, относительно небольшие эпикратонные/надрифтовые бассейны, а для позднего рифея как будто бы может быть реконструирован латеральный ряд формаций, напоминающий последовательность отложений пассивной континентальной окраины (Пучков, 2010 и ссылки в этой работе).

Источником подавляющей массы кластики в рифее являлись кислые магматические/метаморфические породы цоколя Восточно-Европейской платформы (Стратотип..., 1983; Маслов, 1988; Маслов и др., 2001, 2016, 2018, 2022; Зайцева и др., 2022; см. также ссылки в этих работах).

Бурзянская серия (мощность 4000–7000 м) несогласно залегает на архейско-раннепротерозойских образованиях тараташского комплекса и объединяет по периферии Тараташского антиклинория айскую, саткинскую и бакальскую свиты. Айская свита представлена терригенными и (в нижней части) вулканогенными породами. Возраст циркона из последних составляет 1752 ± 11 млн лет (Краснобаев и др., 2013б). Саткинская свита сложена преимущественно доломитами; резко подчиненную роль играют в ее разрезах глинистые сланцы. Возраст раннего диагенеза известняков, залегающих у кровли свиты, равен 1550 ± 30 млн (Кузнецов и др., 2008). Бакальская свита объединяет в нижней части низкоуглеродистые глинистые сланцы, а в верхней – несколько терригенных и карбонатных пачек. Возраст раннего диагенеза известняков этого стратона – 1430 ± 30 млн лет (Кузнецов и др., 2003). В центральной части Башкирского меганти-

клинория с названными свитами коррелируют соответственно большеинзерская, суранская и юшинская свиты (Стратотип..., 1983). Возрастные датировки для них отсутствуют.

Юрматинская серия (мощность 4500–6000 м) по периферии Тараташского антиклинория объединяет зигальгинскую, зигазино-комаровскую и авзянскую свиты. Зигальгинская свита сложена почти исключительно кварцевыми кварцитовидными песчаниками и кварцитопесчаниками. Зигазино-комаровская свита состоит из пачек переслаивания глинистых сланцев, алевролитов и песчаников. Rb-Pb изотопный возраст раннедиагенетических фосфоритов из основания свиты равен 1330 ± 20 млн лет (Овчинникова и др., 2013). Авзянская свита включает несколько карбонатных и терригенных толщ. Исходя из C-хемостратиграфических данных считается, что формирование авзянской свиты происходило не позже ≈ 1270 млн лет назад (Bartley et al., 2007). В центральной части Башкирского мегантиклинория ниже зигальгинской свиты (согласно с ней и несогласно на подстилающих образованиях юшинской свиты) залегает машакская свита, сложенная терригенными породами, метабазами и метариолитами. Циркон из последних имеет U-Pb возраст 1383 ± 3 , 1386 ± 5 и 1386 ± 6 млн лет (Краснобаев и др., 2013а). По данным (Ковалев и др., 2019), начало “машакского магматического события” имело место 1409 ± 89 млн лет назад (Sm-Nd метод).

Каратауская серия (мощность 3500–6000 м) в западной и центральной зонах Башкирского мегантиклинория объединяет зильмердакскую, катавскую, инзерскую, миньярскую и укскую 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-Pb изотопный возраст самого молодого зерна обломочно-го циркона из песчаников бирьянской подсвиты составляет 964 ± 57 млн лет (Маслов и др., 2018). Катавская свита сложена преимущественно глинистыми известняками и мергелями. Авторы публикации (Golovanova et al., 2023, p. 14) считают, что “the actual age of the Katav Formation is closer to 800 Ma”. Инзерская свита представлена пачками переслаивания глауконито-кварцевых песчаников, алевролитов и аргиллитов; в основании свиты в ряде ее западных и северо-западных разрезов присутствуют известняки (подинзерские слои). Изотопный возраст раннедиагенетического иллита из глинистых сланцев инзерской свиты (Rb-Sr метод) варьирует между 836 ± 5 и 803 ± 5 млн лет (Горохов и др., 2019). Ранний диагенез подинзерских известняков имел место 844 ± 24 млн лет назад (Kuznetsov et al., 2017). Миньярская свита сложена в основном доломитами, их Rb-Pb изотопный возраст, по современным представлени-

ям, равен 820 ± 77 млн лет (Kuznetsov et al., 2017). Укская свита объединяет терригенные и карбонатные породы. Al-разности глауконита из нижней ее подсвиты имеют возраст 660–690 млн лет (Зайцева и др., 2008). Бакеевская свита, перекрывающая с размывом укскую свиту (в ряде мест размыв затрагивает и породы катавского уровня), представлена разнообразными терригенными породами. Rb-Sr изотопный возраст глауконита бакеевской свиты оценивается как 642 ± 9 млн лет (Зайцева и др., 2019).

Свойственные глинистым породам стратотипа рифея величины $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$ и $(\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MgO})/\text{SiO}_2$ (рис. 2а), в соответствии с представлениями авторов монографии (Юдович, Кетрис, 2000), дают основание считать их исходно каолиновыми (?), смектитовыми с примесью каолинита и иллита, хлорит-смектит-иллитовыми и иллитовыми глинами (Маслов, Подковыров, 2023б). На графике K/Al–Mg/Al (Turgeon, Brumsack, 2006) фигуративные точки глинистых пород тяготеют к референтной точке иллита (рис. 2б); определенная роль в их составе принадлежит также каолиниту, смектиту и, вероятно, тонкорастертому калиевому полевому шпату (КПШ, см. также рис. 2в). В работе (Маслов и др., 2016) на основе анализа свойств глинистых пород стратотипа рифея величин $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ и Ga/Rb сделан вывод, что в их составе преобладает иллит, т. е. указанные глинистые породы сложены в основном материалом, поступавшим в области седиментации из областей холодного или аридного/семиаридного климата. Интересно, что в подавляющем большинстве глинистых пород рифея, за исключением бакальской свиты, величины индекса химического преобразования (CIA) и содержание Al_2O_3 меньше, чем в PAAS (Taylor, McLennan, 1985). Это также, по всей видимости, свидетельствует о слабой преобразованности слагающей их тонкой алюмосиликокластики процессами химического выветривания.

Степень постседиментационных изменений пород рифея Башкирского мегантиклинория варьирует от метанеза до начального катагенеза (Анфимов, 1997; Кагарманова, 1998). Процессами калиевого метасоматоза глинистые породы стратотипа рифея затронуты довольно слабо (Маслов, 2025).

ПАЛЕОКЛИМАТ ЭПОХ ФОРМИРОВАНИЯ ОСАДОЧНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ СТРАТОТИПА РИФЕЯ (РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЕДШЕСТВУЮЩИХ РАБОТ)

Реконструкции климатических обстановок накопления осадочных последовательностей стратотипа рифея опираются как на результаты разнообразных собственно литологических методов, так и на данные, полученные с использованием литогеохимических приемов и подходов. Обзоры их можно найти в публикациях (Маслов и др., 1999,

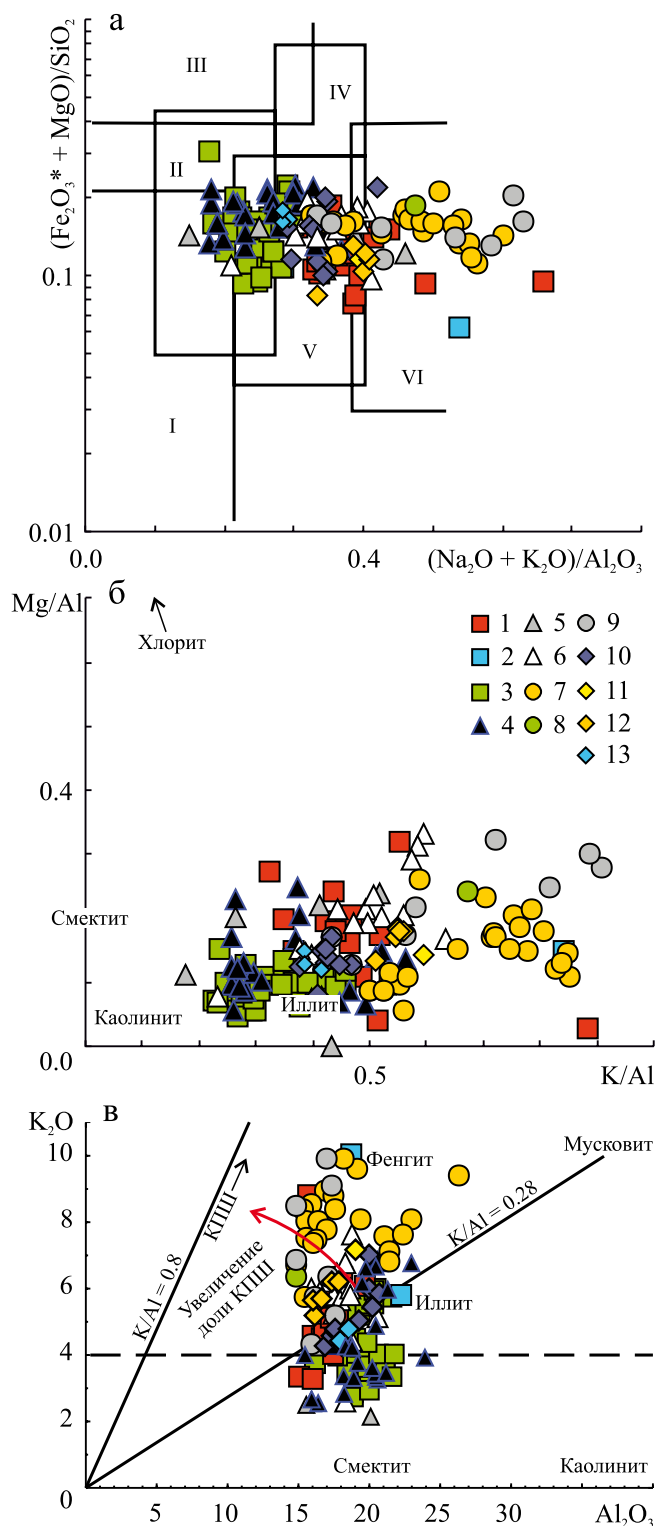


Рис. 2. Положение точек состава глинистых пород стратотипа рифея на диаграммах $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MgO})/\text{SiO}_2$ (Юдович, Кетрис, 2000) (а), $\text{K}/\text{Al} - \text{Mg}/\text{Al}$ (Turgeon, Brumsack, 2006) (б), $\text{K}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3$ (van de Kamp, 2016) (в).

Свиты, подсвиты: 1 – айская (RF_{1ai}); 2 – саткинская (RF_{1st}); 3 – бакальская (RF_{1bk}); 4 – машакская (RF_{1ms}); 5 – зигазино-комаровская (RF_{2zk}); 6 – авзянская (RF_{2av});

7 – бирьянская (RF_{3zl1}); 8 – нугушская (RF_{3zl2}); 9 – бедершинская (RF_{3zl4}); 10 – инзерская (RF_{3in}); 11 – миньярская (RF_{3mn}); 12 – укская (RF_{3uk}); 13 – бакеевская (RF_{3bak}). Глинистые породы (а): I – с преобладанием каолинита; II – смектитовые с хлоритом и каолинитом; III – с преобладанием хлорита и наличием Fe-иллита; IV – хлорит-иллитовые; V – хлорит-иллит-смектитовые; VI – преобладание иллита, наличие тонкорастертого КПШ.

Fig. 2. Position of data points of mudrocks of the Riphean stratotype on the diagrams $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MgO})/\text{SiO}_2$ (Yudovich, Ketris, 2000) (a), $\text{K}/\text{Al} - \text{Mg}/\text{Al}$ (Turgeon, Brumsack, 2006) (б), $\text{K}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3$ (van de Kamp, 2016) (в).

Formations, subformations: 1 – Ai (RF_{1ai}); 2 – Satka (RF_{1st}); 3 – Bakal (RF_{1bk}); 4 – Mashak (RF_{1ms}); 5 – Zigaza-Komarovo (RF_{2zk}); 6 – Avzyan (RF_{2av}); 7 – Biryann (RF_{3zl1}); 8 – Nugush (RF_{3zl2}); 9 – Bederysh (RF_{3zl4}); 10 – Inzer (RF_{3in}); 11 – Minyar (RF_{3mn}); 12 – Uk (RF_{3uk}); 13 – Bakeevo (RF_{3bak}). Mudrocks (a): I – with a predominance of kaolinite; II – smectite with chlorite and kaolinite; III – with a predominance of chlorite and the presence of Fe-illite; IV – chlorite-illite; V – chlorite-illite-smectite; VI – predominance of illite, presence of finely ground K-fs.

2003, 2016; Маслов, Подковыров, 2023а). В предельно кратком виде они суммированы в табл. 1, из которой очевиден характерный для большинства подобных исследований вывод – представления различных авторов о палеоклимате разных эпох рифея далеки от консенсуса.

В одной из недавних работ (Маслов, 2025) по валовому химическому составу глинистых пород ряда литостратиграфических подразделений стратотипа рифея рассчитаны величины $\alpha^{\text{Al}}\text{E}$ (подробнее см.: Garzanti et al., 2013, 2014), позволяющие судить об интенсивности выветривания материнских пород на палеоводосборах. Выполнено также сопоставление значений $\alpha^{\text{Al}}\text{E}$, характерных для илов и взвеси ряда современных рек Южной Африки, Северной Евразии и Северной Америки, и глинистых пород ряда свит рифея Южного Урала. В результате установлено, что кривые $\alpha^{\text{Al}}\text{E}$ для глинистых пород различных стратиграфических уровней стратотипа рифея в существенной степени похожи друг на друга. Для всех из них характерны умеренные величины $\alpha^{\text{Al}}\text{Na}$, достаточно высокие $\alpha^{\text{Al}}\text{Ca}$ и $\alpha^{\text{Al}}\text{Sr}$ и преимущественно низкие значения других $\alpha^{\text{Al}}\text{E}$. Для глинистых пород большинства стратотипов $\alpha^{\text{Al}}\text{Na}_{\text{cp}}$ близки или сопоставимы с теми, что свойственны взвеси рек умеренного климата. Величины $\alpha^{\text{Al}}\text{K}_{\text{cp}}$ в глинистых сланцах и аргиллитах сопоставимы со значениями данного параметра, рассчитанными для взвеси рек умеренного климата, таких как, например, Лена или Гудзон, но они в ряде случаев, вероятно, занижены. Илы рек Южной Африки обладают, напротив, несколько более высокими $\alpha^{\text{Al}}\text{K}$. Если считать “прямое” сопоставление рядов подвижности $\alpha^{\text{Al}}\text{E}$ для глинистых пород стратоти-

Таблица 1. Краткая сводка о представлениях относительно палеоклиматических условий формирования палеоводосборов рифейских толщ стратотипической местности**Table 1.** Brief summary about paleoclimate conditions for catchments of the Riphean units in stratotype area

Серия	Свита	Представления о климате	Источники
Ашинская	Бакеевская	Холодный?	(Келлер и др., 1984; Маслов, 2000, 2014; Пучков и др., 2014; Горожанин и др., 2019)
Каратауская	Укская	Гумидный	(Гареев, 1982; Маслов, Горожанин, 1998; Маслов и др., 2003)
	Миньярская	Аридный	(Маслов, 1988)
	Инзерская	Гумидный	(Гареев, 1988; Маслов, 1988; Маслов и др., 2003)
	Катавская	Аридный или близкий к нему или гумидный	(Раабен, 1975; Гареев, 1982, 1989; Карта..., 1983; Гареев, Веретенникова, 1987; Маслов, Гареев, 1988; Парначев, 1988; Маслов, 1988)
	Зильмердакская	Гумидный или аридный/семиаридный	(Гареев, 1987, 1989; Маслов, 1988; Маслов и др., 2003, 2013)
Юрматинская	Авзянская	Аридный или гумидный	(Парначев, 1987; Гареев, 1989; Широбокова, 1992; Подковыров, Гареев, 1995; Маслов, Гареев, 1999; Маслов и др., 1999; Крупенин и др., 2002)
	Зигазино-комаровская	Семиаридный или гумидный	(Подковыров, Гареев, 1995; Маслов и др., 2003)
	Зигальгинская	Гумидный тропический или теплый	(Т.Ф. Негруца, В.З. Негруца, 2000; Маслов и др., 2003)
	Машакская	Гумидный тропический	(Маслов и др., 2003)
Бурзянская	Бакальская	Гумидный или аридный или холодный	(Сульман и др., 1974; Карпова, Тимофеева, 1975; Генетические..., 1984; Парначев, 1987; Шевелев, 1997; Крупенин, 1999; Маслов, Гареев, 1999; Маслов и др., 1999; Т.Ф. Негруца, В.З. Негруца, 2000)
	Саткинская	Аридный или гумидный	(Парначев, 1987; Шевелев, 1997; Т.Ф. Негруца, В.З. Негруца, 2000)
	Айская	Аридный или холодный	(Сульман, Демчук, 1978; Маслов и др., 2003)

па рифея и таковых для илов и взвеси ряда рек Южной Африки, Северной Евразии и Северной Америки корректным, то можно сделать вывод (не совпадающий со многими предшествующими), что для эпох накопления терригенных отложений рифея Южного Урала был характерен климат, напомиравший современный умеренный климат северного полушария.

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗУЕМОЙ БАЗЫ ДАННЫХ

Для расчета различных индикаторов и параметров палеоклимата применялась база данных о валовом химическом составе тонкозернистых отложений – аргиллитов, глинистых сланцев и глинистых алевролитов, включающая сведения о содержании основных породообразующих оксидов в 154 образцах, отобранных из хорошо известных естественных разрезов рифея Башкирского мегантиклинория и керн некоторых скважин. К их числу принадлежат разрезы айской свиты по р. Ай выше г. Куся и в окрестностях гор Бол. и Мал. Миасс, раз-

рез половинкинской подсвиты саткинской свиты в окрестностях г. Сатка, разрез макаровской (нижней) подсвиты бакальской свиты на окраине г. Бакал и разрезы малобакальской (верхней) подсвиты той же свиты в карьерах Бакальского рудоуправления, обнажения и фрагменты разрезов машакской свиты на хр. Бол. Шатак, обнажения зигазино-комаровской и авзянской свит в районе хут. Катаскин, разрезы и их фрагменты зильмердакской свиты на восточном склоне хр. Зильмердак западнее пос. Инзер, на левом и правом бортах долины р. Мал. Инзер ниже д. Реветь, на южной окраине г. Миньяр, по правому борту долины р. Лемеза выше устья руч. Шаркраук, по левому и правому берегам р. Сатки в районе д. Пороги, фрагменты разрезов и обнажения инзерской свиты в окрестностях пос. Инзер, г. Катав-Ивановск и ж/д ст. Бьянка, разрезы миньярской свиты выше ж/д ст. Бьянка и в бассейне р. Бол. Инзер выше д. Усмангали, фрагменты разрезов нижней подсвиты укской свиты в окрестностях хут. Кулмас и на восточной окраине г. Усть-Катав и разрез бакеевской свиты там же. Информацию о послонном строении большинства

названных разрезов можно найти в четырехтомной монографии (Маслов и др., 2001).

Определение содержания основных породообразующих оксидов в глинистых породах проведено в разные годы в ПГО “Башкиргеология” (г. Уфа), ИГГ УрО РАН (г. Екатеринбург) и ИГ УФИЦ РАН (г. Уфа) методами “мокрой химии” и рентгенофлуоресцентного анализа (РФА). Точность исследований методом РФА в ИГГ УрО РАН составляла 1–5% для элементов с содержанием выше 1–5 мас. %, и до 12–15% для элементов с концентрацией ниже 0.5 мас. %. Пределы обнаружения для SiO_2 и Al_2O_3 составляли 0.22 и 0.16 мас. %, для MgO и MnO – 0.37 и 0.02, суммарного железа (Fe_2O_3^*) – 0.06, K_2O и Na_2O – 0.04 и 0.15, P_2O_5 – 0.03 мас. %.

Содержание SiO_2 в глинистых породах рассматриваемой нами в данной работе выборки варьирует от ≈ 51.63 до ≈ 66.20 мас. % (среднее – 60.55 ± 3.12 мас. %). Среднее содержание TiO_2 составляет 0.81 ± 0.18 мас. %. Величина $\text{Al}_2\text{O}_{3\text{cp}}$ равна 18.58 ± 2.00 мас. % (минимум – 14.98, максимум – 26.34 мас. %). Минимальное количество суммарного железа в виде Fe_2O_3 равно 1.33 мас. %, максимальное достигает 13.97 мас. % ($\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{cp}}^* = 6.76 \pm 1.89$ мас. %). Среднее содержание оксидов магния и кальция составляет 2.26 ± 0.92 и 0.60 ± 0.68 мас. % соответственно (пределы вариаций – 0.01–5.10 и 0.02–4.04 мас. %). Величина $\text{Na}_2\text{O}_{\text{cp}}$ равна 0.73 ± 0.52 , а $\text{K}_2\text{O}_{\text{среднее}} = 5.42 \pm 1.79$ мас. %. Потери при прокаливании (п.п.п.) варьируют от 0.90 до 6.95 мас. %. Таким образом, вся выборка образцов отвечает критериям, характеризующим глинистые породы (Юдович и др., 2020), а именно – содержание $\text{SiO}_2 < 65$ –67 мас. %, содержание $\text{Al}_2\text{O}_3 > 15$ мас. %, величина $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ (ЩМ, щелочной модуль) < 0.50 . Для свит, представленных в нашей выборке пятью образцами и более, среднее, минимальное и максимальное содержание основных породообразующих оксидов и величины ЩМ приведено в табл. 2.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Реконструкция количественных характеристик палеоклимата. В статье К. Дена с соавторами (Deng et al., 2022) приведено уравнение взаимосвязи между величиной химического индекса изменения (CIA) и среднегодовыми палеотемпературами (СГТ), однако перед его рассмотрением следует пояснить, чем ценна указанная работа и каким (незаурядным) путем авторы пришли к такому результату. Используемая ими база данных включала содержание петрогенных оксидов для тонкозернистых отложений (взвесь и алевритоглинистую фракцию донных наносов) современных рек шести континентов – суммарно более 3.8 тыс. проб. Для всех проб были вначале определены такие пока-

затели интенсивности силикатного выветривания, как CIA (Nesbitt, Young, 1982) и индекс выветривания Паркера (WIP (Parker, 1970)). Затем при помощи различных баз данных, привязанных к глобальной навигационной сети, авторами были рассчитаны актуальные для каждой пробы характеристики водосборных площадей (за исключением крупных речных сетей, которые несут смешанный сигнал), областей петрофонда и почвенных профилей, а также климатические характеристики.

После этого для величин CIA и WIP, а также 20 факторов окружающей среды, разбитых на четыре группы – климатические, геоморфологические, литологические и “покровные”, вычислены корреляционные связи: для большинства из них они оказались слабыми. Например, для геоморфологических характеристик водосборных площадей, за исключением толщины почв на возвышениях, корреляционная связь $|R|$ с величиной CIA, как правило, составляет менее 0.2. Позитивная корреляция интенсивности выветривания и толщины почв $R = 0.49$ в глобальных масштабах объяснена тем, что наиболее мощные почвы обычно сильнее обогащены глинистыми минералами. Значения $|R| < 0.2$ также характерны для литологических факторов, под которыми авторами понимаются площадь распространения материнских пород разного состава и их соотношение, для “поверхностных” факторов – площади покрытия земной поверхности в области палеоводосборов льдом, деревьями и лесом в целом. Однако при этом авторы указанной работы не отрицают, что при региональных исследованиях с использованием небольших выборок вариации состава петрофонда и/или проявления ледовой экзарации могут иметь не подчиненное, а главенствующее значение, ведущее к занижению или завышению величин CIA.

Главный акцент при исследовании влияния тех или иных факторов в работе (Deng et al., 2022) сделан на том, что в глобальном масштабе влияние СГТ на величину CIA является вполне очевидным, так как $R_{\text{СГТ-CIA}} = 0.60$. Более того, при температурах 0–30°C выявлена зависимость между величиной СГТ и CIA речных отложений, которая выражается следующим уравнением:

$$\text{CIA} = 1.02\text{СГТ} + 59.23. \quad (1)$$

Эмпирическое уравнение (1) было проверено авторами при вычислении глобального среднего CIA, и полученный результат (73.5) оказался близок к предыдущим оценкам (см., например: McLennan, 1993; Li, Yang, 2010). При реконструкции палеотемператур для четвертичных, неогеновых, палеоценовых и даже пограничных пермь-трисовых отложений, фиксирующих яркие климатические события, выражение (1) также показало хороший результат: расхождение с другими палеотемпературными индикаторами составило менее 1–3°C. Ины-

Таблица 2. Среднее, минимальное и максимальное содержание основных породообразующих оксидов в глинистых породах ряда свит рифея Южного Урала
Table 2. Average, minimum and maximum contents of the major element oxides in mudstones and shales of a number of Riphean units of the Southern Urals

Компонент, мас. %	Свита, подсвита								
	Айская	Бакальская	Машакская	Зигазино-кома- ровская	Авзянская	Бирьянская	Бедершин- ская	Инзерская	Укская
SiO ₂	<u>63.74 ± 1.95</u> 59.38–66.00	<u>60.34 ± 2.56</u> 54.57–66.09	<u>60.78 ± 3.20</u> 53.79–66.20	<u>63.71 ± 1.85</u> 60.95–65.80	<u>59.24 ± 2.41</u> 56.18–65.00	<u>59.14 ± 3.70</u> 51.63–65.86	<u>60.30 ± 2.60</u> 56.93–63.80	<u>59.81 ± 3.70</u> 53.50–65.00	<u>61.35 ± 2.24</u> 59.05–64.44
TiO ₂	<u>0.68 ± 0.11</u> 0.45–0.90	<u>0.80 ± 0.08</u> 0.63–1.03	<u>0.94 ± 0.25</u> 0.58–1.62	<u>0.88 ± 0.09</u> 0.78–0.99	<u>0.90 ± 0.10</u> 0.79–1.13	<u>0.68 ± 0.10</u> 0.35–0.90	<u>0.80 ± 0.09</u> 0.67–0.90	<u>0.91 ± 0.25</u> 0.29–1.18	<u>0.93 ± 0.07</u> 0.85–1.03
Al ₂ O ₃	<u>17.04 ± 1.06</u> 15.00–19.63	<u>19.48 ± 1.18</u> 16.23–21.77	<u>19.42 ± 1.92</u> 15.59–23.94	<u>17.44 ± 1.71</u> 15.70–20.20	<u>18.34 ± 1.23</u> 16.00–20.60	<u>18.65 ± 3.05</u> 14.98–26.34	<u>16.45 ± 1.07</u> 14.98–17.68	<u>18.88 ± 1.42</u> 17.00–20.81	<u>16.91 ± 0.78</u> 16.17–17.95
Fe ₂ O ₃ *	<u>5.15 ± 1.30</u> 3.36–7.75	<u>7.68 ± 1.88</u> 4.77–13.97	<u>8.23 ± 1.53</u> 5.73–12.17	<u>6.19 ± 1.32</u> 4.01–7.38	<u>5.75 ± 1.12</u> 3.00–7.19	<u>6.66 ± 1.10</u> 4.71–8.69	<u>6.02 ± 1.71</u> 3.98–8.41	<u>6.60 ± 1.86</u> 3.55–9.18	<u>4.26 ± 0.54</u> 3.52–4.85
MnO	<u>0.03 ± 0.01</u> 0.01–0.05	<u>0.05 ± 0.04</u> 0.01–0.18	<u>0.03 ± 0.03</u> 0.01–0.11	<u>0.04 ± 0.03</u> 0.01–0.08	<u>0.01 ± 0.04</u> 0.01–0.16	<u>0.04 ± 0.06</u> 0.01–0.29	<u>0.06 ± 0.04</u> 0.02–0.10	<u>0.04 ± 0.02</u> 0.02–0.09	<u>0.01 ± 0.01</u> 0.01–0.02
MgO	<u>2.46 ± 1.16</u> 0.40–5.10	<u>1.60 ± 0.36</u> 0.90–2.53	<u>2.07 ± 0.87</u> 1.07–4.29	<u>2.34 ± 1.44</u> 0.01–3.67	<u>3.36 ± 1.01</u> 1.26–5.08	<u>2.28 ± 0.60</u> 1.29–3.57	<u>3.31 ± 0.90</u> 1.98–4.25	<u>2.32 ± 0.54</u> 1.20–3.29	<u>2.53 ± 0.39</u> 1.90–2.90
CaO	<u>0.59 ± 0.34</u> 0.18–1.40	<u>0.42 ± 0.67</u> 0.07–4.04	<u>0.36 ± 0.32</u> 0.06–1.20	<u>0.29 ± 0.21</u> 0.02–0.56	<u>1.13 ± 1.06</u> 0.30–3.78	<u>0.35 ± 0.35</u> 0.07–1.35	<u>0.93 ± 0.15</u> 0.74–1.14	<u>0.60 ± 0.23</u> 0.27–0.84	<u>2.09 ± 1.27</u> 0.38–3.36
K ₂ O	<u>5.16 ± 1.27</u> 3.30–8.85	<u>4.17 ± 0.94</u> 2.71–5.99	<u>4.44 ± 1.39</u> 2.70–6.87	<u>3.97 ± 1.48</u> 2.28–5.76	<u>5.73 ± 1.13</u> 2.74–7.65	<u>7.95 ± 0.97</u> 5.84–9.93	<u>7.05 ± 1.93</u> 4.45–9.89	<u>5.29 ± 0.85</u> 4.38–7.06	<u>5.87 ± 0.41</u> 5.30–6.29
Na ₂ O	<u>1.59 ± 0.45</u> 0.69–2.67	<u>0.64 ± 0.38</u> 0.13–1.37	<u>0.48 ± 0.31</u> 0.11–1.19	<u>1.51 ± 0.62</u> 0.76–2.23	<u>0.66 ± 0.36</u> 0.11–1.19	<u>0.27 ± 0.25</u> 0.08–1.08	<u>0.95 ± 0.13</u> 0.71–1.09	<u>1.11 ± 0.23</u> 0.62–1.41	<u>0.67 ± 0.32</u> 0.13–0.89
P ₂ O ₅	<u>0.17 ± 0.07</u> 0.09–0.30	<u>0.09 ± 0.05</u> 0.04–0.30	<u>0.11 ± 0.05</u> 0.03–0.26	<u>0.08 ± 0.04</u> 0.02–0.11	<u>0.07 ± 0.03</u> 0.04–0.14	<u>0.17 ± 0.07</u> 0.03–0.38	<u>0.22 ± 0.10</u> 0.13–0.43	<u>0.11 ± 0.05</u> 0.02–0.23	<u>0.10 ± 0.02</u> 0.07–0.11
П.п.п.	<u>3.40 ± 0.49</u> 2.08–4.10	<u>4.91 ± 0.65</u> 3.44–6.95	<u>3.52 ± 1.48</u> 0.90–5.32	<u>3.97 ± 0.89</u> 3.32–5.34	<u>4.81 ± 0.81</u> 3.40–5.93	<u>4.02 ± 0.87</u> 2.50–5.75	<u>4.23 ± 0.49</u> 3.30–4.68	<u>4.42 ± 0.33</u> 3.94–5.00	<u>5.70 ± 0.86</u> 4.40–6.70
ЩМ (Na ₂ O/K ₂ O)	<u>0.33 ± 0.13</u> 0.13–0.62	<u>0.18 ± 0.12</u> 0.02–0.43	<u>0.13 ± 0.10</u> 0.02–0.35	<u>0.39 ± 0.10</u> 0.25–0.48	<u>0.13 ± 0.11</u> 0.01–0.42	<u>0.03 ± 0.03</u> 0.01–0.11	<u>0.15 ± 0.05</u> 0.08–0.20	<u>0.21 ± 0.04</u> 0.14–0.29	<u>0.11 ± 0.05</u> 0.02–0.15
n	17	37	27	5	14	24	8	10	5

Примечание. В числителе – среднее арифметическое и стандартное отклонение, в знаменателе – минимальное и максимальное значение. n – число проанализированных образцов. П.п.п. – потери при прокаливании.

Note. The numerator contains the arithmetic mean and standard deviation, the denominator contains the minimum and maximum values. n – number of analyzed samples. П.п.п. – loss on ignition.

ми словами, авторы достигли позитивных результатов и небольшой погрешности при работе с ископаемыми осадочными архивами, а это, в свою очередь, нашло отражение в оптимизме в отношении потенциала уравнения (1) при палеореконструкциях, в том числе для более древних образований (возраст – сотни миллионов и миллиардов лет), в особенности тех, что не вмещают органические остатки и/или вещество.

Однако при этом в работе (Deng et al., 2022) сформулирован и ряд ограничений/требований к пробам силикластических отложений (и разрезам), применяемым для реконструкции СГТ прошлых эпох. Во-первых, для снижения эффекта минералогической дифференциации авторы рекомендуют использовать только глинистые образования, так как величины CIA для более грубозернистых осадков/пород приближены к CIA петрофонда (Nesbitt et al., 1997). Во-вторых, вариация состава петрофонда для исследуемого разреза/-ов должна быть минимальна и это следует продемонстрировать с помощью независимых показателей (например, индикаторов, использующих концентрации редких и рассеянных элементов). Лучше всего, если влияние этого фактора на величины CIA не будет меняться во времени для исследуемого/-ых разреза/-ов. В-третьих, изучаемые отложения должны охватывать временной интервал минимум в тысячи – десятки тысяч лет, так как именно столько времени необходимо для ощутимого влияния изменений СГТ на интенсивность выветривания (см., например: Penman et al., 2020).

Используемая нами выборка полностью удовлетворяет первому из перечисленных условий. Третье условие также достаточно легко удовлетворить, так как даже одна проба, представляющая условный сантиметр разреза, может охватывать временной промежуток порядка 3 тыс. лет (Algeo, Li, 2020). Многим сложнее в настоящем исследовании соответствовать второму требованию, поскольку помимо преобладания кислых магматических пород в составе петрофонда ряд эпох рифея характеризовался привносом в бассейны седиментации ювенильного материала (Маслов и др., 2022), что особенно характерно для свит, залегающих в основании нижнего (айская свита), среднего (машакская и зигазино-комаровская (?) свиты) и верхнего рифея (зильмердакская свита).

Помимо “оптимизма” и ограничений в работе (Deng et al., 2022) есть место и уместному “пессимизму”. Это выражается в предложении рассматривать только относительные изменения значений CIA (ΔCIA) и СГТ ($\Delta CГТ = \Delta CIA/1.02$), так как влияние региональных геологических особенностей и искажение в расчете палеотемператур, на взгляд авторов, является более или менее постоянным для одной осадочной последовательности. Учитывая это, а также принимая во внимание не

совсем однородный состав рифейских глинистых пород, далее мы в основном будем оперировать усредненными величинами CIA для каждого из стратонов.

Кроме того, при рассмотрении столь большой выборки авторами публикации (Deng et al., 2022) не установлено никаких глобальных зависимостей между величинами CIA и среднегодовыми суммарными нормами осадков (СГСО). Значения CIA могут как уменьшаться, так и увеличиваться совместно с изменениями величин СГСО. Так, например, медианные значения CIA уменьшаются в интервале СГСО 0.2–0.8 м/год, затем увеличиваются (для 0.8–1.4 м/год) и демонстрируют почти одни и те же величины – от 50 до 95 при медианном порядке 85 – при СГСО > 2 м/год (Deng et al., 2022, Fig. 4b). Тем не менее исследования в этой области (климатофункций (Retallack, 2005)) ведутся и сегодня – в одной из последних работ подобной тематики (Gillot et al., 2022) можно найти уравнения взаимосвязи отношения кремнезема к глинозему в почвенных горизонтах и СГСО. По вполне понятным причинам для нас это исследование совсем не подходит, поэтому мы вынуждены обратиться к другим работам данного направления.

Одной из широко известных публикаций по изучению взаимосвязи состава глинистых пород и палеоклимата является работа (Sheldon et al., 2002). В ней на примере 126 проб палеопочв Северной Америки установлена закономерность, описанная следующим уравнением:

$$P = 221.12e^{0.0197(CIA-K)}, \quad (2)$$

где P – СГСО, $CIA-K$ – индекс химического изменения за вычетом калия. Авторы указанной работы отмечают, что параметр P непригоден для работы с почвами болотных, пустынных и тропических (с интенсивным выветриванием) регионов. Позже, при изучении кор выветривания гранитоидов Южной Италии, Ф. Перри (Perri, 2020) модифицировал уравнение (2) и оно приобрело следующий вид:

$$СГСО = 169e^{0.0271(CIA)}. \quad (3)$$

Принимая во внимание преобладание кислых пород среди петрофонда рифейских толщ Башкирского мегантиклинория (Маслов и др., 2022), мы считаем модификацию (3) уравнения (2) предпочтительной, хотя в целом отдаем себе отчет в том, что методика использования химического состава глинистых пород для реконструкции СГСО еще далека от совершенства.

Наконец, при помощи таких параметров, как СГТ и СГСО, можно также рассчитать индекс аридазации Кёппена (Köppen, 1923):

$$AI_{Köppen} = СГСО/(СГТ + 33), \quad (4)$$

который даже спустя столетие остается одним из самых приемлемых показателей, использующих

величины температуры и суммы атмосферных осадков (Quan et al., 2013). При $AI_{Köppen} < 5.7$ климат считается аридным, а при $5.7 \leq AI_{Köppen} < 10.4$ – семиаридным (Quan et al., 2013; Zhang et al., 2016).

Вычисление CIA. В соответствии с представлениями авторов работы (Nesbitt, Young, 1982), индекс CIA вычисляется по формуле:

$$CIA = Al_2O_3 / (Al_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO^*) \quad (5)$$

с применением мольных долей оксидов, при этом CaO^* – величина мольной доли оксида кальция в некарбонатной составляющей породы. Существует несколько подходов к расчету CaO^* (McLennan, 1993; Babechuk et al., 2014; Gwizd et al., 2022), среди которых наиболее подходящим для нас является тот, что предложен в работе (McLennan, 1993), так как для использования других нужны данные карбонатометрии либо рентгеноструктурного анализа и, например, сведения о концентрации сульфат-иона, которыми мы не располагаем либо располагаем не для всех проб нашей выборки.

Суть подхода С.М. Макленнана (McLennan, 1993) заключается в следующем. Содержание CaO уменьшается путем вычитания $10/3$ мольной доли P_2O_5 там, где это возможно. Если оставшаяся мольная доля CaO ниже, чем таковая Na_2O , то такие значения считаются подходящими для дальнейших реконструкций. В противном случае вклад CaO считается существенным и величина CaO^* принимается равной значению мольной доли Na_2O , так как подобное значение соотношения Ca/Na приемлемо для силикатных минералов. В работе (McLennan, 1993) отмечается, что эти поправки могут привести к занижению величин CIA, если потери кальция при выветривании были значительнее, чем потери натрия. В нашей базе данных к корректировке, при которой $CaO^* = Na_2O$, пришлось прибегнуть в отношении 33 проб, среди которых обе пробы из саткинской, 4 – бакальской, 6 – машакской, 7 – авзянской, 4 – бирьянской, 1 – из нугушской, бедерышинской, миньярской и почти все пробы укской и бакеевской свит/подсвит. Если рассмотреть “откорректированную” подвыборку отдельно, то можно заметить геохимически значимые ($p < 0.05$) корреляционные связи между п.п.п. и содержанием CaO ($R = 0.56$), Na_2O (0.60), а также между CaO и Na_2O (0.52). Это позволяет думать, что в указанных породах присутствуют смектит или смешаннослойные образования и/или Са-содержащие ПШ.

Второй проблемой, с которой, как правило, сталкиваются исследователи, использующие CIA, является обогащение пород калием в ходе постседиментационных преобразований – калиевого метасоматоза (Fedо et al., 1995). Он может выражаться в обогащении алюмосиликатов калием как без замены ионов кальция и натрия, так и с их заменой. Мы, вслед за авторами книги (Юдович, Кетрис, 2000; см. также ссылки в этой работе), также

считаем, что обогащение докембрийских красноцветных пород калием (в том числе КПШ) возможно вследствие щелочного аридного/семиаридного выветривания. Однако если в случае постседиментационного обогащения калием ход действий исследователя вполне понятен – использовать предполагаемый тренд выветривания исходных пород на диаграмме $Al_2O_3 - (CaO^* + Na_2O) - K_2O$ (Nesbitt, Young, 1984; Fedо et al., 1995), то что делать во втором случае – не совсем ясно. За неимением лучшего мы также воспользовались корректировкой по тренду, принимая во внимание важное замечание, сделанное в публикации (Meunier et al., 2013) с использованием материалов (Meunier, 1980; White et al., 2002). Оно заключается в том, что предполагаемый тренд выветривания, по крайней мере для кислых пород, таких как граниты и гранодиориты, отличается от действительного.

Еще одним “врожденным” недостатком CIA является то, что он не учитывает выветривание Fe- и Mg-содержащих минералов, характерных для основного петрофонда. Это приводит к искажению его величины с занижением (Babechuk et al., 2014) либо завышением, а также смещению фигуративных точек на диаграмме A–CN–K влево (в сторону трендов выветривания основных и средних пород). Завышение величин главным образом наблюдается при наличии в составе глинистых пород хлорита, величина CIA для которого равна 100. Для диагностики подобных образцов мы воспользовались двумя критериями – содержанием $MgO > 3$ мас. %, свидетельствующем о наличии в глинистых породах основной вулканогенной либо пирокластической и продуктов ее преобразования (Юдович, Кетрис, 2000), и положением фигуративных точек на диаграмме “кислый петрофонд – основной петрофонд – RW” (Cho, Ohta, 2022) с нанесенным на нее трендом выветривания кислых пород.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При корректировке величин CIA (вычислении $CIA_{корр}$) с помощью реальных/действительных трендов выветривания (рис. 3) нами были отмечены особенности, которые в разной степени повлияли на итоговый подсчет палеотемператур. Первая – это, вероятно, занижение величин $CIA_{корр}$ для некоторых образцов айской, машакской, зигазино-комаровской свит и в меньшей степени бедерышинской подсвиты зильмердакской свиты, содержащих $MgO > 3$ мас. % и отклоняющихся вверх от тренда выветривания кислых пород к вершине “основной петрофонд” на диаграмме “кислый петрофонд – основной петрофонд – RW” (рис. 4). Оценить подобное искажение количественно не представляется возможным. Вторая особенность заключается в том, что некоторые точки состава глинистых пород бакальской, машакской, авзянской и укской свит, а

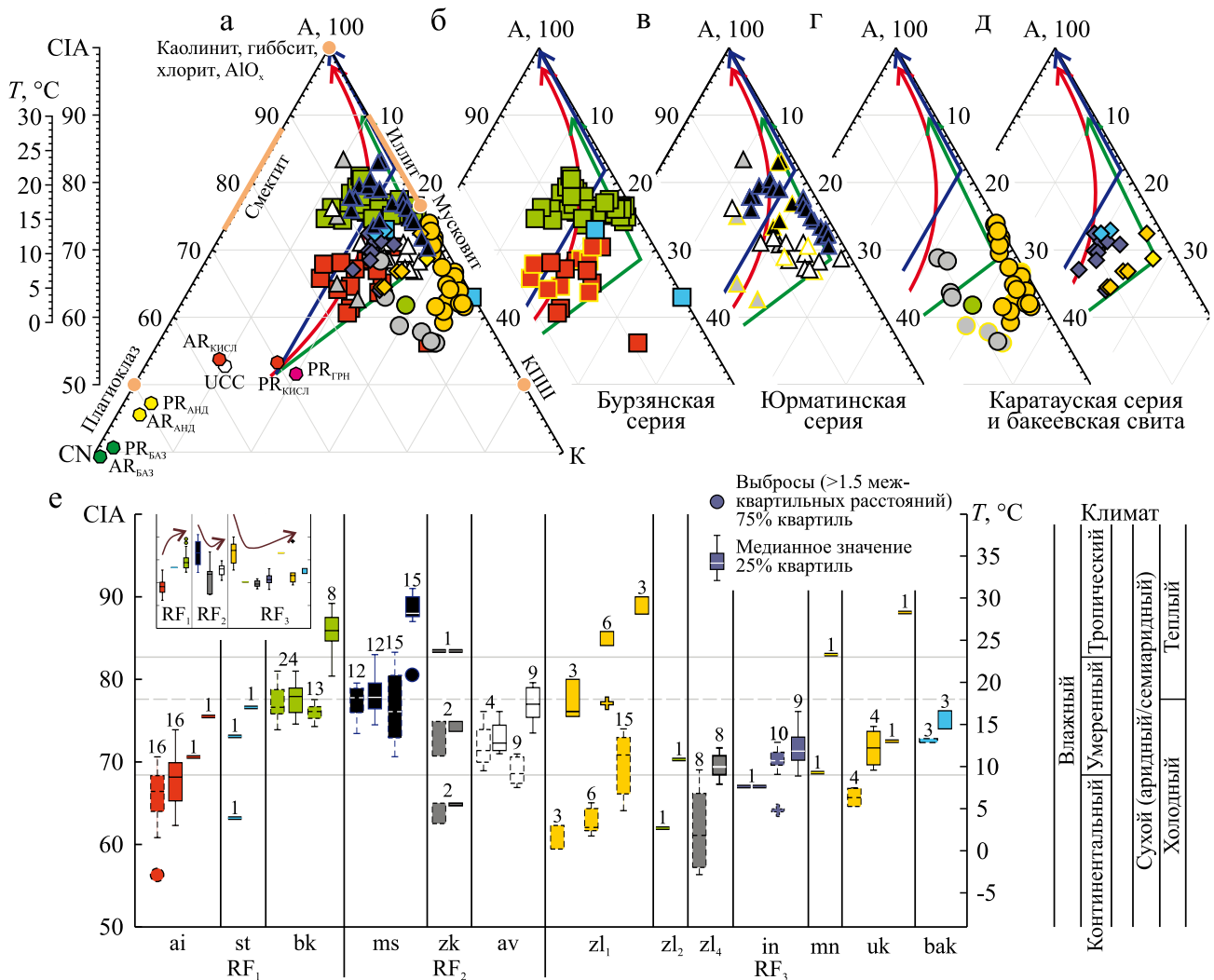


Рис. 3. Диаграмма А–СН–К (Nesbitt, Young, 1982; Fedo et al., 1995) для глинистых пород стратотипа рифея (а–д), а также сравнение значений индекса CIA и CIA_{корр} (е).

а – вся выборка, б – нижнерифейские глинистые породы, в – среднерифейские глинистые породы, г – глинистые породы зильмердакской свиты, д – верхнерифейские глинистые породы (без зильмердакской свиты). Для составов с желтым контуром характерны концентрации MgO > 3 мас. % (также см. текст). Тренды выветривания: синяя линия – предполагаемый тренд выветривания петрофонда (Nesbitt, Young, 1984); красная – тренд выветривания гранитов в приморском умеренном климате (Meunier, 1980); зеленая – тренд выветривания гранодиорита в умеренном (гумидном субтропическом) климате (White et al., 2002). Средние составы архейских (AR) и протерозойских (PR) гранитов (ГРН) кислых пород (КИСЛ), андезитов (АНД) и базальтов (БАЗ) нанесены с использованием значений по (Condie, 1993), верхней континентальной коры (UCC) – по (Rudnick, Gao, 2014).

е – коробчатые диаграммы со штриховыми контурами построены по распределению значений CIA до корректировки, со сплошными контурами – после (CIA_{корр}), цифра над наблюдаемым максимумом – число образцов, попадающих в подвыборку по величине RW-индекса. На врезке показаны коробчатые диаграммы без разделения свит по RW-индексу. Классификация палеоклимата по (Zhang et al., 2016). Остальные условные обозначения см. на рис. 2.

Fig. 3. A–CN–K diagram (Nesbitt, Young, 1982; Fedo et al., 1995) of Riphean stratotype mudrocks (a–d) and comparison of CIA and CIA_{corr} value variation (e).

a – whole dataset, б – Lower Riphean mudrocks, в – Middle Riphean mudrocks, г – mudrocks of the Zilmerdak Fm, д – Upper Riphean mudrocks without Zilmerdak Fm. Yellow outline points display samples with MgO > 3 wt % (also see text). Source rocks weathering trends: blue – predicting trend (Nesbitt, Young, 1984); red – actual trend of granites in maritime temperate climate (Meunier, 1980); green – actual trend of granodiorite in temperate (humid subtropical) (White et al., 2002). Average chemical composition of Archean (AR) and Proterozoic (PR) granites (ГРН) felsic rocks (КИСЛ), andesites (АНД) and basalts (БАЗ) plotted with using values – (Condie, 1993), upper continental crust (UCC) – (Rudnick, Gao, 2014). e – box plots with dashed line display CIA values, with full line – CIA_{corr}, number above upper whisker equal to number of analyzed samples. Inset boxplots represents CIA_{corr} of every unit without RW index value portioning. Paleoclimate classification after (Zhang et al., 2016). Also see Fig. 2 legend.

ветривания кислых пород) пробы практически каждой свиты, представленной в нашей базе данных, были разделены на отдельные кластеры, что дало интересные результаты. В частности, оказалось возможным утверждать, что величины RW-индекса хорошо коррелируют со значениями $СIA_{корр}$.

Для раннерифейского времени в отношении образований исследуемой тектонической структуры можно предполагать потепление на водосборных площадях с 3–16°C при накоплении айской свиты до более чем 15°C, максимум 29°C для бакальской свиты. Средне- и позднерифейские образования демонстрируют одинаковый тренд изменения медианных величин СГТ (см. врезку рис. 3е): похолодание, сменяющееся некоторым потеплением в пределах палеоводосборов. При этом палеоводосборы машакского и бирьянского времени отличались примерно одинаковыми величинами температур, составлявших 15–31°C (медиана $\approx 23^\circ\text{C}$) и 8–30°C (медиана $\approx 24^\circ\text{C}$) соответственно. Валовый химический состав глинистых пород авзянской свиты позволяет предполагать, что они накапливались из материала, выветривавшегося при СГТ порядка 11–20°C (медианное $\approx 16^\circ\text{C}$), тогда как пробы зигазино-комаровской свиты в этом плане более разнородны – порядка 6°C (2 пробы), 14–15 (2 пробы) и около 18°C (1 проба). Следует отметить также сопоставимость палеотемпературных характеристик для нугушской (СГТ = 11°C), бедерышинской (8–12) подсвит зильмердакской свиты, инзерской (8–17, медиана 12) и укской (10–15°C) свит. Лишь некоторые пробы глинистых пород верхнего рифея имеют химический состав, отвечающий относительно высоким величинам среднегодовых палеотемператур (миньярская свита – 23°C, укская – порядка 28°C). Бакеевская свита, являющаяся, вероятно, продуктом ледовой экзарации подстилающих толщ (Маслов и др., 2022), демонстрирует более высокие величины $СIA_{корр}$ и палеотемператур (14–17°C) по сравнению с другими верхнерифейскими отложениями (кроме бирьянской подсвиты), что может быть следствием накопления богатых Fe/Mg глинистых минералов в таких климатических условиях (Deng et al., 2022; см. также ссылки в этой работе).

Постепенное потепление, происходившее в раннем рифее, мы с некоторой осторожностью склонны связывать с различными тектоническими событиями, сопровождавшимися выделением углекислого газа в атмосферу, в том числе сборкой суперконтинента Нуна, а также смещением блоков земной коры, за счет разрушения которых сформировались рассматриваемые толщи, из низких широт в приэкваториальные (Li et al., 2023). Все последующие температурные изменения также, вероятно, связаны с проявлениями вулканизма и дрейфом террейнов/континентов, за исключением наиболее верхней части разреза рифея.

Вычисление СГСО и индекса аридизации при помощи формул (3) и (4) позволяет получить некие результаты, но есть сомнения относительно их использования, так как фактически при применении уравнения (3) более теплые обстановки на палеоводосборных площадях “автоматически” определяются как в среднем более влажные (рис. 5а) и в большинстве своем гумидные (рис. 5б), что при таком подходе актуально и для рассматриваемых нами образований ($AI_{Коррен} > 10.4$), а менее теплые – семиаридными и аридными. Более продуктивным, на наш взгляд, будет не только использовать RW-индекс и уравнение (1), но и учитывать другие индикаторы палеоклимата (для докембрийских образований – в первую очередь минералогические – и таким образом вычислять пороговые значения СГСО из выражения (3). Далее рассмотрены два примера подобного подхода.

Первый пример – красноцветные образования в составе зильмердакской свиты, которые обогащены калием (тонкорастертым КППШ). Как мы уже упоминали, подобное сочетание (красноцветность и высокие, более 4–6 мас. %, концентрации K_2O) в большей степени характерно для аридных/семиаридных обстановок (Юдович, Кетрис, 2000). Принимая во внимание пограничные значения $AI_{Коррен}$ для семиаридных климатических условий, можно предполагать, что палеотемпературному диапазону в 16–30°C (бирьянская подсвита) отвечает СГСО менее 0.51–0.66 м/год (см. рис. 5в), а 8–12°C (бедерышинская подсвита) – менее 0.43–0.47 м/год. Иными словами, подобные оценки сильно отличаются (более чем на 0.5–0.6 м/год) от тех, что можно получить, используя уравнение (Perri, 2020) (см. рис. 5а). Климат для бирьянских палеоводосборов можно охарактеризовать в основном как сухой теплый (СГТ $\geq 18^\circ\text{C}$), бедерышинских – сухой холодный (СГТ $< 18^\circ\text{C}$).

Вторым примером являются толщи, для которых нет каких-либо особых сомнений относительно гумидного/субгумидного палеоклимата на водосборных площадях во время их накопления (см. табл. 1), т. е. это инзерская и укская свиты. В обоих случаях минимальная сумма среднегодовых атмосферных осадков на водосборах должна была составлять >0.42 –0.52 м/год (см. рис. 5в), для того чтобы в соответствии с (Quan et al., 2013; Zhang et al., 2016) считать палеоклимат субгумидным, либо быть примерно в 1.5 раза больше, чтобы можно было аттестовать его как гумидный. Только для единичной пробы, отобранной из укской свиты, эта величина должна была превышать 0.63 (либо ≈ 0.9) м/год (см. рис. 5в). Таким образом, те оценки, что вычислены по уравнению (Perri, 2020), вполне имеют право на существование (см. рис. 5а). Климат для водосборов инзерского и укского времени можно считать умеренным ($9^\circ\text{C} \leq \text{СГТ} < 23^\circ\text{C}$) и иногда тропическим (СГТ = 28°C), но последний вывод

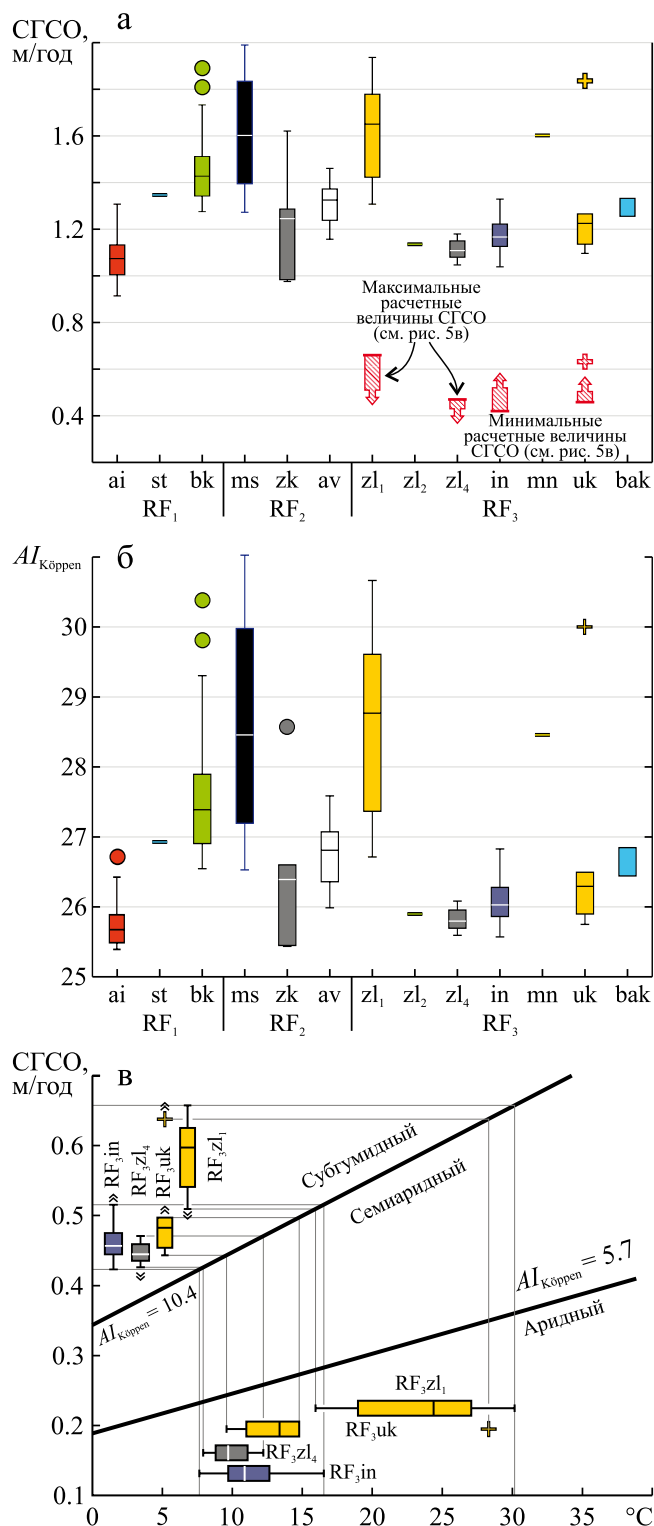


Рис. 5. Сравнение величин СГСО (а) и индекса аридизации Кёппена (б) для стратонтов стратотипа рифея, а также пример расчета минимальных и максимальных величин СГСО (в).

Fig. 5. Comparison of mean annual precipitation (a) and Köppen aridity index (б) of Riphean stratotype units and example of minimum and maximum mean annual precipitation calculation (в).

сделан только по одной пробе и, конечно, нуждается в верификации.

ВЫВОДЫ

В настоящей работе на примере бурзянской, юрматинской и каратауской серий стратотипа рифея (западный склон Южного Урала) показаны возможности и ограничения методов расчета количественных палеоклиматических характеристик водосборных площадей (среднегодовых температур и суммы осадков) на основе данных о валовом химическом составе глинистых пород. При этом важно подчеркнуть следующее.

Так как изменение значения индекса CIA на одну единицу примерно равно изменению СГТ на 1°C, то для палеотемпературных реконструкций критически важны: 1) оценка влияния смещения источников сноса на состав глинистых пород; 2) методика расчета составов глинистых пород до их постседиментационного обогащения калийсодержащими минералами. В связи с этим нам представляется необходимым в будущем подробнее рассмотреть тренды выветривания различных магматических и силиклатических пород на диаграмме А–СН–К, как предполагаемые, так и реальные. Также существует настоятельная необходимость разработки уравнения, которое выражало бы зависимость между другим, более надежным, индексом выветривания пород и СГТ.

Величины RW-индекса хорошо коррелируют со значениями индекса CIA, для которых внесены поправки (CIA_{корр}). Необходимо дальнейшее тестирование RW-индекса, так как, например, красноцветные толщи, предположительно накапливавшиеся в семиаридном/аридном климате (яркий пример – зильмердакская свита), характеризуются величинами RW, типичными для тропического климата. Есть вероятность (также см. нижевендскую глусскую свиту в (Маслов и др., 2024)), что для докембрийских красноцветных отложений, обогащенных калием, характерны определенные паттерны поведения на диаграмме А–СН–К и “кислый петрофонд – основной петрофонд – RW”.

Вычисление СГСО с помощью формулы, предлагаемой Ф. Перри (Perri, 2020), имеет свои сложности и проблемы. Нам представляется более уместным сначала вычислять палеотемпературы, а затем, используя различные палеоклиматические индикаторы (минеральные либо литологические), производить расчет минимальных или максимально возможных величин СГСО, принимая во внимание пограничные значения индекса Кёппена (Quan et al., 2013; Zhang et al., 2016). Только так можно в первом приближении воспользоваться классификациями климата для дочетвертичных образований, например той, что приведена в работе (Zhang et al., 2016).

Палеотемпературные характеристики в совокупности с величинами RW-индекса и использованием классификации палеоклимата (Zhang et al., 2016) в первом приближении позволяют предполагать накопление осадочных последовательностей стратотипа рифея за счет материала, формировавшегося в основном в умеренном либо холодном сухом климате (СГТ от 9 до 18°C). Исключение составляют некоторые пробы бакальской, машакской свит и бирьянской подсвиты зильмердакской свиты (СГТ более 18–23°C), для которых рассчитанные нами параметры отвечают тропическому либо теплому сухому климату, а также айской свиты. Климат времени накопления последней соответствовал, скорее всего, континентальному либо субарктическому климату (СГТ менее 9°C). Подробнее ответить на вопрос об их палеоклиматической принадлежности (сухом или влажном климате) можно будет, обращаясь к минеральным индикаторам палеоклимата и используя пограничные значения $AI_{Körppen}$, как это показано на нескольких примерах.

Все выполненные нами реконструкции опираются на актуалистические модели климата. Каковы они будут в иных случаях, судить пока практически невозможно, как и о том, насколько соответствуют их результаты тому, что было на самом деле.

Благодарности

При подготовке настоящей работы использован ряд данных, любезно предоставленных авторам Э.З. Гареевым и М.Т. Крупениным. Привлечены также аналитические материалы, полученные по образцам глинистых пород, отобранным В.М. Горожаниным и С.Г. Ковалевым. Иллюстрации к статье выполнены Н.С. Глушковой. Всем перечисленным коллегам, как и анонимным рецензентам, взявшим на себя труд ознакомления с текстом и способствовавшим его улучшению, авторы искренне признательны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анфимов Л.В. (1997) Литогенез в рифейских осадочных толщах Башкирского мегаантиклинория (Ю. Урал). Екатеринбург: УрО РАН, 288 с.
- Гареев Э.З. (1982) Геохимические особенности карбонатных пород опорных разрезов катавской и укской свит рифея Южного Урала. *Верхний докембрий и палеозой Южного Урала: стратиграфия и литология*. (Отв. ред. М.А. Гаррис). Уфа: БФАН СССР, 36-46.
- Гареев Э.З. (1987) Условия формирования зильмердакских отложений по геохимическим данным на примере стратотипического разреза по р. Малый Инзер (Южный Урал). *Геохимия осадочных формаций Урала*. (Отв. ред. Л.В. Анфимов, М.Т. Крупенин). Свердловск: УНЦ АН СССР, 29-36.
- Гареев Э.З. (1988) Геохимические особенности и условия осадконакопления отложений инзерской свиты в стратотипическом разрезе на Южном Урале. *Верхний докембрий Южного Урала и востока Русской плиты*. (Отв. ред. В.И. Козлов). Уфа, БФАН СССР, 29-35.
- Гареев Э.З. (1989) Геохимия осадочных пород стратотипического разреза рифея: Автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. М.: ГЕОХИ РАН, 24 с.
- Гареев Э.З., Веретенникова Т.Ю. (1987) Петрохимия и геохимия глинисто-карбонатных пород стратотипического разреза авзянской свиты на Южном Урале. *Микроэлементы в магматических, метаморфических и рудных формациях Урала*. (Отв. ред. Д.Н. Салихов). Уфа: БФАН СССР, 61-68.
- Генетические типы, закономерности размещения и прогноз месторождений брусита и магнезита. (1984) (Отв. ред. В.П. Петров). М.: Наука, 317 с.
- Гольберт А.В. (1987) Основы региональной палеоклиматологии. М.: Недра, 221 с.
- Горожанин В.М., Мичурин С.В., Войкина З.А., Шарипова А.А., Биктимерова З.Р., Султанова А.Г. (2019) Марино-гляциальные отложения в толпаровском разрезе верхнего докембрия (реки Зилим и Малый Толпар). *Геол. вестн.*, (3), 69-92. <https://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-3-6>
- 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. (2019) Изотопная систематика и возраст аутигенных минералов в аргиллитах инзерской свиты Южного Урала. *Стратиграфия. Геол. корреляция*, 27(2), 3-30. <https://doi.org/10.31857/S0869-592X2723-30>
- Зайцева Т.С., Горохов И.М., Ивановская Т.А., Семихатов М.А., Кузнецов А.Б., Мельников Н.Н., Аракелянц М.М., Яковлева О.В. (2008) Мессбауэровские характеристики, минералогия и изотопный возраст (Rb-Sr, K-Ar) верхнерифейских глауконитов укской свиты Южного Урала. *Стратиграфия. Геол. корреляция*, 16(3), 3-25.
- Зайцева Т.С., Кузнецов А.Б., Горожанин В.М., Горохов И.М., Ивановская Т.А., Константинова Г.В. (2019) Основание венда на Южном Урале: Rb-Sr возраст глауконитов бакеевской свиты. *Стратиграфия. Геол. корреляция*, 27(5), 82-96. <https://doi.org/10.31857/S0869-592X27582-96>
- Зайцева Т.С., Кузнецов А.Б., Сергеева Н.Д., Адамская Е.В., Плоткина Ю.В. (2022) U-Th-Pb-возраст детритового циркона из оолитовых известняков укской свиты: следы гренвилльских источников сноса в позднем рифее Южного Урала. *Докл. РАН. Науки о Земле*, 503(2), 90-96. <https://doi.org/10.31857/S2686739722040193>
- Кагарманова Н.И. (1998) Глинистые породы рифея Башкирского мегаантиклинория. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 158 с.
- Карпова Г.В., Тимофеева З.В. (1975) Литогенез и стадии изменения рифейских отложений Южного Урала. *Литология и полез. ископаемые*, (2), 45-55.
- Карта докембрийских формаций Русской платформы и ее складчатого обрамления (со снятыми фанерозойскими отложениями). (1983) Масштаб 1 : 2 500 000. Объясн. зап. Л.: ВСЕГЕИ, 172 с.
- Келлер Б.М., Вейс А.Ф., Горожанин В.М. (1984) Толпаровский разрез верхнего докембрия (Южный Урал). *Изв. АН СССР. Сер. геол.*, (9), 119-124.
- Ковалев С.Г., Маслов А.В., Ковалев С.С., Высоцкий С.И.

- (2019) Sm-Nd-возраст пикритов Лысогорского комплекса (Южный Урал): свидетельства инициального среднерифейского магматизма. *Докл. РАН*, **488**(1), 595-598. <https://doi.org/10.31857/S0869-5652488158-61>
- Краснобаев А.А., Козлов В.И., Пучков В.Н., Бушарина С.В., Сергеева Н.Д., Падерин И.П. (2013а) Цирконовая геохронология машакских вулканитов и проблема возраста границы нижний-средний рифей (Южный Урал). *Стратиграфия. Геол. корреляция*, **21**(5), 3-20. <https://doi.org/10.7868/S0869592X13050050>
- Краснобаев А.А., Козлов В.И., Пучков В.Н., Сергеева Н.Д., Бушарина С.В., Лепехина Е.Н. (2013б) Цирконология навыйшских вулканитов айской свиты и проблема возраста нижней границы рифея на Южном Урале. *Докл. РАН*, **448**(4), 437-442. <https://doi.org/10.7868/S086956521304021X>
- Крупенин М.Т. (1999) Условия формирования сидеритонной бакальской свиты нижнего рифея (Южный Урал). Екатеринбург: УрО РАН, 257 с.
- Крупенин М.Т., Ларионов Н.Н., Гуляева Т.Я., Демчук И.Г. (2002) Новые данные об особенностях седиментации в бассейнах авзянского времени среднего рифея. *Тр. ИГГ УрО РАН*, вып. 149, 43-49.
- Кузнецов А.Б., Овчинникова Г.В., Горохов И.М., Каурова О.К., Крупенин М.Т., Маслов А.В. (2003) Sr-изотопная характеристика и Pb-Pb возраст известняков бакальской свиты (типовой разрез нижнего рифея, Южный Урал). *Докл. РАН*, **391**(6), 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. (2008) Sr изотопная характеристика и Pb-Pb возраст карбонатных пород саткинской свиты, нижнерифейская бурзянская серия Южного Урала. *Стратиграфия. Геол. корреляция*, **16**(2), 16-34.
- Маслов А.В. (1988) Литология верхнерифейских отложений Башкирского мегантиклинория. М.: Наука, 133 с.
- Маслов А.В. (2000) Некоторые особенности ранневендской седиментации на Южном и Среднем Урале. *Литология и полез. ископаемые*, (6), 624-639.
- Маслов А.В. (2014) Литогеохимический облик отложений ашинской серии венда западного склона Южного Урала. *Литосфера*, (1), 13-32.
- Маслов А.В. (2025) αAlE индексы глинистых пород рифея Южного Урала и особенности выветривания (первая попытка анализа). *Литосфера*, **25**(1), 96-113. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-1-96-113>
- Маслов А.В., Гареев Э.З. (1988) Литолого-геохимические особенности верхнерифейских отложений Башкирского мегантиклинория на Южном Урале. *Сов. геол.*, (2), 57-66.
- Маслов А.В., Гареев Э.З. (1999) Петрохимические особенности позднемеловских осадочных ассоциаций Башкирского мегантиклинория. *Литология и полез. ископаемые*, (1), 78-91.
- Маслов А.В., Горожанин В.М. (1998) Нижнеуральский уровень каратавия типовой местности: особенности палеогеографии и параметров среды осадконакопления (по данным изучения глауконита). *Тр. ИГГ УНЦ АН СССР*, вып. 145, 15-20.
- Маслов А.В., Подковыров В.Н. (2023а) Индексы химического выветривания и их использование для палеоклиматических реконструкций (на примере разреза венда-нижнего кембрия Подольского Приднестровья). *Литология и полез. ископаемые*, (3), 249-273. <https://doi.org/10.31857/S0024497X22700033>
- Маслов А.В., Подковыров В.Н. (2023б) Интенсивность химического выветривания в позднем докембрии: новые данные по стратотипу рифея (Южный Урал). *Стратиграфия. Геол. корреляция*, **31**(2), 109-124. <https://doi.org/10.31857/S0869592X23020060>
- Маслов А.В., Гражданкин Д.В., Гой Ю.Ю. (2013) Прimitивные палеопочвы в разрезах зильмердакской свиты (текстурный и литогеохимический аспекты). *Литосфера*, (2), 45-64.
- Маслов А.В., Крупенин М.Т., Гареев Э.З. (2003) Литологические, литохимические и геохимические индикаторы палеоклимата (на примере рифея Южного Урала). *Литология и полез. ископаемые*, (5), 427-446.
- Маслов А.В., Гареев Э.З., Крупенин М.Т., Демчук И.Г. (1999) Тонкая алюмосиликокластика в верхнедокембрийском разрезе Башкирского мегантиклинория (к реконструкции условий формирования). Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 324 с.
- Маслов А.В., Крупенин М.Т., Гареев Э.З., Анфимов Л.В. (2001) Рифей западного склона Южного Урала (классические разрезы, седименто- и литогенез, минерогенез, геологические памятники природы). Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, Т. I, 351 с.; Т. II, 134 с.; Т. III, 130 с.; Т. IV, 103 с.
- Маслов А.В., Мельничук О.Ю., Кузнецов А.Б., Подковыров В.Н. (2024) Литогеохимия верхнедокембрийских терригенных отложений Беларуси. Сообщ. 2. Петрофонд, палеогеодинамика, палеогеография и палеоклимат. *Литология и полез. ископаемые*, (5), 515-543. <https://doi.org/10.31857/S0024497X24050019>
- Маслов А.В., Подковыров В.Н., Гареев Э.З., Граунов О.В. (2016) Изменения палеоклимата в позднем докембрии (по данным изучения верхнедокембрийского разреза Южного Урала). *Литология и полез. ископаемые*, (2), 129-149. <https://doi.org/10.7868/S0024497X16020051>
- Маслов А.В., Ерохин Е.В., Гердес А., Ронкин Ю.Л., Иванов К.С. (2018) Первые результаты U-Pb LA-ICP-MS-изотопного датирования обломочных цирконов из аркозовых песчаников бирьянской подсвиты зильмердакской свиты верхнего рифея (Южный Урал). *Докл. РАН*, **482**(5), 558-561. <https://doi.org/10.31857/S086956520002995-7>
- Маслов А.В., Кузнецов А.Б., Крамчанинов А.Ю., Шпакович Л.В., Гареев Э.З., Подковыров В.Н., Ковалев С.Г. (2022) Источники сноса верхнедокембрийских глинистых пород Южного Урала: результаты геохимических и Sm-Nd изотопно-геохимических исследований. *Стратиграфия. Геол. корреляция*, **30**(1), 33-54. <https://doi.org/10.31857/S0869592X22010045>
- Мележик В.А., Предовский А.А. (1982) Геохимия раннепротерозойского литогенеза (на примере северо-востока Балтийского щита). Л.: Наука, 208 с.
- Методы реконструкции палеоклиматов. (1985) (Отв. ред. А.А. Величко). М.: Наука, 188 с.
- Негруппа Т.Ф. (1985) О возможности реконструкций палеоклиматов докембрия. *Современные проблемы палеоклиматологии и литологии*. (Под ред. Н.Н. Верзилина). Л.: ЛГУ, 69-85.

- Негруца Т.Ф., Негруца В.З. (2000) Литогенетические формации и их значение для реконструкции палеоклиматов докембрия. *Проблемы литологии, геохимии и рудообразования осадочного процесса. Т. 2.* М.: ГЕОС, 66-70.
- Овчинникова Г.В., Кузнецов А.Б., Васильева И.М., Горохов И.М., Крупенин М.Т., Гороховский Б.М., Маслов А.В. (2013) Pb-Pb возраст и Sr-изотопная характеристика среднерифейских фосфоритовых конкреций: зигазино-комаровская свита Южного Урала. *Докл. РАН*, **451**(4), 430-434. <https://doi.org/10.7868/S0869565213220209>
- Парначев В.П. (1987) Фтор и хлор в позднедокембрийских осадочных породах Башкирского мегантиклинория в связи с вопросами их седиментации. *Геохимия вулканических и осадочных пород Южного Урала.* (Отв. ред. В.П. Парначев, В.В. Зайков). Свердловск: УНЦ АН СССР, 35-46.
- Парначев В.П. (1988) Магматизм и осадконакопление в позднедокембрийской истории Южного Урала. Автореф. дисс. ... докт. геол.-мин. наук. Свердловск: ИГТ УрО АН СССР, 33 с.
- Подковыров В.Н., Гареев Э.З. (1995) Эволюция составов терригенных пород юрматинской серии рифея Южного Урала. *Геологическое изучение и использование недр.* Науч.-техн. информ. сб., вып. 1. М.: Геоинформмарк, 25-36.
- Пучков В.Н. (2010) Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 280 с.
- Пучков В.Н., Сергеева Н.Д., Ратов А.А. (2014) Отложения нижнего венда на Южном Урале: особенности состава и строения. *Геол. сб.*, (11), 22-36.
- Раабен М.Е. (1975) Верхний рифей как единица общей стратиграфической шкалы. М.: Наука, 248 с.
- Ронов А.Б., Хлебникова З.В. (1961) Химический состав важнейших генетических типов глин. *Геохимия*, (6), 449-469.
- Семихатов М.А., Кузнецов А.Б., Чумаков Н.М. (2015) Изотопный возраст границ общих стратиграфических подразделений верхнего протерозоя (рифей и венда) России: эволюция взглядов и современная оценка. *Стратиграфия. Геол. корреляция*, **23**(6), 16-27. <https://doi.org/10.7868/S0869592X15060083>
- Синицын В.М. (1967) Введение в палеоклиматологию. Л.: Недра, 232 с.
- Стратиграфический кодекс России. (2019) (Отв. ред. А.И. Жамойда). СПб.: ВСЕГЕИ, 96 с.
- Стратотип рифея. Стратиграфия. Геохронология. (1983) (Отв. ред. Б.М. Келлер, Н.М. Чумаков). М.: Наука, 184 с.
- Страхов Н.М. (1963) Типы литогенеза и их эволюция в истории Земли. М.: Госгеолтехиздат, 535 с.
- Сульман А.М., Демчук И.Г. (1978) Глинистые минералы в рифейских осадочных отложениях Башкирского мегантиклинория на Урале и их металлогения. (Отв. ред. Л.В. Анфимов, В.И. Козлов). Свердловск: УНЦ АН СССР, 16-24.
- Сульман А.М., Демчук И.Г., Петрищева В.Г. (1974) Новые данные о минеральном составе глинистых сланцев бакальской свиты на Южном Урале. *Тр. ИГТ УНЦ СССР*, вып. 122, 26-27.
- Шевелев А.И. (1997) Закономерности размещения и основы прогноза размещения магнетитовых месторождений. Дисс. ... докт. геол.-мин. наук. М.: ЦНИГРИ, 46 с.
- Широбокова Т.И. (1992) Стратиформное полиметаллическое и баритовое оруденение Урала. Свердловск: УрО РАН, 137 с.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П. (2000) Основы литохимии. СПб.: Наука, 479 с.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П., Рыбина Н.В. (2020) Геохимия фосфора. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 512 с.
- Ясаманов Н.А. (1985) Древние климаты Земли. Л.: Гидрометеиздат, 294 с.
- Algeo T.J., Li C. (2020) Redox classification and calibration of redox thresholds in sedimentary systems. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **287**, 8-26. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2020.01.055>
- Babechuk M.G., Widdowson M., Kamber B.S. (2014) Quantifying chemical weathering intensity and trace element release from two contrasting basalt profiles, Deccan Traps, India. *Chem. Geol.*, **363**, 56-75. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.10.027>
- Bartley J.K., Khan L.C., McWilliams J.L., Stagner A.F. (2007) Carbon isotope chemostratigraphy of the Middle Riphean type section (Avzyan Formation, Southern Urals, Russia): signal recovery in a fold-and-thrust belt. *Chem. Geol.*, **237**, 211-232. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.06.018>
- Cho T., Ohta T. (2022). A robust chemical weathering index for sediments containing authigenic and biogenic materials. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **608**, 111288. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2022.111288>
- Condie K.C. (1993) Chemical composition and evolution of the upper continental crust: Contrasting results from surface samples and shales. *Chem. Geol.*, **104**, 1-37. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(93\)90140-E](https://doi.org/10.1016/0009-2541(93)90140-E)
- Deng K., Yang S., Guo Y. (2022) A global temperature control of silicate weathering intensity. *Nat. Commun.*, **13**, 1781. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29415-0>
- Duzgoren-Aydin N.S., Aydin A., Malpas J. (2002) Reassessment of chemical weathering indices: case study of piroclastic rocks of Hong Kong. *Eng. Geol.*, **63**, 990-119. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00073-4](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00073-4)
- Fedo C.M., Nesbitt W.H., Young G.M. (1995) Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, **23**, 921-924. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)023<0921:UT EOPM>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023<0921:UT EOPM>2.3.CO;2)
- Garzanti E., Resentini A. (2016) Provenance control on chemical indices of weathering (Taiwan river sands). *Sediment. Geol.*, **336**, 81-95. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2015.06.013>
- Garzanti E., Padoan M., Setti M., López-Galindo A., Villa I.M. (2014) Provenance versus weathering control on the composition of tropical river mud (southern Africa). *Chem. Geol.*, **366**, 61-74. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.12.016>
- Garzanti E., Padoan M., Setti M., Peruta L., Najman Y., Villa I.M. (2013) Weathering geochemistry and Sr-Nd isotope fingerprinting of equatorial upper Nile and Congo muds. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **14**, 292-316. <https://doi.org/10.1002/ggge.20031>

- doi.org/10.1002/ggge.20060
- Gillot T., Cojan I., Badia D. (2022) Paleoclimate instabilities during late Oligocene – Early Miocene in SW Europe from new geochemical climofunctions based on soils with pedogenic carbonate. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **591**, 110882. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2022.110882>
- Golovanova I.V., Danukalov K.N., Salmanova R.Yu., Levashova N.M., Parfiriev N.P., Sergeeva N.D., Meert J.G. (2023) Magnetic field hyperactivity during the early Neoproterozoic: A paleomagnetic and cyclostratigraphic study of the Katav Formation, southern Urals, Russia. *Geosci. Front.*, **14**, 101558. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101558>
- Gonzalez-Alvarez I.J. (2005) Geochemical Study of the Mesoproterozoic Belt-Purcell Supergroup, Western North America: Implications for Provenance, Weathering and Diagenesis. PhD Dissertation. Saskatoon: University of Saskatchewan, 243 p. <https://hdl.handle.net/10388/etd-01032006-213130>
- Gonzalez-Alvarez I., Kerrich R. (2012) Weathering intensity in the Mesoproterozoic and modern large-river systems: A comparative study in the Belt-Purcell Supergroup, Canada and USA. *Precambrian Res.*, **208-211**, 174-196. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.04.008>
- Gwizd S., Fedo C., Grotzinger J., Banham S., Rivera-Hernandez F., Stack K.M., Siebach K., Thorpe M., Thompson L., O'Connell-Cooper C., Stein N., Edgar L., Gupta S., Rubin D., Sumner D., Vasavada A.R. (2022) Sedimentological and geochemical perspectives on a marginal lake environment recorded in the Hartmann's Valley and Karasburg members of the Murray formation, Gale crater, Mars. *J. Geophys. Res. Planets*, **127**, e2022JE007280. <https://doi.org/10.1029/2022JE007280>
- Harnois L. (1988) The CIW index: a new chemical index of weathering. *Sed. Geol.*, **55**(3-4), 319-322. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(88\)90137-6](https://doi.org/10.1016/0037-0738(88)90137-6)
- Köppen W. (1923) Die Klimate der Erde: Grundriss der Klimakunde. Berlin: Walter de Gruyter & Company, 379 p.
- Kuznetsov A.B., Bekker A., Ovchinnikova G.V., Gorokhov I.M., Vasilyeva I.M. (2017) 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.*, **298**, 157-173. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.06.011>
- Li C., Yang S. (2010). Is chemical index of alteration (CIA) a reliable proxy for chemical weathering in global drainage basins? *Amer. J. Sci.*, **310**, 111-127. <https://doi.org/10.2475/02.2010.03>
- Li Z.-X., Liu Y., Ernst R. (2023) A dynamic 2000–540 Ma Earth history: From cratonic amalgamation to the age of supercontinent cycle. *Earth-Sci. Rev.*, **238**, 104336. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104336>
- McLennan S.M. (1993) Weathering and Global Denudation. *J. Geol.*, **101**, 295-303. <https://doi.org/10.1086/648222>
- Meunier A. (1980) Les mécanismes de l'altération des granites et le rôle des microsystemes: étude des arènes du massif granitique de Parthenay (Deux-Sèvres). *Memoir. Soc. Géol. France*, **140**, 1-80.
- Meunier A., Caner L., Hubert F., El Albani A., Pret D. (2013). The weathering intensity scale (WIS): An alternative approach of the Chemical Index of Alteration (CIA). *Amer. J. Sci.*, **313**, 113-143. <https://doi.org/10.2475/02.2013.03>
- Nesbitt H.W., Young G.M. (1982) Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, **299**, 715-717. <https://doi.org/10.1038/299715a0>
- Nesbitt H.W., Young G.M. (1984) Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **48**, 1523-1534. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(84\)90408-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90408-3)
- Nesbitt H.W., Fedo C.M., Young G.M. (1997) Quartz and Feldspar Stability, Steady and Non-Steady-State Weathering, and Petrogenesis of Siliciclastic Sands and Muds. *J. Geol.*, **105**, 173-192. <https://doi.org/10.1086/515908>
- Ohta T., Arai H. (2007). Statistical empirical index of chemical weathering in igneous rocks: A new tool for evaluating the degree of weathering. *Chem. Geol.*, **240**, 280-297. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.02.017>
- Parker A. (1970) An index of weathering for silicate rocks. *Geol. Mag.*, **107**, 501-504. <https://doi.org/10.1017/S0016756800058581>
- Penman D.E., Caves Rugenstein J.K., Ibarra D.E., Winnick M.J. (2020) Silicate weathering as a feedback and forcing in Earth's climate and carbon cycle. *Earth-Sci. Rev.*, **209**, 103298. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103298>
- Perri F. (2020) Chemical weathering of crystalline rocks in contrasting climatic conditions using geochemical proxies: An overview. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **556**, 109873. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2020.109873>
- Quan C., Han S., Utescher T., Zhang C., Liu Y.-S. (2013) Validation of temperature–precipitation based aridity index: paleoclimatic implications. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **386**, 86-95. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2013.05.008>
- Retallack G.J. (1986a) Editors preface to special issue on Precambrian paleopedology. *Precambrian Res.*, **32**, 95-96.
- Retallack G.J. (1986b) Reappraisal of a 2200 Ma-old paleosol from near Waterval Onder, South Africa. *Precambrian Res.*, **32**, 195-232. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(86\)90007-0](https://doi.org/10.1016/0301-9268(86)90007-0)
- Retallack G.J. (2005) Pedogenic carbonate proxies for amount and seasonality of precipitation in paleosols. *Geology*, **33**(4), 333-336. <https://doi.org/10.1130/G21263.1>
- Retallack G.J., Grandstaff D., Kimberley M. (1984) The promise and problems of Precambrian paleosols. *Episodes*, **7**, 8-12. <https://doi.org/10.18814/epiugs/1984/v7i2/003>
- Rudnick R.L., Gao S. (2014) Composition of the Continental Crust. *Treatise on Geochemistry*. (Ed. by H.D. Holland, K.K. Turekian). Oxford, Elsevier, 1-51. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6>
- Ruxton B.P. (1968) Measures of the Degree of Chemical Weathering of Rocks. *J. Geol.*, **76**, 518-527.
- Sheldon N.D., Retallack G.J., Tanaka S. (2002) Geochemical Climofunctions from North American Soils and Application to Paleosols across the Eocene-Oligocene Boundary in Oregon. *J. Geol.*, **110**, 687-696. <https://doi.org/10.1086/342865>
- Taylor S.R., McLennan S.M. (1985) The Continental Crust: Its Composition and Evolution: an Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks. Oxford: Blackwell, 312 p.

- Turgeon S., Brumsack H.-J. (2006) Anoxic vs dysoxic events reflected in sediment geochemistry during the Cenomanian–Turonian Boundary Event (Cretaceous) in the Umbria–Marche basin of central Italy. *Chem. Geol.*, **234**, 321–339. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.05.008>
- Van de Kamp P.C. (2016) Potassium Distribution and Metasomatism in Pelites and Schists: How and When, Relation to Postdepositional Events. *J. Sed. Res.*, **86**, 683–711. <https://doi.org/10.2110/jsr.2016.44>
- White A.F., Blum A.E., Schultz M.S., Huntington T.G., Peters N.E., Stonestrom D. (2002) Chemical weathering of the Panola Granite: Solute and regolith elemental fluxes and the weathering rate of biotite. *Water-Rock Interactions, Ore deposits and Environmental geochemistry: A tribute to David Crerar: Geol. Soc. Spec. Publ.*, (7), 37–59.
- Yang J., Cawood P.A., Du Y., Feng B., Yan J. (2014) Global continental weathering trends across the Early Permian glacial to postglacial transition: Correlating high- and low-paleolatitude sedimentary records. *Geology*, **42**, 835–838. <https://doi.org/10.1130/G35892.1>
- Yang J., Cawood P.A., Du Y., Li W., Yan J. (2016) Reconstructing Early Permian tropical climates from chemical weathering indices. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **128**, 739–751. <https://doi.org/10.1130/B31371.1>
- Zhang L., Wang C., Li X., Cao K., Song Y., Hu B., Lu D., Wang Q., Du X., Cao S. (2016) A new paleoclimate classification for deep time. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **443**, 98–106. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2015.11.041>
- roclastic rocks of Hong Kong. *Eng. Geol.*, **63**, 990–119. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00073-4](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00073-4)
- Fedo C.M., Nesbitt W.H., Young G.M. (1995) Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, **23**, 921–924. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)023<0921:UT EOPM>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023<0921:UT EOPM>2.3.CO;2)
- Gareev E.Z. (1982) Geochemical features of the carbonate rocks in the Riphean Uk and Katav Formations key sections in the Southern Urals. *Upper Precambrian and Paleozoic in the Southern Urals*. (Ed. by M.A. Garriss). Ufa, BFAN SSSR, 36–46. (In Russ.)
- Gareev E.Z. (1987) Conditions for the formation of Zilmerdak deposits according to geochemical data using the example of a stratotype section along the river. Maly Inzer (Southern Urals). *Geochemistry of sedimentary formations of the Urals*. (Ed. by L.V. Anfimov, M.T. Krupenin). Sverdlovsk, UNTs AN SSSR, 29–36. (In Russ.)
- Gareev E.Z. (1988) Geochemical features and sedimentation conditions of deposits of the Inzer Formation in the stratotype section in the Southern Urals. *Upper Precambrian of the Southern Urals and eastern Russian Plate*. (Ed. by V.I. Kozlov). Ufa, BFAN SSSR, 29–35. (In Russ.)
- Gareev E.Z. (1989) Geochemistry of sedimentary rocks in the Riphean stratotype section: Ex. Abstr. Ph. D. (Geol.-mineral.). Moscow, GEOKHI, 24 p. (In Russ.)
- Gareev E.Z., Veretennikova T.Yu. (1987) Petrochemistry and geochemistry of the muddy-carbonate rocks in the Avzyan Formation stratotype section in the Southern Urals. *Trace elements in magmatic, metamorphic and ore bearing strata in the Urals*. (Ed. by D.N. Salikhov). Ufa, BFAN SSSR, 61–68. (In Russ.)
- Garzanti E., Resentini A. (2016) Provenance control on chemical indices of weathering (Taiwan river sands). *Sediment. Geol.*, **336**, 81–95. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2015.06.013>
- Garzanti E., Padoan M., Setti M., López-Galindo A., Villa I.M. (2014) Provenance versus weathering control on the composition of tropical river mud (southern Africa). *Chem. Geol.*, **366**, 61–74. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.12.016>
- Garzanti E., Padoan M., Setti M., Peruta L., Najman Y., Villa I.M. (2013) Weathering geochemistry and Sr-Nd isotope fingerprinting of equatorial upper Nile and Congo muds. *Geochim. Geophys. Geosyst.*, **14**, 292–316. <https://doi.org/10.1002/ggge.20060>
- Genetic types, distribution patterns and brucite and magnesite discovery estimation. (1984) (Ed. by V.P. Petrov). Moscow, Nauka Publ., 317 p. (In Russ.)
- Gillot T., Cojan I., Badia D. (2022) Paleoclimate instabilities during late Oligocene – Early Miocene in SW Europe from new geochemical climofunctions based on soils with pedogenic carbonate. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **591**, 110882. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2022.110882>
- Golbert A.V. (1987) Regional paleoclimatology basics. Moscow, Nedra Publ., 221 p. (In Russ.)
- Golovanova I.V., Danukalov K.N., Salmanova R.Yu., Levashova N.M., Parfiriev N.P., Sergeeva N.D., Meert J.G. (2023) Magnetic field hyperactivity during the early Neoproterozoic: A paleomagnetic and cyclostratigraphic study of the Katav Formation, southern Urals, Russia. *Geosci. Front.*, **14**, 101558. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101558>

REFERENCES

- Algeo T.J., Li C. (2020) Redox classification and calibration of redox thresholds in sedimentary systems. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **287**, 8–26. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2020.01.055>
- Anfimov L.V. (1997) Lithogenesis in the Riphean sedimentary strata of the Bashkir meganticlinorium (Southern Urals). Ekaterinburg, UrO RAN, 288 p. (In Russ.)
- Babechuk M.G., Widdowson M., Kamber B.S. (2014) Quantifying chemical weathering intensity and trace element release from two contrasting basalt profiles, Deccan Traps, India. *Chem. Geol.*, **363**, 56–75. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.10.027>
- Bartley J.K., Khan L.C., McWilliams J.L., Stagner A.F. (2007) Carbon isotope chemostratigraphy of the Middle Riphean type section (Avzyan Formation, Southern Urals, Russia): signal recovery in a fold-and-thrust belt. *Chem. Geol.*, **237**, 211–232. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.06.018>
- Cho T., Ohta T. (2022) A robust chemical weathering index for sediments containing authigenic and biogenic materials. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **608**, 111288. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2022.111288>
- Condie K.C. (1993) Chemical composition and evolution of the upper continental crust: Contrasting results from surface samples and shales. *Chem. Geol.*, **104**, 1–37. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(93\)90140-E](https://doi.org/10.1016/0009-2541(93)90140-E)
- Deng K., Yang S., Guo Y. (2022) A global temperature control of silicate weathering intensity. *Nat. Commun.*, **13**, 1781. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29415-0>
- Duzgoren-Aydin N.S., Aydin A., Malpas J. (2002) Reassessment of chemical weathering indices: case study of pi-

- doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101558
- Gonzalez-Alvarez I.J. (2005) Geochemical Study of the Mesoproterozoic Belt-Purcell Supergroup, Western North America: Implications for Provenance, Weathering and Diagenesis. PhD Dissertation. Saskatoon, University of Saskatchewan, 243 p. <https://hdl.handle.net/10388/etd-01032006-213130>
- Gonzalez-Alvarez I., Kerrich R. (2012) Weathering intensity in the Mesoproterozoic and modern large-river systems: A comparative study in the Belt-Purcell Supergroup, Canada and USA. *Precambrian Res.*, **208-211**, 174-196. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.04.008>
- Gorokhov I.M., Zaitseva T.S., Kuznetsov A.B., Ovchinnikova G.V., Kovach V.P., Konstantinova G.V., Turchenko T.L., Vasil'eva I.M., Arakelyants M.M. (2019) Isotope systematics and age of authigenic minerals in shales of the Upper Riphean Inzer Formation, South Urals. *Stratigr. Geol. Correl.*, **27**(2), 133-158 (translated from *Stratigr. Geol. Korrel.*, **27**(2), 3-30). <https://doi.org/10.1134/S0869593819020035>
- Gorozhanin V.M., Michurin S.V., Voikina Z.A., Sharipova A.A., Biktimerova Z.R., Sultanova A.G. (2019) Marino-glacial deposits in the Tolparovo section of the Upper Precambrian (Zilim and Malyi Tolpar rivers). *Geol. Vestn.*, (3), 69-92. (In Russ.) <https://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-3-6>
- Gwizd S., Fedo C., Grotzinger J., Banham S., Rivera-Hernandez F., Stack K.M., Siebach K., Thorpe M., Thompson L., O'Connell-Cooper C., Stein N., Edgar L., Gupta S., Rubin D., Sumner D., Vasavada A.R. (2022) Sedimentological and geochemical perspectives on a marginal lake environment recorded in the Hartmann's Valley and Karasburg members of the Murray formation, Gale crater, Mars. *J. Geophys. Res. Planets*, **127**, e2022JE007280. <https://doi.org/10.1029/2022JE007280>
- Harnois L. (1988) The CIW index: a new chemical index of weathering. *Sed. Geol.*, **55**(3-4), 319-322. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(88\)90137-6](https://doi.org/10.1016/0037-0738(88)90137-6)
- Kagarmannova N.I. (1998) Riphean Bashkirian meganticlinorium mudrocks. Ekaterinburg, IGG UrO RAN, 158 p. (In Russ.)
- Karpova G.V., Timofeeva Z.V. (1975) Lithogenesis and stages of change in Riphean deposits of the Southern Urals. *Litol. Polez. Iskop.*, (2), 45-55. (In Russ.)
- Keller B.M., Weiss A.F., Gorozhanin V.M. (1984) Tolparovsky section of the Upper Precambrian (Southern Urals). *Izv. AN SSSR. Ser. Geol.*, (9), 119-124. (In Russ.)
- Köppen W. (1923) Die Klimate der Erde: Grundriss der Klimakunde. Berlin, Walter de Gruyter & Company, 379 p. (In German)
- Kovalev S.G., Maslov A.V., Kovalev S.S., Vysotskii S.I. (2019) New data on the Sm-Nd age of picrites in the Lysogorsk complex, Southern Urals. *Dokl. Earth Sci.*, **488**(1), 1018-1021 (translated from *Dokl. RAN*, **488**(1), 595-598). <https://doi.org/10.1134/S1028334X19090034>
- Krasnobaev A.A., Kozlov V.I., Puchkov V.N., Busharina S.V., Sergeeva N.D., Paderin I.P. (2013b) Zircon geochronology of the Mashak volcanic rocks and the problem of the age of the Lower-Middle Riphean boundary (Southern Urals). *Stratigr. Geol. Correl.*, **21**(5), 465-481 (translated from *Stratigr. Geol. Korrel.*, **21**(5), 3-20). <https://doi.org/10.1134/S0869593813050055>
- Krasnobaev A.A., Kozlov V.I., Puchkov V.N., Sergeeva N.D., Busharina S.V., Lepekhina E.N. (2013a) Zirconology of Navysh volcanic rocks of the Ai suite and the problem of the age of the Lower Riphean boundary in the Southern Urals. *Dokl. Earth Sci.*, **448**(2), 185-190 (translated from *Dokl. RAN*, **448**(4), 437-442). <https://doi.org/10.1134/S1028334X13020050>
- Krupenin M.T. (1999) Rock formation environments of the Lower Riphean siderite-bearing Bakal Formation. Ekaterinburg, UrO RAN, 257 p. (In Russ.)
- Krupenin M.T., Larionov N.N., Gulyaeva T.Ya., Demchuk I.G. (2002) New data on the features of sedimentation in the basins of the Avzyan time of the Middle Riphean. *Tr. IGG UrO RAN*, vyp. 149, 43-49. (In Russ.)
- Kuznetsov A.B., Bekker A., Ovchinnikova G.V., Gorokhov I.M., Vasilyeva I.M. (2017) 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.*, **298**, 157-173. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.06.011>
- Kuznetsov A.B., Ovchinnikova G.V., Gorokhov I.M., Kaurova O.K., Krupenin M.T., Maslov A.V. (2003) Sr isotope characteristics and Pb-Pb age of limestones of the Bakal Formation (type section of the Lower Riphean, Southern Urals). *Dokl. RAN*, **391**(6), 794-798. (In Russ.)
- Kuznetsov A.B., Ovchinnikova G.V., Semikhatov M.A., Gorokhov I.M., Kaurova O.K., Krupenin M.T., Vasil'eva I.M., Gorokhovskii B.M., Maslov A.V. (2008) The Sr isotopic characterization and Pb-Pb age of carbonate rocks from the Satka Formation, the Lower Riphean Burzyan Group of the Southern Urals. *Stratigr. Geol. Correl.*, **16**(2), 120-137 (translated from *Stratigr. Geol. Korrel.*, **16**(2), 16-34). <https://doi.org/10.1134/S0869593808020020>
- Li C., Yang S. (2010). Is chemical index of alteration (CIA) a reliable proxy for chemical weathering in global drainage basins? *Amer. J. Sci.*, **310**, 111-127. <https://doi.org/10.2475/02.2010.03>
- Li Z.-X., Liu Y., Ernst R. (2023) A dynamic 2000–540 Ma Earth history: From cratonic amalgamation to the age of supercontinent cycle. *Earth-Sci. Rev.*, **238**, 104336. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104336>
- Map of Precambrian formations of the Russian Platform and its folded framing (with removed Phanerozoic sediments). (1983) Scale 1 : 2 500 000. Explanatory note. Leningrad, VSEGEI, 172 p. (In Russ.)
- Maslov A.V. (1988) Lithology of the Upper Riphean deposits of the Bashkir meganticlinorium. Moscow, Nauka Publ., 133 p. (In Russ.)
- Maslov A.V. (2000) Some Specific Features of Early Vendian Sedimentation in the Southern and Middle Urals. *Lithol. Miner. Res.*, **35**(6), 556-570. (translated from *Litol. Polez. Iskop.*, (6), 624-639). <https://doi.org/10.1023/A:1026649531983>
- Maslov A.V. (2014) Lithogeochemical image of the Vendian Asha Series on the Southern Urals western slope. *Lithosphere (Russia)*, (1), 13-32. (In Russ.)
- Maslov A.V. (2025) α AIE indices of Riphean clay rocks of the Southern Urals and weathering features (first attempt at analysis). *Lithosphere (Russia)*, **25**(1), 96-113. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-1-96-113>
- Maslov A.V., Gareev E.Z. (1988) Lithological and geochemical features of the Upper Riphean deposits of the Bashkir meganticlinorium in the Southern Urals. *Sov. Geol.*, (2), 57-66. (In Russ.)

- Maslov A.V., Gareev E.Z. (1999) Petrochemical features of Late Precambrian sedimentary associations of the Bashkir meganticlinorium. *Litol. Polez. Iskop.*, (1), 78-91. (In Russ.)
- Maslov A.V., Gorozhanin V.M. (1998) Lower Uk level of the Late Riphean in the stratotype area: paleogeographic and sedimentary environment parameter features. *Tr. IGG UNTs AN SSSR*, vyp. 145, 15-20. (In Russ.)
- Maslov A.V., Podkovyrov V.N. (2023a) Chemical Weathering Indexes: Implication for Paleoclimatic Reconstructions, with the Vendian–Lower Cambrian Section of Podolian Transnistria as Example. *Lithol. Miner. Res.*, **58**(3), 213-234 (translated from *Litol. Polez. Iskop.*, (3), 249-273). <https://doi.org/10.1134/S0024490222700043>
- Maslov A.V., Podkovyrov V.N. (2023b) Intensity of Chemical Weathering in the Late Precambrian: New Data on the Riphean Stratotype, South Urals. *Stratigr. Geol. Korrel.*, **31**(1), 1-16 (translated from *Stratigr. Geol. Korrel.*, **31**(2), 3-21). <https://doi.org/10.1134/S0869593823020065>
- Maslov A.V., Grazhdankin D.V., Goj Yu.Yu. (2013) Primitive paleosols in South Urals Zilmerdak Formation (structural and lithogeochemical aspects). *Lithosphere (Russia)*, (2), 45-64. (In Russ.)
- Maslov A.V., Krupenin M.T., Gareev E.Z. (2003) Lithological, lithochemical and geochemical indicators of paleoclimate (using the example of the Riphean of the Southern Urals). *Litol. Polez. Iskop.*, (5), 427-446. (In Russ.)
- Maslov A.V., Gareev E.Z., Krupenin M.T., Demchuk I.G. (1999) Thin-grained aluminosiliconclastics in the Upper Precambrian section of the Bashkir meganticlinorium (towards the reconstruction of formation conditions). Ekaterinburg, IGG UrO RAN, 324 p. (In Russ.)
- Maslov A.V., Krupenin M.T., Gareev E.Z., Anfimov L.V. (2001) Riphean of the western slope of the Southern Urals (classical sections, sedimentation and lithogenesis, mineralogy, geological natural monuments). Ekaterinburg, IGG UrO RAN, V. I, 351 p.; V. II, 134 p.; V. III, 130 p.; V. IV, 103 p. (In Russ.)
- Maslov A.V., Podkovyrov V.N., Gareev E.Z., Graunov O.V. (2016) Paleoclimate changes in the Late Precambrian: evidence from the Upper Precambrian section of the South Urals. *Lithol. Miner. Res.*, **51**(2), 117-135 (translated from *Litol. Polez. Iskop.*, (2), 129-149). <https://doi.org/10.1134/S002449021602005X>
- Maslov A.V., Melnichuk O.Yu., Kuznetsov A.B., Podkovyrov V.N. (2024) Lithogeochemistry of upper Precambrian terrigenous rocks of Belarus. Communication 2. Provenance, paleogeodynamics, paleogeography, paleoclimate. *Litol. Polez. Iskop.*, (5), 515-543. <https://doi.org/10.31857/S0024497X2405001>
- Maslov A.V., Erokhin Y.V., Gerdes A., Ronkin Y.L., Ivanov K.S. (2018) First results of U-Pb LA-ICP-MS isotope dating of detrital zircons from arkose sandstone of the Biryán subformation of Zilmerdak formation (Upper Riphean, South Urals). *Dokl. Earth Sci.*, **482**(2), 1275-1277 (translated from *Dokl. RAN*, **482**(5), 558-561). <https://doi.org/10.1134/S1028334X18100136>
- Maslov A.V., Kuznetsov A.B., Kramchaninov A.Y., Shpakovich L.V., Gareev E.Z., Podkovyrov V.N., Kovalev S.G. (2022) Provenances of the Upper Precambrian clay rocks in the Southern Urals: results of geochemical and Sm-Nd isotope geochemical investigations. *Stratigr. Geol. Korrel.*, **30**(1), 30-51 (translated from *Stratigr. Geol. Korrel.*, **30**(1), 33-54). <https://doi.org/10.1134/S0869593822010038>
- McLennan S.M. (1993) Weathering and Global Denudation. *J. Geol.*, **101**, 295-303. <https://doi.org/10.1086/648222>
- Melezhik V.A., Predovsky A.A. (1982) Early Proterozoic diagenesis geochemistry (by the example in the Baltic shield north-east). Leningrad, Nauka Publ., 208 p. (In Russ.)
- Meunier A. (1980) Les mécanismes de l'altération des granites et le rôle des microsystèmes: étude des arènes du massif granitique de Parthenay (Deux-Sèvres). *Memoir. Soc. Géol. France*, **140**, 1-80. (In French)
- Meunier A., Caner L., Hubert F., El Albani A., Pret D. (2013). The weathering intensity scale (WIS): An alternative approach of the Chemical Index of Alteration (CIA). *Amer. J. Sci.*, **313**, 113-143. <https://doi.org/10.2475/02.2013.03>
- Negrutsa T.F. (1985) About possibility to Precambrian paleoclimate reconstruction. *Modern paleoclimatology and sedimentology struggles*. (Ed. by N.N. Verzhiln). Leningrad, LGU, 69-85. (In Russ.)
- Negrutsa T.F., Negrutsa V.Z. (2000) Lithogenetical assemblages and their signification for the Precambrian paleoclimate reconstruction. *Sedimentology, geochemistry and ore genesis struggles in the sedimentary process framework. V. 2*. Moscow, GEOS Publ., 66-70. (In Russ.)
- Nesbitt H.W., Young G.M. (1982) Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, **299**, 715-717. <https://doi.org/10.1038/299715a0>
- Nesbitt H.W., Young G.M. (1984) Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **48**, 1523-1534. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(84\)90408-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90408-3)
- Nesbitt H.W., Fedo C.M., Young G.M. (1997) Quartz and Feldspar Stability, Steady and Non-Steady-State Weathering, and Petrogenesis of Siliciclastic Sands and Muds. *J. Geol.*, **105**, 173-192. <https://doi.org/10.1086/515908>
- Ohta T., Arai H. (2007). Statistical empirical index of chemical weathering in igneous rocks: A new tool for evaluating the degree of weathering. *Chem. Geol.*, **240**, 280-297. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.02.017>
- Ovchinnikova G.V., Kuznetsov A.B., Vasil'eva I.M., Gorokhov I.M., Krupenin M.T., Gorokhovskii B.M., Maslov A.V. (2013) Pb-Pb age and sr isotopic characteristic of the Middle Riphean phosphorite concretions: the Zigaza-Komarovo formation of the South Urals. *Dokl. Earth Sci.*, **451**(2), 798-802 (translated from *Dokl. RAN*, **451**(4), 430-434). <https://doi.org/10.1134/S1028334X13080047>
- Paleoclimate reconstruction methodics. (1985) (Ed. by A.A. Velichko). Moscow, Nauka Publ., 188 p. (In Russ.)
- Parker A. (1970) An index of weathering for silicate rocks. *Geol. Mag.*, **107**, 501-504. <https://doi.org/10.1017/S0016756800058581>
- Parnachev V.P. (1987) Fluorine and chlorine in Late Precambrian sedimentary rocks of the Bashkir meganticlinorium in connection with issues of their sedimentation. *Geochemistry of volcanic and sedimentary rocks of the Southern Urals*. (Ed. by V.P. Parnachev, V.V. Zaiakov). Sverdlovsk, UNTs AN SSSR, 35-46. (In Russ.)
- Parnachev V.P. (1988) Magmatism and sedimentation in the Late Precambrian history of the Southern Urals. Ex. Abstr. Dokt. geol. and min. sci. diss. Sverdlovsk, IGG UrO

- RAN, 33 p. (In Russ.)
- Penman D.E., Caves Rugenstein J.K., Ibarra D.E., Winnick M.J. (2020) Silicate weathering as a feedback and forcing in Earth's climate and carbon cycle. *Earth-Sci. Rev.*, **209**, 103298. <https://doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2020.103298>
- Perri F. (2020) Chemical weathering of crystalline rocks in contrasting climatic conditions using geochemical proxies: An overview. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **556**, 109873. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2020.109873>
- Podkovyrov V.N., Gareev E.Z. (1995) Evolution of the composition of terrigenous rocks of the Yurmatinsky series of the Riphean of the Southern Urals. *Geological study and use of subsoil. Scientific and technical information Ser. V. 1*. Moscow, Geoinformmark Publ., 25-36. (In Russ.)
- Puchkov V.N. (2010) Geology of the Urals and Cis-Urals (actual problems of stratigraphy, tectonics, geodynamics and metallogeny). Ufa, DesignPoligraphService Publ., 280 p. (In Russ.)
- Puchkov V.N., Sergeeva N.D., Ratov A.A. (2014) The Lower Vendian in the Southern Urals: peculiarities of a composition and structure. *Geol. sb.*, (11), 22-36. (In Russ.)
- Quan C., Han S., Utescher T., Zhang C., Liu Y.-S. (2013) Validation of temperature-precipitation based aridity index: paleoclimatic implications. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **386**, 86-95. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2013.05.008>
- Raaben M.E. (1975) Upper Riphean as GSSP part. Moscow, Nauka Publ., 248 p. (In Russ.)
- Retallack G.J. (1986a) Editors preface to special issue on Precambrian paleopedology. *Precambrian Res.*, **32**, 95-96.
- Retallack G.J. (1986b) Reappraisal of a 2200 Ma-old paleosol from near Waterval Onder, South Africa. *Precambrian Res.*, **32**, 195-232. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(86\)90007-0](https://doi.org/10.1016/0301-9268(86)90007-0)
- Retallack G.J. (2005) Pedogenic carbonate proxies for amount and seasonality of precipitation in paleosols. *Geology*, **33**(4), 333-336. <https://doi.org/10.1130/G21263.1>
- Retallack G.J., Grandstaff D., Kimberley M. (1984) The promise and problems of Precambrian paleosols. *Episodes*, **7**, 8-12. <https://doi.org/10.18814/epiugs/1984/v7i2/003>
- Riphean stratotype. Stratigraphy. Geochronology. (1983) (Ed. by B.M. Keller, N.M. Chumakov). Moscow, Nauka Publ., 184 p. (In Russ.)
- Ronov A.B., Khlebnikova Z.V. (1961) Chemical composition of the prime clay genetic types. *Geokhimiya*, (6), 449-469. (In Russ.)
- Rudnick R.L., Gao S. (2014) Composition of the Continental Crust. *Treatise on Geochemistry*. (Ed. by H.D. Holland, K.K. Turekian). Oxford, Elsevier, 1-51. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6>
- Ruxton B.P. (1968) Measures of the Degree of Chemical Weathering of Rocks. *J. Geol.*, **76**, 518-527.
- Semikhatov M.A., Chumakov N.M., Kuznetsov A.B. (2015) Isotope age of boundaries between the general stratigraphic subdivisions of the Upper Proterozoic (Riphean and Vendian) in Russia: the evolution of opinions and the current estimate. *Stratigr. Geol. Correl.*, **23**(6), 568-579 (translated from *Stratigr. Geol. Korrel.*, **23**(6), 16-27). <https://doi.org/10.1134/S0869593815060088>
- Sheldon N.D., Retallack G.J., Tanaka S. (2002) Geochemical Climofunctions from North American Soils and Application to Paleosols across the Eocene-Oligocene Boundary in Oregon. *J. Geol.*, **110**, 687-696. <https://doi.org/10.1086/342865>
- Shevelev A.I. (1997) Magnesite discovery distribution patterns and estimation basics. Dokt. geol. and min. sci. diss. Moscow, TsNIGRI, 45 p. (In Russ.)
- Shirobokova T.I. (1992) Stratiform polymetallic and barite mineralization of the Urals. Sverdlovsk, UrO RAN, 137 p. (In Russ.)
- Sinityn V.M. (1967) Paleoclimatology introduction. Leningrad, Nedra Publ., 232 p. (In Russ.)
- Strakhov N.M. (1963) Diagenesis types and their evolution through Earth's history. Moscow, Gosgeolizdat Publ., 535 p. (In Russ.)
- Stratigraphic Code of Russia. (2019) (Ed. by A.I. Zhamoïda). St.Petersburg, VSEGEI, 96 p. (In Russ.)
- Sul'man A.M., Demchuk I.G. (1978) Clay minerals in Riphean sedimentary deposits of the Bashkir meganticlinorium. *Precambrian strata of the Bashkir meganticlinorium in the Urals and their metallogeny*. (Ed. by L.V. Anfimov, V.I. Kozlov). Sverdlovsk, UNTs AN SSSR, 16-24. (In Russ.)
- Sul'man A.M., Demchuk I.G., Petrishcheva V.G. (1974) New data on the mineral composition of clay shales of the Bakal Formation in the Southern Urals. *Tr. IGG UNTs AN SSSR*, vyp. 122, 26-27. (In Russ.)
- Taylor S.R., McLennan S.M. (1985) The Continental Crust: Its Composition and Evolution: an Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks. Oxford, Blackwell, 312 p.
- Turgeon S., Brumsack H.-J. (2006) Anoxic vs dysoxic events reflected in sediment geochemistry during the Cenomanian-Turonian Boundary Event (Cretaceous) in the Umbria-Marche basin of central Italy. *Chem. Geol.*, **234**, 321-339. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.05.008>
- Van de Kamp P.C. (2016) Potassium Distribution and Metasomatism in Pelites and Schists: How and When, Relation to Postdepositional Events. *J. Sed. Res.*, **86**, 683-711. <https://doi.org/10.2110/jsr.2016.44>
- White A.F., Blum A.E., Schultz M.S., Huntington T.G., Peters N.E., Stonestrom D. (2002) Chemical weathering of the Panola Granite: Solute and regolith elemental fluxes and the weathering rate of biotite. *Water-Rock Interactions, Ore deposits and Environmental geochemistry: A tribute to David Crerar: Geol. Soc. Spec. Publ.*, (7), 37-59.
- Yang J., Cawood P.A., Du Y., Feng B., Yan J. (2014) Global continental weathering trends across the Early Permian glacial to postglacial transition: Correlating high- and low-paleolatitude sedimentary records. *Geology*, **42**, 835-838. <https://doi.org/10.1130/G35892.1>
- Yang J., Cawood P.A., Du Y., Li W., Yan J. (2016) Reconstructing Early Permian tropical climates from chemical weathering indices. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **128**, 739-751. <https://doi.org/10.1130/B31371.1>
- Yasamanov N.A. (1985) Earth's ancient climates. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 294 p. (In Russ.)
- Yudovich Ya.E., Ketris M.P. (2000) Fundamentals of lithochemistry. St.Petersburg, Nauka Publ., 479 p. (In Russ.)
- Yudovich Ya.E., Ketris M.P., Rybina N.V. (2020) Phospho-

- rous geochemistry. Syktyvkar, GI Komi NTs UrO RAN, 512 p. (In Russ.)
- Zaitseva T.S., Gorokhov I.M., Ivanovskaya T.A., Semikhatov M.A., Kuznetsov A.B., Mel'nikov N.N., Arakelyants M.M., Yakovleva O.V. (2008) Mössbauer characteristics, mineralogy and isotopic age (Rb-Sr, K-Ar) of Upper Riphean glauconites from the Uk formation, the Southern Urals. *Stratigr. Geol. Correl.*, **16**(3), 227-247 (translated from *Stratigr. Geol. Korrel.*, **16**(3), 3-25). <https://doi.org/10.1134/S0869593808030015>
- Zaitseva T.S., Kuznetsov A.B., Adamskaya E.V., Plotkina Y.V., Sergeeva N.D. (2022) The U-Th-Pb age of detrital zircons from oolitic limestones of the Uk formation: traces of the grenville provenance areas in the Late Riphean of the Southern Urals. *Dokl. Earth Sci.*, **503**(2), 143-149 (translated from *Dokl. RAN. Nauki o Zemle*, **503**(2), 90-96). <https://doi.org/10.1134/S1028334X22040195>
- Zaitseva T.S., Kuznetsov A.B., Gorokhov I.M., Konstantinova G.V., Gorozhanin V.M., Ivanovskaya T.A. (2019) The lower boundary of the Vendian in the Southern Urals as evidenced by the Rb-Sr age of glauconites of the Bakkevo formation. *Stratigr. Geol. Correl.*, **27**(5), 573-587 (translated from *Stratigr. Geol. Korrel.*, **27**(5), 82-96). <https://doi.org/10.1134/S0869593819050083>
- Zhang L., Wang C., Li X., Cao K., Song Y., Hu B., Lu D., Wang Q., Du X., Cao S. (2016) A new paleoclimate classification for deep time. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **443**, 98-106. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2015.11.041>