УДК 551.7

НА ПУТИ К ЯРУСНОМУ РАСЧЛЕНЕНИЮ ВЕНДА Д.В. Гражданкин, Д.О. Александров, В.О. Максименко, В.И. Рогов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

Путь к ярусному расчленению венда должен лежать через составление полного сводного геологического разреза этого отрезка земной коры – последовательности геологических тел, каждое из которых отражает определенное состояние экосистем. В качестве основы ярусной шкалы венда предлагается использовать сводный разрез венда Сибирской платформы, представляющий собой последовательность геологических тел регионального и субглобального масштаба, каждое из них отражает определенное состояние либо однонаправленное изменение геосистемы, обусловленные периодическим проникновением на шельф обстановок, относительно насыщенных кислородом, в перерывах между широкомасштабными океанскими событиями аноксии и эвксинизации. Вариации окислительно-восстановительных условий должны были сопровождаться переменной доступностью питательных веществ, что не могло не сказаться на общем характере макроэволюционных и макроэкологических процессов. Геологическая летопись венда Сибирской платформы также свидетельствует о периодическом ощелачивании Мирового океана. В сводном разрезе венда Сибирской платформы различаются, по крайней мере, пять таких событий, с которыми связывается ощелачивание. Предлагается гипотеза, согласно которой событийное ощелачивание могло стать причиной наблюдаемой периодичности в появлении и исчезновении специфических осадочных текстур в карбонатных отложениях, дискретного характера раннедиагенетической цементации алюмосиликокластических осадков и фоссилизации остатков мягкотелых организмов в венде.

Венд, хроностратиграфия, ощелачивание, хемостратиграфия, Сибирская платформа

TOWARDS STAGE SUBDIVISION OF THE VENDIAN

D.V. Grazhdankin, D.O. Aleksandrov, V.O. Maksimenko, V.I. Rogov

The way towards the stage subdivision of the Vendian starts with the assemblage of a complete composite geological section of this interval of the Earth's history, a succession of geological bodies each reflecting a certain ecosystem state. A Vendian composite section of the Siberian Platform, which is a succession of regional to sub-global scale geological bodies reflecting particular states or unidirectional transformations determined by episodic expansion of relatively oxygen-rich environments onto the shelf and alternating with large-scale oceanic anoxia and euxinia events is proposed as a reference for constructing the stage subdivision of the Vendian. The redox instability had to be accompanied by changes in nutrient availability and could not but affect the course of macroevolution and macroecology. The geological record of the Vendian of the Siberian Platform is also marked by episodic increase in alkalinity of the World Ocean. At least five such alkalinity events could be provisionally identified in the composite section of the Vendian of the Siberian Platform. A hypothesis is proposed suggesting that the alkalinity events could control the appearance and disappearance in the geological record of a distinctive suite of sedimentary structures in carbonates, the discrete nature of early diagenetic cementation of aluminosilicoclastic sediments, and fossilization of soft-bodied organisms in the Vendian.

Vendian, chronostratigraphy, Siberian Platform, alkalinity events, chemostratigraphy

введение

Перспектива разделения венда на ярусы, которые отражали бы эволюционные изменения и этапность развития органического мира, представляется чрезвычайно привлекательной и актуальной; однако каких-либо устойчивых закономерностей в появлении и распространении таксонов так и не удалось выявить. Несмотря на то, что многие вопросы биостратиграфии остаются дискуссионными, путь к ярусному расчленению венда один – следовать официально принятым рекомендациям МСК, согласно которым подразделения Общей стратиграфической шкалы считаются валидными, только если они основаны на хорошо проработанной детальной местной и региональной стратиграфии. Именно региональные стратиграфические подразделения служат для сопоставления с Общей стратиграфической шкалой, а не наоборот [Мейен, 1989; Стратиграфический кодекс..., 2019, ст. IV.4]. Стандартная (глобальная) хроностратиграфическая шкала строится по тем же самым принципам, на основе местных и региональных стратиграфических подразделений [International..., 1999, section 9E]. Дальнейшие модернизация и со-

© Гражданкин Д.В.[⊠], Александров Д.О., Максименко В.О., Рогов В.И.

[™]e-mail: grazhdankindv@ipgg.sbras.ru

вершенствование Общей стратиграфической шкалы протерозоя должны исходить из детализации региональной стратиграфической шкалы, при этом региональные стратиграфические подразделения служат прототипами будущих подразделений Общей стратиграфической шкалы. Такие региональные подразделения обязаны быть комплексно обоснованы и по возможности иметь изохронные границы (выделяться по признакам наибольшего стратиграфического веса). Кроме того, необходимо чтобы границы отражали перестройку всей совокупной геосистемы (палеоэкосистемы), причем это должен быть след перестройки во времени, а не в пространстве. Региональные подразделения, установленные на междисциплинарной основе через интеграцию палеобиологических, седиментологических и геохимических методов с учетом современных концепций эволюционной биологии, теоретической экологии, океанографии и биогеохимии, по сути, являются экостратиграфическими [Мейен, 1989]. Природная системность таких стратонов и заключенных в них палеоэкосистем обеспечивает выполнение общестратиграфического принципа хронологической взаимозаменяемости признаков («принципа трансмиссии корреляционной функции») при ближне- и дальнемагистральной корреляции [Соколов, 1970, 1980, 1986; Мейен, 1974, 1981, 1989].

В последнее время в международном научном геологическом сообществе наметилась тенденция к формализации геохимических методов вплоть до того, что предлагается выделять специальные хемостратиграфические подразделения (хемостратосвиты, хемостратосерии, хемостратогоризонты, хемостратозоны, хемостратояруса, хемохроны). Очевидно, что чисто хемостратиграфические специализированные шкалы нереализуемы и не могут функционировать вне литологического субстрата. Именно поэтому Межведомственный стратиграфический комитет предлагает не выделять специальных хемостратиграфических подразделений, а интегрировать их в характеристику основных стратиграфических подразделений [Постановления..., 1998]. Североамериканская комиссия по стратиграфической номенклатуре также предлагает рассматривать «хемостратиграфические подразделения» в качестве разновидности литостратиграфических подразделений [Scott et al., 2020]. В любом случае, созданию хемостратиграфической шкалы как местной, так и планетарной предшествует выделение геологических тел, определение их границ и установление пространственно-временных взаимоотношений между геологическими телами методом последовательных приближений под непрерывным контролем принципа Стенона с помощью принципа хронологической взаимозаменяемости признаков. Использование принципа хронологической взаимозаменяемости признаков придает стратиграфическим подразделениям статус системных многокомпонентных. Таким образом, методологически и методически правильным будет включение специфической геохимической характеристики в комплексное палеоэкосистемное обоснование стратонов.

Докембрий долгое время считался наиболее труднодоступной для экостратиграфии областью [Красилов и др., 1985]. После того, как авторы работ [Veizer, Compston, 1976; Veizer, Hoefs, 1976] высказали предположение, что вариации первичных значений δ^{13} С в карбонатах протерозойского возраста могут отражать различия в химическом составе одновозрастных вод Мирового океана, крупные изотопные экскурсы стали использоваться как один из критериев корреляции разрезов. Кривая вариаций изотопного состава углерода δ^{13} C для неопротерозойского отрезка геологической истории оказалась наиболее нестабильной за всю историю Земли, демонстрируя как экстремально высокие, так и экстремально низкие значения. Оказалось, что для большей части неопротерозоя характерны относительно высокие значения δ^{13} С, превышающие +5 ‰, за исключением отдельных интервалов, для которых типичны экстремально низкие значения, ниже –5 ‰. Высокие значения δ^{13} C считаются особенностью неопротерозоя, поэтому отрицательные экскурсы принято обозначать как «аномалии» [Halverson et al., 2020]. Общее число таких аномалий в неопротерозое, а также их природа являются предметом дискуссий. В разрезах венда Сибирской платформы стратиграфические интервалы, к которым приурочены аномалии на кривой вариаций изотопного состава углерода δ^{13} С, сложены карбонатными отложениями со специфическими осадочными текстурами, указывающими на относительно быстрые темпы карбонатонакопления в условиях нагнетенной щелочности. Ни в подстилающих, ни в перекрывающих отложениях, обогащенных тяжелым изотопом углерода, подобных текстур не встречено, что предполагает существование причинно-следственных связей между событиями нагнетания щелочности Мирового океана и обогащением карбонатов легким изотопом углерода [Tziperman et al., 2011]. Мы попытались рассмотреть последовательность событийных уровней, обусловленных ощелачиванием, в контексте региональной стратиграфической шкалы венда Сибирской платформы и предложить опорный каркас, который может служить основой для определения и ранжирования переломных рубежей в истории геологического развития системы планета Земля в венде.

РЕГИОЯРУСЫ ВЕНДА ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

Первая попытка разработать биостратиграфический каркас венда была предпринята по результатам изучения стратиграфического распространения органостенных микро- и макроостатков на Восточно-Европейской платформе [Гниловская, 1979; Гниловская и др., 1979]: отложения, охарактеризованные редкинским, котлинским и ровенским комплексами ископаемой флоры, послужили прототипами региональных стратиграфических подразделений при расчленении верхнего венда Московской синеклизы, Волыно-Подольского и Любельского склонов платформы на горизонты [Постановления..., 1978; Арень и др., 1979]. С тех пор не прекращаются дискуссии в отношении того, вызывают ли редкинское, котлинское и ровенское региональные события глобальный резонанс или же отражают региональную фациальную изменчивость валдайской серии. Попытки проследить эти горизонты в соседнюю Мезенскую синеклизу не увенчаются успехом, что найдет отражение в корреляционной стратиграфической схеме верхнего докембрия Европейского Севера СССР, где предлагается усть-пинежский горизонт [Верхний докембрий..., 1986], стратиграфический объем которого существенно превышает редкинский [Grazhdankin, 2014], при этом в предполагаемых аналогах котлинского горизонта встречены заведомо фанерозойские ихнофоссилии [Гражданкин, Краюшкин, 2007]. Исследователи, занимающиеся изучением верхневендских отложений на западном и юго-западном склонах Украинского щита, неоднократно отмечали проблемы в отношении использования релкинского и котлинского горизонтов за пределами Московской синеклизы [Новые данные..., 1985; Великанов, Гуреев, 1988; Асеева, 1993; Веліканов, 2009]. В частности, анализ распределения уплощенных органостенных макроостатков в разрезах могилев-подольской и каниловской серий Подолии показал, что нижняя граница котлинского горизонта, изначально проведенная в основании каниловской серии, не отражает этапность развития биоты [Асеева, 1988; Гуреев, 1988; Burzin, 1996]. В настоящее время верхневендские отложения юго-западной окраины Восточно-Европейской платформы вместо редкинского и котлинского предлагается расчленять на новоднестровский и ушицкий горизонты [Веліканов, 2009].

Вскоре после открытия местонахождения ископаемых остатков мягкотелых организмов в обнажениях валдайской серии на Онежском полуострове в Юго-Восточном Беломорье [Келлер и др., 1974; Келлер, Федонкин, 1976] Б.М. Келлер [1976] предложил в самой верхней части докембрия выделять глобально прослеживаемые слои с Pteridinium simplex—Dickinsonia costata, которым в разрезах предшествуют слои, охарактеризованные ископаемыми остатками Charnia masoni. В таком объеме слои, содержащие ископаемые остатки мягкотелых организмов, отвечали стратиграфическому объему венда в его первоначальном понимании [Келлер, 1976; Арень и др., 1979]. После того, как на Первом всесоюзном совещании по общим вопросам расчленения докембрия СССР венд был официально принят в качестве подразделения Общей стратиграфической шкалы [Келлер и др., 1977], интервал распространения макроостатков (отпечатков и слепков) мягкотелых организмов был ограничен редкинским горизонтом [Аксенов и др., 1978], несмотря на то, что в Московской синеклизе и на северо-западе Восточно-Европейской платформы в отложениях, послуживших прототипом для выделения редкинского горизонта, этих остатков не обнаружено. Впоследствии будет показано, что наиболее богатые комплексы ископаемых остатков мягкотелых организмов приурочены к интервалу, который не может быть с уверенностью отнесен ни к редкинскому, ни к котлинскому горизонтам (этот интервал будет предложено выделять в «беломорский горизонт» [Grazhdankin, 2014: Гражданкин, Маслов, 2015]), а в разрезах Южного Урала отпечатки и слепки мягкотелых организмов будут встречены в отложениях, традиционно сопоставляемых с котлинским горизонтом и содержащих ихнофоссилии, их стратиграфический интервал начинается в ровенском горизонте [Kolesnikov et al., 2015]. Ярко выраженная фациальная приуроченность в распределении вендских отпечатков и слепков мягкотелых организмов [Grazhdankin, 2004] и пока еще мало понятные специфические условия фоссилизации этих остатков [Grazhdankin et al., 2008] накладывают ограничения на возможность использования их с целью расчленения и корреляции разрезов даже в пределах одного осадочного бассейна.

Большие надежды на разработку зональной биостратиграфии венда (и эдиакария) возлагались на ископаемую микробиоту доушаньто-пертататакского типа — ассоциацию крупных (диаметром 100— 700 мкм) сферических органостенных микрофоссилий, поверхность которых орнаментирована закономерно расположенными шиповидными или ветвящимися выростами [Grey, 2005; McFadden et al., 2009; Голубкова и др., 2010; Liu et al., 2014]. Предполагалось, что стратиграфический интервал распространения этой микробиоты предшествует интервалу, охарактеризованному ископаемыми остатками мягкотелых организмов, и может служить палеонтологической характеристикой нижнего отдела венда. Именно поэтому после открытия ископаемой микробиоты доушаньто-пертататакского типа в разрезе венда скв. Кельтминская, пробуренной в Вычегодском прогибе Мезенской синеклизы [Вейс и др., 2006; Геодинамика..., 2006; Воробьева и др., 2006], под редкинским горизонтом было предложено выделять вычегодский горизонт нижневендского возраста [Семихатов, 2008; Vorob'eva et al., 2009a, 2009b]. Результаты последовавших регионально-стратиграфических исследований на северо-восточной окраине Восточно-Европейской платформы показали, что возраст кельтминской микробиоты может оказаться существенно моложе, а вычегодский горизонт Мезенской синеклизы, судя по всему, является стратиграфическим аналогом редкинского горизонта [Маслов и др., 2008; Подковыров и др., 2011; Голубкова и др., 2015]. Сегодня мало кто сомневается в том, что отдельные представители микробиоты доушаньто-пертататакского типа, в том числе виды-индексы отдельных комплексных зон эдиакарского комплекса акантоморфной палинофлоры [Grey, 2005], проходят в верхние горизонты венда [Голубкова и др., 2015; Anderson et al., 2017; Ouyang et al., 2017; Grazhdankin et al., 2020; Morais et al., 2021], и этот факт постепенно ослабевает энтузиазм исследователей относительно перспектив использования акантоморфных акритарх для расчленения и дальнемагистральной корреляции разрезов венда.

Редкинский и котлинский горизонты, похоже, останутся особенностью региональной стратиграфии Московской синеклизы и северо-запада Восточно-Европейской платформы, где эти стратоны достаточно уверенно распознаются [Кушим и др., 2016; Голубкова и др., 2018, 2020, 2021]. Что касается ровенского горизонта, стратотип которого находится на западном склоне Украинского щита, за пределами Российской Федерации, для этого регионального подразделения в соответствии с требованиями Стратиграфического кодекса [2019] должен быть выделен гипостратотип; однако установление стратиграфических аналогов ровенского горизонта на северо-западе Восточно-Европейской платформы пока остается неразрешимой задачей [Голубкова и др., 2020]. В существующем виде региональные стратиграфические подразделения венда Восточно-Европейской платформы не могут предлагаться в качестве прототипов ярусов Общей стратиграфической шкалы. Если редкинский и котлинский горизонты рассматривать исключительно как комплексы отложений с определенным типом ископаемых остатков, то основания для экстраполяции этих подразделений за пределы распространения соответствующих фаций (как и для любых других экстраполяций простого сочетания признаков) чрезвычайно малы.

СИБИРСКИЙ СТАНДАРТ

Осадочная последовательность верхнего венда северо-востока Сибирской платформы в разрезах северо-западного склона Оленекского поднятия и хр. Хараулах была разделена на три интервала, отличающиеся изотопно-углеродными характеристиками: интервал P (от английского слово «positive»), обогащенный тяжелыми изотопами углерода (крупный положительный экскурс на кривой δ^{13} C); интервал I («invariant») с относительно постоянным изотопным составом углерода и околонулевыми (+2... +1 ‰) значениями δ^{13} C и интервал N («negative») с отрицательным экскурсом на кривой δ^{13} C [Pelechaty et al., 1996]. Интервал P по достижению акме на кривой вариаций изотопного состава углерода было предложено расчленять на два интервала: P_r («positive rising»), в нем наблюдается рост значений δ^{13} C [Saylor et al., 1998].

Непосредственно под интервалом Р в разрезе жербинской свиты Патомского нагорья на юге Сибирской платформы был установлен интервал, обогащенный легким изотопом углерода (значения δ^{13} C в карбонатах достигают -4.2 ‰), для которого предложен индекс N₂ (интервал N, установленный в туркутской свите, был соответственно переименован в N₁) [Pelechaty, 1998]. В некоторых публикациях вместо N₂ используется индекс N_{pg} («negative postglacial»). Такой индекс к примеру используется для интервала, обогащенного легким изотопом углерода, выявленного в юкандинской свите нижней части юдомской серии стратотипической местности в разрезах по рекам Белая и Сахара Учуро-Майского региона юго-восточной части Сибирской платформы [Семихатов и др., 2004]. Юкандинская свита по изотопному составу карбонатного углерода М.С. Семихатовым с соавторами [2004] была разделена на три подсвиты: яланская, в которой на фоне высоких положительных, местами изменчивых значений δ^{13} C (достигающих +6.3...+8.4 ‰), наблюдается краткий экскурс в область умеренных положительных величин (до +3.5 ‰) вблизи основания верхней четверти разреза; малская, для нее характерны меньшие положительные значения δ^{13} С и два кратких (по мощности) экскурса к нулевым и умеренно отрицательным значениям (до +0.8...-1.2 ‰); и токурская, ей свойственны низкие отрицательные и примерно постоянные (-6.8 %...-7.8 %) величины δ^{13} С. Совокупность отложений, непосредственно подстилающих интервал N_{pg} в юкандинской свите и обогащенных тяжелым изотопом углерода (яланская и малская подсвиты), М.А. Семихатов с соавторами [2004] предлагают выделять в самостоятельный хемостратиграфический интервал с индексом V_p («Varangerian positive»). Таким образом, анализ вариаций значений δ^{13} С в разрезах карбонатных отложений венда Сибирской платформы (на примере Оленекского поднятия и Учуро-Майского региона) позволил выделить последовательность пяти интервалов (хемохронов) – V_p, N₂ (= N_{pg}), P (= P_r + P_f), I и N₁, каждый из которых обладает специфичной С-изотопной характеристикой [Семихатов, 2008]. Судя по всему, N2 и Npg отвечают двум разным событиям, между которыми заключен интервал, слабоохарактеризованный вариациями изотопного состава углерода.

Дальнейшие исследования были направлены на уточнение (совершенствование) изотопной характеристики хемохрона I в разрезах хатыспытской и туркутской свит северо-западного склона Оленекского поднятия [Peek, 2012; Cui et al., 2016; Cherry et al., 2022]. В первой подсвите хатыспытской свиты вверх по разрезу наблюдается постепенное обогащение карбонатов тяжелым изотопом углерода (значения $\delta^{13}C_{\text{карб}}$ достигают +6 ‰), а затем выше по разрезу происходит снижение значений $\delta^{13}C_{\text{карб}}$ и отрицательный экскурс (до –4.7 ‰), охватывающий вторую подсвиту. Остальная часть хатыспытской свиты и нижняя часть туркутской свиты характеризуются околонулевыми положительными значениями $\delta^{13}C_{\text{кар6}}$, постепенно снижающимися от +2 до 0 ‰, за исключением двух небольших интервалов, в которых происходит обогащение карбонатов легким изотопом углерода: в четвертой подсвите хатыспытской свиты (значения $\delta^{13}C_{\text{кар6}}$ достигают –2.3 ‰) и в верхней подсвите туркутской свиты (значения достигают –4 ‰) (рис. 1). Вариации изотопного состава кислорода $\delta^{18}O_{\text{кар6}}$ в изученном разрезе в основном имеют значения около –5 ‰, за исключением слабовыраженного положительного экскурса (значения достигают 0 ‰) во второй подсвите хатыспытской свиты. Таким образом, в основании «хемохрона I» можно выделить интервал, обогащенный легким изотопом углерода и охватывающий 50 м разреза хатыспытской свиты. К этому интервалу разреза также приурочены таксономически и количественно разнообразные комплексы ископаемых мягкотелых организмов.

U-Pb изотопный возраст детритовых цирконов позволяет установить максимальный возраст осадконакопления 550 млн лет для мелко- и крупнозернистых песчаников с эрозионной подошвой, ровной и бугорчатой плитчатостью, местами с градационной и мульдообразной косой слоистостью (мощность косых серий достигает 25 см) и обломками аргиллитов, ранее считавшихся базальными для хатыспытской свиты, а теперь входящих в состав верхней подсвиты маастахской свиты [Cherry et al., 2022]. Этот возраст позволяет считать возраст вышележащей хатыспытской свиты и интервала, обогащенного легким изотопом углерода, не древнее 550 млн лет (см. рис. 1).

К сожалению, региональная Сибирская шкала венда, построенная на вариациях изотопного состава углерода в карбонатах, в процессе разработки которой впервые был применен термин «хемохрон», не была учтена при создании глобальной стандартной шкалы [Halverson et al., 2005, 2010; Halverson, 2006]. Основой для глобальной стандартной (Гарвардской) шкалы послужили данные из разрезов Намибии и Омана [Burns, Matter, 1993; Grotzinger et al., 1995; Saylor et al., 1998; Amthor et al., 2003; Cozzi et al., 2004]. Сибирская шкала, по мнению исследователей, «страдала от низкой плотности выборки, содержала ограниченное число хроностратиграфически надежных данных и опиралась на ненадежную корреляцию» [Halverson et al., 2005, р. 1181]. «Гарвардская» кривая вариаций изотопного состава углерода в неопротерозойских карбонатах еще долго прослужит в качестве идеализированной модели, на которую все станут опираться при дальнемагистральной корреляции, несмотря на то, что сибирские разрезы по своей информативности превосходили намибийские и оманские.

В разное время разными исследователями в качестве опорного разреза венда Сибирской платформы предлагались осадочные последовательности Восточного Присаянья [Советов, Комлев, 2005; Sovetov, 2011], Патомского нагорья [Чумаков и др., 2013], Учуро-Майского региона [Семихатов и др., 1970, 2004], Оленекского поднятия [Sokolov, Fedonkin, 1984; Соколов, 1985; Knoll et al., 1995], внутренних районов [Кочнев и др., 2018]. Каждая из этих гипотез имеет свои преимущества и недостатки (обсуждение которых выходит за рамки этой статьи). В основу Сибирской шкалы положен не конкретный разрез, а региональная стратиграфическая схема, и поэтому сибирский стандарт может рассматриваться в качестве макета ярусного расчленения венда.

СОБЫТИЙНОЕ ОЩЕЛАЧИВАНИЕ МИРОВОГО ОКЕАНА В ВЕНДЕ

В настоящее время на отрезке геологической летописи, охватывающем последние 100 млн лет позднего протерозоя (за начало фанерозоя принимается возраст нижней границы томмотского яруса кембрийской системы 529 млн лет [Grazhdankin et al., 2020]), выявлено, по крайней мере, шесть событий интенсивного накопления карбонатов, обогащенных легким изотопом углерода, для которых приняты индексы от N₁ до N₆, начиная с карбонатных отложений, трансгрессивно залегающих на гляциальных отложениях ледниковой эпохи Марино (Marino) (650-635 млн лет) (см. рис. 1). Природа этих событий является предметом дискуссий и рассматривается как следствие глобальных оледенений [Hoffman et al., 1998; Hoffman, Schrag, 2002], периодического апвеллинга глубинных бескислородных вод [Kaufman et al., 1991; Grotzinger, Knoll, 1995; Knoll et al., 1996], дестабилизации газогидратов [Kennedy et al., 2001; Jiang et al., 2003; Bjerrum, Canfield, 2011], скачкообразного роста биопродуктивности [Ahm et al., 2021; Busch et al., 2022], реминерализации крупных резервуаров растворенного в океане органического углерода [Rothman et al., 2003; Fike et al., 2006] и даже диагенетических преобразований в глобальном масштабе [Покровский, Герцев, 1993; Knauth, Kennedy, 2009; Derry 2010]. С другой стороны, многочисленные результаты исследований свидетельствуют 0 высокой степени неоднородности окислительно-восстановительного ландшафта в вендское и раннекембрийское время в пределах шельфа и берегового склона. Нестабильное положение и периодическая миграция хемоклина в масштабе Мирового океана могли приводить к событийному ощелачиванию вод, интенсивному карбонатонакоплению и глобальным вариациям изотопного состава углерода в карбонатах [Jiang et al., 2007; Grotzinger et al., 2011; Schrag et al., 2013; Cui et al., 2017; Kaufman, 2019].

Первое событие N_1 начинается с накопления так называемых «покровных доломитов», важного элемента в аргументации гипотезы «Земля-снежок» («Snowball Earth»), и продолжается как эпоха гло-



Рис. 1. Гипотетическая корреляция разрезов, которые послужили основой для сибирского стандарта, либо предлагались различными исследователями в качестве опорных для венда Сибирской платформы.

Серым цветом условно обозначены интервалы разрезов, отвечающие предполагаемым событиям ощелачивания океана: N₂ — карапчетуйское; N₃ — баракунское; N₄ — жуинское; N₅ — хатыспытское; N₆ — немакит-далдынское. Вариации изотопного состава углерода (‰) в карбонатах заимствованы из публикаций [Pelechaty et al., 1996; Pelechaty, 1998; Семихатов и др., 2004; Kaufman et al., 2011; Peek, 2012; Хабаров, Изох, 2014; Покровский, Буякайте, 2015; Cui et al., 2016; Кочнев и др., 2018; Grazhdankin et al., 2020; Cherry et al., 2022]. На разрезах дополнительно показаны значения δ^{13} С для отдельных пластов и интервалов, U-Pb возрасты по цирконам (млн лет) и уровни появления ископаемых следов *Treptichnus pedum* и мелких скелетных остатков *Anabarites*. Сводная кривая вариаций изотопного состава углерода в карбонатах (слева) построена на основе сибирского стандарта венда [Yang et al., 2021] с уточнениями. Свиты: Бесюрях. — бесюряхская; Бил. — билирская; БП — большепатомская; Бетинч. — бетинчинская; К. — каланчевская; Нелег. — нелегерская; Никол. — никольская; Сиетачан. — сиетачанская; Сыаргалах. — сыаргалахская; Талах. — талахская; Успун. – успунская; Урин. — уринская; Харыст. – харыстанская; Хоронох. — хоронохская; Ченч. — ченчинская; Ы — ынахская, Баракун. — баракунская, Конгл. — конгломераты.

бального карбонатонакопления [Hoffman et al., 1998; Hoffman, Schrag, 2002]. Продолжительность этой эпохи оценивается в ~3 млн лет на основании серии U-Pb возрастов 635.21 ± 0.59 , 635.26 ± 1.07 , 632.48 ± 1.02 и 632.3 ± 5.9 млн лет, полученных для цирконов из вулканических туфов в подстилающих и перекрывающих отложениях [Hoffmann et al., 2004; Condon et al., 2005; Schmitz, 2012; Rooney et al., 2015; Prave et al., 2016]. Карбонатные отложения обогащены легким изотопом углерода, что выражается в виде отрицательного экскурса на кривой δ^{13} С. В верхней части карбонатного интервала отмечается сдвиг в сторону положительных значений, однако в разрезах Южно-Китайской платформы кривая δ^{13} С имеет более сложный вид, что может быть обусловлено диагенетическими изменениями [McFadden et al., 2008; Tahata et al., 2013]. Событие N₁ рассматривается в качестве прототипа первого яруса эдиакария (FES, First Ediacaran Stage) в Стандартной глобальной хроностратиграфической шкале [Xiao et al., 2016]. На Сибирской платформе следы этого события, равно как и гляциальных отложений эпохи Марино, достоверно не установлены.

Покровные доломиты характеризуются специфическим набором осадочных текстур (строматактоидная структура, структуры «pseudo-teepee», заполненные карбонатным цементом вдольслоевые пластовые трещины, сцементированные брекчии, градационно-слоистый пелоидный пакстоун, необычные столбчатые строматолиты), но особо выделяются куполообразные постройки, сложенные поверхностным корковым цементом в виде донных карбонатных веерообразных щеток (псевдоморфозы по арагониту), указывающие на быстрые скорости карбонатонакопления в условиях нагнетенной щелочности [Peryt et al., 1990; Aitken, 1991; Grotzinger, Knoll, 1995; Kennedy, 1996; James et al., 2001; Hoffman, Schrag, 2002; Jiang et al., 2006]. Источником нагнетания щелочности могло быть интенсивное выветривание на суше [Hoffman et al., 2011; Yu et al., 2020], нарушение стратификации водных масс и поступление глубинных вод с высоким щелочным резервом на мелководье [Grotzinger, Knoll, 1995; Knoll et al., 1996], микробная сульфатредукция [Kennedy et al., 2001; Nédélec et al., 2007; Font et al., 2010] либо другие метаболические процессы [Meister, 2013].

Карапчетуйское событие (N₂). Судя по всему, это самое древнее вендское событие; с этого события на территории Сибирской платформы начинается геологическая летопись венда (см. рис. 1). Типовым стратоном является карапчетуйская подсвита в составе марнинской свиты оселковой серии (Восточное Присаянье), достигающая мощности 78 м и сложенная преимущественно песчаниками, однако в нижней ее части среди пластов песчаника появляются прослои и пакеты доломикритов, представляющие собой микрофациальную ассоциацию тонкозернистых микритов, пелоидных пакстоунов и интракластовых флоутстоунов/рудстоунов. Доломикриты обогащены легким изотопом углерода (значения δ¹³С_{карб} достигают –2.5 ‰) [Sovetov, 2011; Kaufman et al., 2011]. Карапчетуйская подсвита подстилает диамиктиты гляциального происхождения уляхской подсвиты [Советов, Комлев, 2005]. Выше уляхских диамиктитов залегают доломитолиты озеркинской подсвиты, обогащенные легким изотопом углерода (значения δ¹³C_{карб} достигают –4 ‰) [Kaufman et al., 2011]. Возраст диамиктитов не установлен, но в любом случае они должны быть моложе 741 ± 4 млн лет (³⁹Ar/⁴⁰Ar возраст плагиоклазов из прорывающих карагасскую серию силлов габбро-долеритов нерсинского комплекса, обломки которых также присутствуют в диамиктитах [Gladkochub et al., 2006]), моложе 718 ± 8 млн лет (U-Pb возраст цирконов из долеритов нерсинского комплекса [Romanov et al., 2020]), моложе 640.8 ± (2.4—3.1) млн лет (U-Pb возраст цирконов высококалиевых пород Бирюсинского Присаянья [Летникова и др., 2021]), моложе 632 ± 2 млн лет (U-Pb возраст цирконов из ижолитов жидойского комплекса [Ярмолюк и др., 2005]), моложе 612 ± 6 млн лет (³⁹Ar/⁴⁰Ar возраст плагиоклазов из даек габбро-долеритов, прорывающих карагасскую серию [Gladkochub et al., 2006]). Ю.К. Советов [Советов, Комлев, 2005; Sovetov, 2011] сопоставляет уляхские диамиктиты с ледниковой эпохой Marino (650-635 млн лет), завершающей криогений Стандартной глобальной хроностратиграфической шкалы, однако более молодой возраст (~580 млн лет) представляется наиболее вероятным.

Доломикриты карапчетуйской подсвиты демонстрируют ряд особенностей, указывающих на высокие темпы карбонатонакопления, вероятно, в условиях повышенной щелочности. Местами в слойках тонкозернистого микрита наблюдаются утолщения, деформирующие (изгибающие кверху) вышележащие прослои пелоидных пакстоунов с образованием вертикальных трещин, заполненных осадком и цементом (рис. 2, ∂). Когда утолщения удается проследить в плане на поверхности напластования, они образуют неправильный полигональный рисунок. Полигоны имеют форму открытой чаши с приподнятыми, местами нависающими краями. Вышележащие отложения выглядят как стопки вложенных друг в друга блюдцеобразных пластинок, заполняющих вогнутые центры полигонов. Местами происходит наложение нескольких поколений полигонов и вертикальных трещин, в результате пласты доломикритов принимают брекчированный облик. Кроме доломикритов в строении карапчетуйской подсвиты также принимают участие выдержанные по простиранию пласты сцементированных брекчий, сложенных пакетами песчаных вакстоунов, включающих угловатые и полуокатанные зерна алюмосиликокластического материала, литокласты и пелоиды алевритовой до песчаной размерности (см. рис. 2, *e*). Пакеты, в свою очередь, состоят из отдельных пластовых тел брекчий мощностью от 3—9 до 17—28 см. Нередко порода имеет растресканный облик (обломки могут быть соединены вместе). В некоторых случаях также можно продемонстрировать несколько стадий брекчирования и цементации. Судя по всему, брекчирование происходило *in situ*, а обломки быстро цементировались большими объемами доломикрита. Интервал разреза, сложенный песчаниками и доломикритами, достигает мощности 15 м и связан посте-



Рис. 2. Литологические признаки ощелачивания в обстановках карбонатонакопления в венде Сибирской платформы.

a—б — микробиалитовая постройка (*a*) и интрамикриты (б), связанные с хатыспытским событием N₅ (хатыспытская свита, Оленский район); *в*, *г* — поверхностный корковый цемент в виде донных карбонатных веерообразных щеток (псевдоморфозы по арагониту), связанный с жуинским событием N₄ (никольская свита, руч. Левый Дабан, р. Лена, Патомский район); *д*, *e* — утолщения в слойках тонкозернистого микрита, деформирующие вышележащие прослои пелоидных пакстоунов (*д*), и горизонты сцементированных брекчий (*e*), связанные с карапчетуйским событием N₂ (марнинская свита, р. Уда, Присаянье).

пенными переходами с ниже и вышележащими отложениями. Наблюдаемые особенности строения позволяют предполагать, что осаждение карбонатов происходило в условиях нагнетенной щелочности.

Карапчетуйская подсвита подстилает диамиктиты гляциального происхождения (уляхская подсвита), которые, в свою очередь, перекрываются карбонатами, обогащенными легким изотопом углерода (озеркинская подсвита). Эта последовательность напоминает строение формации Доушаньто (Doushantuo) Южно-Китайской платформы, в которой интервал, одновозрастный с гляциальной эпохой Гаскиерс (Gaskiers) (верхняя половина пачки II формации Доушаньто), оказывается зажатым между двумя интервалами (N_2 и N_3), охарактеризованными отрицательными экскурсами на кривой δ^{13} С. Нижняя аномалия (N_2) имеет Re-Os возраст 587.2 ± 3.6 млн лет, полученный по черным сланцам [Yang et al., 2021]. Общее сходство в строении разрезов марнинской свиты Восточного Присаянья и формации Доушаньто Южного Китая позволяет нам предполагать, что обогащение карбонатов карапчетуйский подсвиты марнинской свиты Восточного Присаянья легким изотопом углерода когло быть обусловлено реминерализацией резервуара растворенного органического углерода сульфат-восстанавливающими бактериями в бескислородных условиях, имело глобальный характер и произошло 587 млн лет назад [Rothman et al., 2003].

В региональной стратиграфической схеме верхнепротерозойских отложений западной части Сибирской платформы [Решения..., 1983] марнинская свита в составе оселковой серии была ошибочно сопоставлена с тасеевской серией и отнесена к тасеевскому горизонту, возраст которого оказался более молодым, чем предполагалось ранее [Кочнев и др., 2020]. На рисиунке 1 карапчетуйская подсвита марнинской свиты помещена в состав регионального стратиграфического подразделения, которое оставлено без названия и подстилает дальнейтайгинский горизонт.

Баракунское событие (N₃). Тонкослоистые доломитолиты, состоящие из блюдцеобразно изогнутых пакетов однородных и пелоидных микритовых слойков [Чумаков и др., 2013], залегающие в основании баракунской свиты, обогащены легким изотопом углерода (значения $\delta^{13}C_{kabb}$ достигают -4.2 ‰). Доломитолиты залегают на диамиктитах гляциального происхождения большепатомской свиты и сопоставляются нами с доломитолитами озеркинской подсвиты марнинской свиты Восточного Присаянья. которые также обогащены легким изотопом углерода и залегают на диамиктитах гляциального происхождения (уляхская подсвита марнинской свиты) [Советов, Комлев, 2005]. Баракунская свита перекрывается уринской свитой, которая содержит своеобразный комплекс органостенных микрофоссилий, характерный для третьей пачки формации Доушаньто (ассоциация Tanarium pycnacanthum-Ceratosphaeridium glaberosum) [Liu, Moczydłowska, 2019]. Это позволяет нам предполагать, что баракунское событие является одновозрастным с событием N₃ в основании третьей пачки формации Доушаньто, возраст которой моложе Re-Os возраста 587.2 ± 3.6 млн лет, полученного по черным сланцам [Yang et al., 2021]. В пользу такой корреляции могут свидетельствовать Pb-Pb возрасты 593 ± 100 и 581 ± 16 млн лет, полученные для известняков средней и верхней частей разреза баракунской свиты [Rud'ko et al., 2021]. По всей вероятности, баракунское событие (N₃) связано с окончанием гляциальной эпохи Гаскиерс (579.63 ± 0.15— 579.88 ± 0.44 млн лет) [Yang et al., 2021] и могло быть обусловлено реминерализацией резервуара растворенного органического углерода в бескислородных условиях [Rothman et al., 2003]. Седиментологические особенности доломитолитов, связанных с баракунским событием [Советов, Комлев, 2005; Чумаков и др., 2013], указывают на быстрые темпы карбонатонакопления в условиях нагнетенной щелочности.

В региональной стратиграфической схеме верхнепротерозойских отложений южной части Сибирской платформы [Решения..., 1983] баракунская свита относится к дальнейтайгинскому горизонту. Дальнетайгинский горизонт – валидное стратиграфическое подразделение, которое охраняется правом приоритета [Стратиграфический кодекс..., 2019].

Жуинское событие (N₄). Жуинская серия объединяет никольскую и ченчинскую свиты. В разрезе Хапчагай, расположенном в устье руч. Левый Дабан, левого притока р. Лена в Патомском нагорье на южной окраине Сибирской платформы, нижняя часть никольской свиты сложена тонкопереслаивающимися алевролитами и аргиллитами с пластами ровноплитчатых крупнозернистых алевролитов и редкими прослоями известняков. На отметке 34 м от начала разреза количество и мощности пластов известняка постепенно возрастают, на 64-м карбонаты доминируют в разрезе, а в интервале 102—148 м в них широко распространены заполненные карбонатным цементом вертикальные и вдольслоевые пластовые трещины (sheet-crack cement), поверхностный корковый цемент в виде донных карбонатных веерообразных щеток (псевдоморфозы по арагониту), а также интракластовые известняки с обломками коркового цемента (см. рис. 2, в, г). Вдольслоевые пластовые трещины через систему субвертикальных трещин связаны с поверхностным корковым цементом, который, в свою очередь, подвергался размыву потоками, разрушался и переотлагался в виде интракластов. Все это указывает на синседиментационную природу трещин. Выше по разрезу, с основания ченчинской свиты, преобладают крупные (синоптический рельеф достигает 1.5 м в высоту) иловые холмы (предыдущими исследователями описаны как желваковые строматолиты *Tinnia patomica*), нередко попадаются грэйпстоуны крупного размера (предыдущими исследователями описаны как катаграфии). Перечисленные литологические особенности позволяют предполагать резкое повышение щелочности, спровоцировавшее интенсивное карбонатонакопление. Появление в разрезе признаков ощелачивания обстановок седиментации совпадает с максимумом обогащения карбонатов легким изотопом углерода и надиром на кривой вариаций изотопного состава углерода, построенной для этого разреза [Покровский, Герцев, 1993; Покровский и др., 2006а, 20066; Melezhik et al., 2009; Покровский, Буякайте, 2015]. Установленный в этом разрезе крупный отрицательный экскурс сопоставляется с токурской подсвитой юкандинской свиты Учуро-Майского региона юго-восточной части Сибирской платформы [Семихатов и др., 2004], с верхами сиэтачанской свиты хр. Хараулах [Хабаров, Изох, 2014] и с событием Шурам (Shuram) [Покровский и др., 2006а; Melezhik et al., 2009; Чумаков и др., 2013], с которым, по одной из гипотез, могло быть связано нарушение стратификации вод Мирового океана и нагнетание щелочности [Kaufman, 2019]. Начало события Шурам имеет возраст 574 млн лет [Rooney et al., 2020] (см. рис. 1).

В отложениях, одновозрастных с жуинским событием, впервые в геологической летописи появляются ископаемые остатки мягкотелых организмов. Древнейшие такие остатки обнаружены в формации Друк (Drook) группы Консэпшен (Conception) на о. Ньюфаундленд и имеют U-Pb возраст 574 млн лет, полученный по цирконам из вулканических туфов [Matthews et al., 2020]. Жуинское событие, судя по всему, завершилось 567—565 млн л. н. [Yang et al., 2021]; примечательно, что в разрезе о. Ньюфаундленд ископаемые остатки не встречены выше вулканических туфов с U-Pb возрастом 565 млн лет, полученным по цирконам [Matthews et al., 2020]. Таким образом, можно предположить, что стратиграфический интервал распространения ископаемых остатков мягкотелых организмов в интервале 574—565 млн лет обусловлен быстрой цементацией осадка в условиях аномально избыточной щелочности Мирового океана (жуинское событие). Исчезновение ископаемых остатков в разрезах о. Ньюфаунденд, скорее всего, имеет тафономическую природу.

На Сибирской платформе достоверно не установлены разрезы карбонатных отложений, обогащенных легким изотопом углерода, которые позволяли бы судить об аномалиях, проявившихся после жуинской (N_4), но предшествовавших хатыспытской (N_5). Разрезы алюмосиликокластических отложений этого возрастного интервала (565—550 млн лет) на Сибирской платформе также достоверно не установлены, но, судя по U-Pb возрастам цирконов из вулканических туфов [Yang et al., 2021], широко представлены в Юго-Восточном Беломорье Восточно-Европейской платформы, где содержат таксономически и количественно богатые комплексы ископаемых остатков мягкотелых организмов. По всей вероятности, именно это обстоятельство (стратиграфический перерыв в осадочной последовательности венда) обусловило отсутствие на Сибирской платформе ископаемых остатков мягкотелых организмов беломорского типа.

В региональной стратиграфической схеме верхнепротерозойских отложений южной части Сибирской платформы [Решения..., 1983] жуинская серия относится жуинскому горизонту. Жуинский горизонт — валидное стратиграфическое подразделение, охраняемое правом приоритета [Стратиграфический кодекс..., 2019].

Хатыспытское событие (N_5). Природу крупного отрицательного экскурса на кривой вариаций изотопного состава углерода в карбонатах хатыспытской свиты северо-западного склона Оленекского поднятия удалось установить благодаря изучению с высоким стратиграфическим разрешением вариаций изотопного состава серы в нерастворимом осадке (б³⁴S_{тs} главным образом в пирите и в незначительной степени — в органическом веществе), вариаций изотопного состава серы в сульфатах ($\delta^{34}S_{CAS}$), вариаций изотопного состава урана в карбонатах (δ^{238} U) и содержания основных, рассеянных и редкоземельных элементов [Cui et al., 2016; Cherry et al., 2022]. Отрицательные значения (б³⁴S_{пирит}), достигающие -20 ‰, и значительно высокое содержание сульфатов в карбонатах (достигающее 1969 г/т) в первой подсвите хатыспытской свиты свидетельствуют о ярко выраженных эвксинных условиях с образованием сингенетичного пирита в толще воды, в то время как третья подсвита характеризуется относительно низким содержанием сульфатов и аномально высокими значениями (б³⁴S_{пирит}), что указывает на безэвксинные условия в толще воды с образованием аутигенного пирита в условиях низкой концентрации сульфатов. В целом высокие значения величины цериевой аномалии (Ce/Ce* = [Ce]/([Pr]²/ [Nd]) по всему разрезу, в среднем составляющие 0.84 ± 0.06 (1 σ), позволяют предполагать бескислородные условия в обстановках осадконакопления первой, второй и третьей подсвит [Cherry et al., 2022]. Результаты изучения вариаций изотопного состава углерода в органическом веществе (б¹³C_{орг} варьируют от -24.1 до -38.9 ‰, в среднем составляют -33.2 ‰) указывают на возможное присутствие хемолибо метанотрофных микроорганизмов на границе раздела между кислородными и бескислородным в толще воды (либо в осадке). Таким образом, результаты геохимического изучения свидетельствуют о том, что отрицательный экскурс на кривой вариаций изотопного состава углерода в разрезе хатыспытской свиты (см. рис. 1) отвечает событию эвксинизации обстановок осадконакопления [Cui et al., 2016]. Более того, результаты изучения вариаций изотопного состава урана (δ^{238} U) в хатыспытской свите позволяют предполагать, что эвксиния носила глобальный характер [Cherry et al., 2022].

Вывод о стратификации вод в обстановках осадконакопления хатыспытской свиты хорошо согласуется с седиментологическими наблюдениями, такими как тонкая слоистость и высокое содержание органического вещества (0.4 %), в том числе битумов [Мельник и др., 2023]. Первая подсвита хатыспытской свиты сложена тонкопереслаивающимися пелоидными пакстоунами, спаритами и микритами, они интерпретируются как отложения низкоплотностных потоков. Среди этих отложений залегают русловидные тела интрамикритов (мощностью до 7 м), в которых широко распространены подушковидные тела, структуры срыва осадка, подворачивания слоев и другие текстуры деформации нелитифицированного осадка, при этом обломки по составу и микрофациальным характеристикам не отличаются от вмещающих отложений (см. рис. 2, б). Судя по всему, обломочные известняки представляют собой отложения грязекаменных потоков. Вторая подсвита сложена преимущественно отложениями низкоплотностных потоков — тонкопереслаивающимися пелоидными пакстоунами, глинистыми спаритами и микритами. В третьей подсвите появляются мощные (до 2.5 м), выдержанные по простиранию пласты грубослоистых спаритов с волнистыми поверхностями напластования и другими признаками активной гидродинамики (слепками промоин, косой слоистостью), позволяющими интерпретировать их как отложения высокоплотностных потоков. В четвертой подсвите снова появляются отложения грязекаменных потоков (интрамикриты), но в первую очередь обращают на себя внимание микробиалитовые постройки высотой до 0.6 м (см. рис. 2, а). Широкое распространение отложений плотностных потоков указывает на существование градиента склона в обстановках осадконакопления хатыспытской свиты, что, в свою очередь, может быть связано как с высокими темпами прогибания на дистальных участках карбонатного склона, так и с высокими темпами карбонатонакопления на проксимальных участках. В пользу последнего предположения указывают микробиалитовые постройки в четвертой подсвите и местный состав обломков в интрамикритах. Если дальнейшими исследованиями подтвердятся предположения о том, что лавинный характер карбонатной седиментации при формировании хатыспытской свиты был обусловлен высокими темпами карбонатонакопления, это позволит связать обогашение хатыспытских известняков легким изотопом углерода с событием ощелачивания Мирового океана.

Кроме эпонимической свиты северо-западного склона Оленекского поднятия, хатыспытское событие проявило себя в нижней части хараютехской свиты хр. Хараулах на северо-востоке [Pelechaty et al., 1996], в жербинской свите Патомского нагорья на юге [Pelechaty, 1998], в харыстанской свите внутренних районов [Кочнев и др., 2018] и, возможно, в чистяковской свите юго-западной окраины Сибирской платформы [Кочнев и др., 2020]. Хатыспытское событие отвечает верхнему подгоризонту непского горизонта внутренних районов Сибирской платформы. Хатыспытское событие имеет возраст моложе 550 млн лет [Cherry et al., 2022]; с этим событием связано появление ископаемых остатков мягкотелых организмов на Сибирской платформе [Grazhdankin et al., 2008; Cui et al., 2016; Иванцов, 2017; Ivantsov, 2018; Bowyer et al., 2023], на Южно-Китайской платформе [Xiao et al., 2021] и в Намибии [Grotzinger et al., 1995]. Кроме того, на фоне хатыспытского события произошло появление обызвествленного скелета у ряда макроорганизмов (наиболее известные из которых представители рода *Cloudina*, также установленные на Сибирской платформе [Конторович и др., 2008; Zhuravlev et al., 2012; Гражданкин и др., 2015]); появлению биоминерализации у макроорганизмов могло способствовать повышенное относительное содержание кальция и ощелачивание океана [Wood et al., 2017, 2019].

В региональной стратиграфической схеме верхнепротерозойских отложений северо-восточной части Сибирской платформы [Решения..., 1983] хатыспытская свита в составе хорбусуонской серии отнесена к юдомскому горизонту, который изначально трактовался авторами схемы как синоним «юдомия» (стратиграфический аналог венда) и, вероятно, поэтому не получил распространения. В.В. Хоментовский с соавторами [1998] прослеживали хатыспытскую свиту в пограничный интервал непского и тирского горизонтов внутренних районов Сибирской платформы. Хатыспытское событие (которое, на наш взгляд, также присутствует в верхах харыстанской и паршинской свит внутренних районов [Кочнев и др., 2018]), можно помещать в кровлю непского горизонта. На рисунке 1 предлагается вариант корреляции, при которой хатыспытское событие маркирует основание тирского горизонта.

Наконец, **событие** N_6 , впервые выделенное как «интервал N» в верхней части туркутской свиты Оленекского поднятия [Pelechaty et al., 1996], также установлено в нижней части сухарихинской свиты Игарского поднятия северо-запада Сибирской платформы [Kouchinsky et al., 2007; Mapycuн и др., 2023] и, возможно, в старореченской свите Прианабарья [Kaufman et al., 1996; Kouchinsky et al., 2017], в платоновской свите Туруханского поднятия [Marusin et al., 2019] и в усть-юдомской свите на юго-востоке Сибирской платформы [Brasier et al., 1993; Bowyer et al., 2023]. Начало события имеет возраст 539 млн лет [Bowyer et al., 2023]. К этому событию приурочено появление мелких скелетных остатков немакитдалдынского облика, позволяя искать причинно-следственные связи между ощелачиванием Мирового океана и возникновением биоминерализации у животных [Wood et al., 2017; Kaufman et al., 2019]. Судя по всему, первые ископаемые остатки анабаритид на территории Сибирской платформы появляются стратиграфически ниже события N_6 . Таким образом, интервал N_6 следует помещать вблизи основания немакит-далдынского региояруса [Bowyer et al., 2023] (см. рис. 1).

НИЖНЯЯ ГРАНИЦА ВЕНДА

В предлагаемой модели расчленения венда, основанной на разрезах Сибирской платформы, не установлены аналоги отложений с возрастом древнее 600 млн лет. Даже по периферии Сибирской платформы, в перикратонных осадочных бассейнах с длительной историей погружения (в Лено-Анабарском, Учуро-Майском, Патомском регионах), разрезы венда начинаются с отложений, возраст которых моложе 600 млн лет. Это наблюдение позволяет нам очередной раз вернутся к вопросу о месте венда в Стандартной глобальной хроностратиграфической шкале [Семихатов и др., 2015]. В отношении нижней границы венда необходимо придерживаться Стратиграфического кодекса [2019, ст. XII.1], основное назначение которого «сохранение первоначального названия валидных стратиграфических подразделений и принятого его автором Б.С. Соколовым [1980, с. 75] всегда понимался однозначно: нижняя граница венда представляет собой «уровень отложений, заключающих последние тиллиты (климатостратиграфический критерий)». Можно взять более позднее понимание, сформулированное Б.С. Соколовым уже после утверждения вендской системы, согласно которому нижняя граница «ознаменовала конец длительной многостадийной гляциальной эры позднего протерозоя, охватившей конец рифея и начало венда» [Соколов, 1997, с. 14].

Б.С. Соколов понимал стратиграфический объем подразделения однозначно — внутри венда не должно быть никаких других стадий оледенения, кроме самой последней. Здесь следует отметить, что в то время возраст гляциальных отложений эпохи Гаскиерс считался рифейским [Anderson. King. 1981: Hambrey, Harland 1985]. После того, как был установлен более молодой возраст ($579.63 \pm 0.15 - 579.88 \pm$ ± 0.44 млн лет) диамиктитов Гаскиерс [Bowring et al., 2003; Pu et al., 2016], Б.С. Соколов [2011] отметил важность этого события для установления времени окончания гляциальной эры и рассматривал в качестве стратиграфического аналога волынской серии нижнего венда юго-запада Восточно-Европейской платформы. Волынская серия, как теперь уже известно, сформировалась в интервале 580—567 млн лет [Środoń et al., 2023], а возраст подстилающей вильчанской серии гляциального происхождения не установлен. Можно только сказать, что вильчанская серия моложе 977 ± 6 млн лет (U-Pb возраст обломочных цирконов глусской свиты вильчанской серии [Paszkowski et al., 2019]), моложе 710 млн лет (U-Pb возраст доломитолитов и ³⁹Ar/⁴⁰Ar возраст аутигенного полевого шпата из подстилающей лапичской свиты [Środón et al., 2022]) и моложе 655 ± 55 млн лет (U-Pb возраст педогенного кальцита [Liivamägi et al., 2021]). Предполагаемые стратиграфические аналоги вильчанской серии на севере Норвегии нарушены роем долеритовых даек Оттфьеллет (Ottfjället), U-Pb возраст бадделеита в которых составил 596.3 ± ± 1.5 млн лет [Kumpulainen et al., 2021]. Таким образом, гляциальные отложения, залегающие в основании вендского комплекса в стратотипической местности, древнее диамиктитов Гаскиерс, но провести уверенно корреляцию с эпохой Марино пока не представляется возможным. Аналогичное заключение можно сделать и в отношении гляциальных отложений, залегающих в основании вендского комплекса Сибирской платформы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Геологическая летопись вендской системы свидетельствует о последовательной модернизации биогеохимических циклов в системе планеты Земля. Крайне неоднородный и нестабильный окислительно-восстановительный ландшафт в венде обусловил периодическое распространение на шельфе обстановок, насыщенных кислородом, которые прерывались широкомасштабными океанскими аноксией и эвксинией. Эти биогеохимические пертурбации могли сопровождаться переменной доступностью питательных веществ, что не могло не сказываться на общем характере эволюционных процессов и экологической экспансии. Кроме того, геологическая летопись венда свидетельствует о периодическом ощелачивании Мирового океана, что, в свою очередь, могло стать причиной наблюдаемой периодичности в появлении и исчезновении карбонатных платформ, дискретного характера раннедиагенетической цементации алюмосиликокластических осадков и фоссилизации остатков мягкотелых организмов. Событийное ощелачивание Мирового океана могло привести к появлению у древнейших животных способности противостоять этим пертурбациям через детоксикацию, что со временем могло способствовать возникновению минерального скелета. Выявленные в венде эпохи интенсивного накопления карбонатов, обогащенных легким изотопом углерода, со специфическими литологическими особенностями, позволяющими предполагать ощелачивание океана, открывают новые возможности для периодизации и ярусного расчленения этого интервала геологической истории. Эти эпохи, по всей видимости, вызывали резонанс и в одновозрастных алюмосиликокластических обстановках седиментации, где быстрая цементация осадка способствовала фоссилизации мягких тканей. Кроме того, эти эпохи коррелируются с этапами в эволюции биоминерализации. При таком стечении событий каждая эпоха должна обладать уникальной палеонтологической характеристикой, отражающей различные состояния палеоэкосистем и отвечающей палеоэкосистемным критериям выделения стратонов. Намечающаяся на Сибирской платформе шкала периодизации венда, представляющая собой последовательность геологических тел регионального и субглобального масштаба, каждое из которых имеет специфическую углеродную изотопно-геохимическую характеристику, имеет все шансы стать основой для будущей ярусной архитектуры единственной в верхнем протерозое системы.

Мы благодарим А.Дж. Кауфмана за плодотворное обсуждение, А.Е. Васильева и О.Б. Жарасбаева за помощь в сборе материала и двух анонимных рецензентов за конструктивные замечания.

Исследование выполнено в рамках научной темы FWZZ-2022-0002 (ИНГГ СО РАН). Изучение событий ощелачивания Мирового океана в венде ведется при финансовой поддержке РНФ (проект 23-17-00202).

ЛИТЕРАТУРА

Аксенов Е.М., Келлер Б.М., Соколов Б.С., Солонцов Л.Ф., Шульга П.Л. Общая схема стратиграфии верхнего докембрия Русской платформы // Изв. АН СССР. Сер. геол., 1978, № 12, с. 17—34.

Арень Б., Келлер Б.М., Лендзион К., Розанов А.Ю. Стратиграфическое подразделение венда и кембрия// Стратиграфия верхнедокембрийских и кембрийск их отложений запада Восточно-Европейской платформы / Под ред. Б.М. Келлера, А.Ю. Розанова. М., Наука, 1979, с. 213—224.

Асеева Е.А. Ископаемые остатки вендских таллофитов // Биостратиграфия и палеогеографические реконструкции докембрия Украины / Под ред. В.А. Рябенко. Киев, Наук. думка, 1988, с. 81—92.

Асеева Е.А. Вендский этап. Поздневендский (котлинский) подэтап // Геологическая история территории Украины. Докембрий / Под ред. В.А. Рябенко. Киев, Наук. думка, 1993, с. 150—172.

Вейс А.Ф., Воробьева Н.Г., Голубкова Е.Ю. Первые находки нижневендских микрофоссилий на Русской плите: таксономический состав и биостратиграфическое значение // Стратиграфия. Геологическая корреляция, 2006, т. 14, № 4, с. 28—46.

Веліканов В.Я. Проблемні питання стратиграфії венду України // Геологічний журнал., 2009, № 3, с. 7—13.

Великанов В.А., Гуреев Ю.А. Уточнение стратиграфической шкалы венда Восточно-Европейской платформы // Докл. АН Укр. ССР. Сер. Б. Геол. хим. и биол. науки, 1988, № 7, с. 3—6.

Верхний докембрий Европейского Севера СССР (Объяснительная записка к схеме стратиграфии) / Под ред. В.А. Дедеева, Б.М. Келлера. Сыктывкар, Институт геологии АН СССР, 1986, 42 с.

Воробьева Н.Г., Сергеев В.Н., Семихатов М.А. Уникальная нижневендская кельтминская микробиота Тимана: новые данные о палеонтологии венда и его глобальной характеристике // ДАН, 2006, т. 410, № 3, с. 366—371.

Геодинамика и возможная нефтегазоносность Мезенского осадочного бассейна / Под ред. С.А. Аплонова, Д.Л. Федоровой. СПб, Наука, 2006, 319 с.

Гниловская М.Б. Вендотениды // Палеонтология верхнедокембрийских и кембрийских отложений Восточно-Европейской платформы / Под ред. Б.М. Келлера, А.Ю. Розанова. М., Наука, 1979, с. 39—48.

Гниловская М.Б., Менс К.А., Пашкявичене Л.Т., Пиррус Э.А. Погоризонтное расчленение верхнего венда в стратотипической местности // Стратиграфия верхнего протерозоя СССР (рифей и венд). Труды V сессии Научного совета по геологии докембрия (Уфа, 1977 г.) / Под ред. Б.М. Келлера, М.А. Семихатова. Л., Наука, 1979, с. 117—121.

Голубкова Е.Ю., Раевская Е.Г., Кузнецов А.Б. Нижневендские комплексы микрофоссилий Восточной Сибири в решении стратиграфических проблем региона // Стратиграфия. Геологическая корреляция, 2010, т. 18, № 4, с. 3—27.

Голубкова Е.Ю., Зайцева Т.С., Кузнецов А.Б., Довжикова Е.Г., Маслов А.В. Микрофоссилии и Rb-Sr-возраст глауконитов в опорном разрезе верхнего протерозоя северо-востока Русской плиты (скв. Кельтменская-1) // ДАН, 2015, т. 462, № 4, с. 444—448.

Голубкова Е.Ю., Кушим Е.А., Кузнецов А.Б., Яновский А.С., Маслов А.В., Шведов С.Д., Плоткина Ю.В. Редкинская биота макроскопических ископаемых организмов северо-запада Восточно-Европейской платформы (Южное Приладожье) // ДАН, 2018, т. 479, № 2, с. 163—167.

Голубкова Е.Ю., Кушим Е.А., Тарасенко А.Б. Ископаемые организмы котлинского горизонта верхнего венда северо-запада Русской плиты (Ленинградская область) // Палеонтологический журнал, 2020, № 4, с. 99—108.

Голубкова Е.Ю., Бобровский И.М., Кушим Е.А., Плоткина Ю.В. Ископаемые организмы редкинского горизонта верхнего венда северо-запада Русской плиты (Ленинградская область) // Палеонтологический журнал, 2021, № 5, с. 107—114.

Гражданкин Д.В., Краюшкин А.В. Ископаемые следы жизнедеятельности и верхняя граница венда в юго-восточном Беломорье // ДАН, 2007, т. 416, № 4, с. 514—518. **Гражданкин Д.В., Маслов А.В.** Место венда в Международной стратиграфической шкале // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (4), с. 703—717.

Гражданкин Д.В., Конторович А.Э., Конторович В.А., Сараев С.В., Филиппов Ю.Ф., Ефимов А.С., Карлова Г.А., Кочнев Б.Б., Наговицин К.Е., Терлеев А.А., Федянин Г.О. Венд Предъенисейского осадочного бассейна (юго-восток Западной Сибири) // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (4), с. 718—734.

Гуреев Ю.А. Бесскелетная фауна венда // Биостратиграфия и палеогеографические реконструкции докембрия Украины / Под ред. В.А. Рябенко. Киев, Наук. думка, 1988, с. 65—81.

Иванцов А.Ю. О находках типичных эдиакарских ископаемых в юдомской серии венда восточной Сибири // ДАН, 2017, т. 472, № 5, с. 542—545.

Келлер Б.М. Бесскелетные животные докембрия и их стратиграфическое значение // Изв. АН СССР. Сер. геол., 1976, № 8, с. 68—77.

Келлер Б.М., Федонкин М.А. Новые находки окаменелостей в валдайской серии докембрия по р. Сюзьме // Изв. АН СССР. Сер. геол., 1976, № 3, с. 38—44.

Келлер Б.М., Меннер В.В., Степанов В.А., Чумаков Н.М. Новые находки Metazoa в вендомии Русской платформы // Изв. АН СССР. Сер. геол., 1974, № 12, с. 130—134.

Келлер Б.М., Кратц К.О., Митрофанов Ф.П., Семихатов М.А., Соколов Б.С., Соколов В.А., Шуркин К.А. Достижения в разработке общей стратиграфической шкалы докембрия СССР // Изв. АН СССР. Сер. геол., 1977, № 11, с. 16—21.

Конторович А.Э., Варламов А.И., Гражданкин Д.В., Карлова Г.А., Клец А.Г., Конторович В.А., Сараев С.В., Терлеев А.А., Беляев С.Ю., Вараксина И.В., Ефимов А.С., Кочнев Б.Б., Наговицин К.Е., Постников А.А., Филиппов Ю.Ф. Разрез венда восточной части Западно-Сибирской плиты (по результатам бурения параметрической скважины Восток-3) // Геология и геофизика, 2008, т. 49 (12), с. 1238—1247.

Кочнев Б.Б., Покровский Б.Г., Кузнецов А.Б., Марусин В.В. С- и Sr-изотопная хемостратиграфия карбонатных отложений венда—нижнего кембрия центральных районов Сибирской платформы // Геология и геофизика, 2018, т. 59 (6), с. 731—755.

Кочнев Б.Б., Прошенкин А.И., Покровский Б.Г., Летникова Е.Ф. Тасеевская серия венда югозападной окраины Сибирской платформы: изотопно-геохимические и геохронологические данные, возраст и корреляция // Геология и геофизика, 2020, т. 61 (10), с. 1370—1385.

Красилов В.А., Зубаков В.А., Шульдинер В.И., Ремизовский В.И. Экостратиграфия: теория и методы. Владивосток, ДВНЦ АНССР, 1985, 148 с.

Кушим Е.А., Голубкова Е.Ю., Плоткина Ю.В. Биостратиграфическое расчленение вендкембрийских отложений Южного Приладожья // Вестник ВГУ. Сер. Геология, 2016, № 4, с. 18—22.

Летникова Е.Ф., Изох А.Э., Костицын Ю.А., Летников Ф.А., Ершова В.Б., Федерягина Е.Н., Иванов А.В., Ножкин А.Д., Школьник С.И., Бродникова Е.А. Высококалиевый вулканизм на рубеже 640 млн лет на юго-западе Сибирской платформы (Бирюсинское Присаянье) // ДАН, 2021, т. 496, № 1, с. 55—62.

Марусин В.В., Кочнев Б.Б., Карлова Г.А., Изох О.П., Сарсембаев Ж.А., Иванова Н.А. Переходный интервал докембрия—кембрия на Игарском поднятии (северо-запад Сибирской платформы) // Геология и геофизика, 2023, т. 64 (6), с. 823—840, doi: 10.15372/GiG2022149.

Маслов А.В., Гражданкин Д.В., Подковыров В.Н., Ронкин Ю.Л., Лепихина О.П. Состав питающих провинций и особенности геологической истории поздневендского Мезенского бассейна // Литология и полезные ископаемые, 2008, № 3, с. 290—312.

Мейен С.В. Спорные вопросы теории стратиграфии // Природа, 1974, № 12, с. 16—22.

Мейен С.В. От общей к теоретической стратиграфии // Советская геология, 1981, № 9, с. 58—69. Мейен С.В. Введение в теорию стратиграфии. М., Наука, 1989, 215 с.

Мельник Д.С., Парфенова Т.М., Гражданкин Д.В., Рогов В.И. Органическая геохимия карбонатных пород, силицитов и черных сланцев хатыспытской свиты венда (эдиакария) северо-востока Сибирской платформы // Геология и геофизика, 2023, т. 64 (6), с. 841—857, doi: 10.15372/GiG2022154.

Новые данные по стратиграфии венда и нижнего палеозоя Волыно-Подолии / Е.А. Асеева, В.А. Великанов, Г.Г. Виноградов, Б.И. Власов, В.П. Гриценко, Ю.А. Гуреев, И.Н. Иванив, В.Я. Иванченко, В.В. Кирьянов, Л.И. Константиненко, В.В. Пастухов, В.Ф. Судовцев, П.Д. Цегельнюк. Киев, 1985, 60 с. (Препринт/ИГН АН УССР, № 85—28).

Подковыров В.Н., Гражданкин Д.В., Маслов А.В. Литогеохимия тонкозернистых обломочных пород венда южной части Вычегодского прогиба // Литология и полезные ископаемые, 2011, № 5, с. 484—504.

Покровский Б.Г., Герцев Д.О. Верхнедокембрийские карбонаты с аномально легким изотопным составом углерода // Литология и полезные ископаемые, 1993, № 1, с. 64—80.

Покровский Б.Г., Буякайте М.И. Геохимия изотопов С, О и Sr в неопротерозойских карбонатах юго-западной части Патомского палеобассейна, юг Средней Сибири // Литология и полезные ископаемые, 2015, № 2, с. 159—186.

Покровский Б.Г., Мележик В.А., Буякайте М.И. Изотопный состав С, О, Sr и S в позднедокембрийских отложениях патомского комплекса, Центральная Сибирь. Сообщение 1. Результаты, изотопная стратиграфия и проблемы датирования // Литология и полезные ископаемые, 2006а, № 5, с. 505—530.

Покровский Б.Г., Мележик В.А., Буякайте М.И. Изотопный состав С, О, Sr и S в позднедокембрийских отложениях патомского комплекса, Центральная Сибирь. Сообщение 2. Природа карбонатов с ультранизким и ультравысокими значениями δ^{13} С // Литология и полезные ископаемые, 2006б, № 6, с. 642—654.

Постановления Межведомственного стратиграфического комитета и его постоянных комиссий / Под ред. Б.С. Соколова. Вып. 18. Л., Изд-во ВСЕГЕИ, 1978, 111 с.

Постановления Межведомственного стратиграфического комитета и его постоянных комиссий / Под ред. А.И. Жамойды. Вып. 30. СПб, Изд-во ВСЕГЕИ, 1998, 47 с.

Решения Всесоюзного стратиграфического совещания по докембрию, палеозою и четвертичной системе Средней Сибири, часть I (верхний докембрий, нижний палеозой) / Под ред. В.И. Краснова, В.Е. Савицкого, Ю.И. Тесакова, В.В. Хоментовского. Новосибирск, 1983, 215 с.

Семихатов М.А. Верхний докембрий // Состояние изученности стратиграфии докембрия и фанерозоя России. Задачи дальнейших исследований. Постановления Межведомственного стратиграфического комитета и его постоянных комиссий. Вып. 38. СПб, Изд-во ВСЕГЕИ, 2008, с. 15—27.

Семихатов М.А., Комар Вл.А., Серебряков С.Н. Юдомский комплекс стратотипической местности. М., Наука, 1970, 235 с. (Тр. ГИН АН СССР, вып. 210).

Семихатов М.А., Кузнецов А.Б., Подковыров В.Н., Бартли Дж., Давыдов Ю.В. Юдомский комплекс стратотипической местности: С-изотопные хемостратиграфические корреляции и соотношение с вендом // Стратиграфия. Геологическая корреляция, 2004, т. 12, № 5, с. 3—28.

Семихатов М.А., Кузнецов А.Б., Чумаков Н.М. Изотопный возраст границ общих стратиграфических подразделений верхнего протерозоя (рифея и венда) России: эволюция взглядов и современная оценка // Стратиграфия. Геологическая корреляция, 2015, т. 23, № 6, с. 16—27.

Советов Ю.К., Комлев Д.А. Тиллиты в основании оселковой серии Присаянья и нижняя граница венда на юго-западе Сибирской платформы // Стратиграфия. Геологическая корреляция, 2005, т. 13, № 4, с. 3—34.

Соколов Б.С. Новейшие данные об исследованиях по проблеме границы силура и девона // Геология и геофизика, 1970 (6), с. 148—152.

Соколов Б.С. Экостратиграфия и экологические системы геологического прошлого // Экостратиграфические и экологические системы геологического прошлого. Труды XXII сессии Всесоюзного палеонтологического общества / Под ред. Д.Л. Степанова, Л.И. Зозацкого. Л., Наука, 1980, с. 4—12.

Соколов Б.С. Вендская система. Историко-геологическое и палеонтологическое обоснование // Вендская система. Историко-геологическое и палеонтологическое обоснование. Т. 2. Стратиграфия и геологические процессы / Под ред. Б.С. Соколова, М.А. Федонкина. М., Наука, 1985, с. 199—214.

Соколов Б.С. Экостратиграфия, ее место и роль в современной стратиграфии // Теория и опыт экостратиграфии / Под ред. Д.Л. Кальо, Э.Р. Клааманна. Таллинн, Валгус, 1986, с. 9—18.

Соколов Б.С. Очерки становления венда. М., КМК Лтд., 1997, 156 с.

Соколов Б.С. Хроностратирафическое пространство литосферы и венд как геоисторическое подразделение неопротерозоя // Геология и геофизика, 2011, т. 52 (10), с. 1334—1348.

Стратиграфический кодекс России. Издание третье, исправленное и дополненное / Ред. А.И. Жамойда. СПб, Изд-во ВСЕГЕИ, 2019, 96 с.

Хабаров Е.М., Изох О.П. Седиментология и изотопная геохимия рифейских карбонатных отложений Хараулахского поднятия севера Восточной Сибири // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (5—6), с. 797—820.

Хоментовский В.В., Федоров А.Б., Карлова Г.А. Нижняя граница кембрия во внутренних районах севера Сибирской платформы // Стратиграфия. Геологическая кореляция, 1998, т. 6, № 1, с. 3—11.

Чумаков Н.М., Семихатов М.А., Сергеев В.Н. Опорный разрез вендских отложений юга Сибирской платформы // Стратиграфия. Геологическая кореляция, 2013, т. 21, № 4, с. 26—51.

Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Сальникова Е.Б., Никифоров А.В., Котов А.Б., Владыкин Н.В. Позднерифейский рифтогенез и распад Лавразии: данные геохронологических исследований щелочно-ультраосновных комплексов южного обрамления Сибирской платформы // ДАН, 2005, т. 404, № 3, с. 400—406.

Ahm A.-S.C., Bjerrum C.J., Hoffman P.F., Macdonald F.A., Maloof A.C., Rose C.V., Strauss J.V., Higgins J.A. The Ca and Mg isotope record of the Cryogenian Trezona carbon isotope excursion // Earth Planet. Sci. Lett., 2021, v. 568, article 117002, doi: 10.1016/j.epsl.2021.117002.

Aitken J.D. The Ice Brook Formation and post-Rapitan, Late Proterozoic glaciation, Mackenzie Mountains, Northwest Territories // Geol. Surv. Can. Bull., 1991, v. 19, p. 445–448.

Amthor J.E., Grotzinger J.P., Schröder S., Bowring S.A., Ramezani J., Martin M.W., Matter A. Extinction of *Cloudina* and *Namacalathus* at the Precambrian—Cambrian boundary in Oman // Geology, 2003, v. 31, p. 431—434, doi: 10.1130/0091-7613(2003)031<0431:EOCANA>2.0.CO;2.

Anderson M.M., King A.F. Precambrian tillites of the Conception Group on the Avalon Peninsula, south-eastern Newfoundland // Earth's pre-Pleistocene glacial record / Eds. M.J. Hambrey, W.B. Harland. Cambridge, Cambridge University Press, 1981 p. 760—767.

Anderson R.P., Macdonald F.A., Jones D.S., McMahon S., Briggs D.E.G. Doushantuo-type microfossils from latest Ediacaran phosphorites of northern Mongolia // Geology, 2017, v. 45, p. 1079—1082, doi: 10.1130/G39576.1.

Bjerrum C.J., Canfield D.E. Towards a quantitative understanding of the late Neoproterozoic carbon cycle // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., 2011, v. 108, p. 5542—5547, doi: 10.1073/pnas.1101755108.

Brasier M.D., Khomentovsky V.V., Corfield R.M. Stable isotopic calibration of the earliest skeletal fossil assemblages in eastern Siberia (Precambrian—Cambrian boundary) // Terra Nova, 1993, v. 5, p. 225—232.

Bowyer F., Zhuravlev A., Wood R., Zhao F., Sukhov S.S., Alexander R., Poulton S.W., Zhu M. Implications of an integrated late Ediacaran to early Cambrian stratigraphy of the Siberian Platform, Russia // Geol. Soc. Am. Bull., 2023, v. 135 (9–10), p. 2428–2450, doi: 10.1130/B36534.1.

Bowring S.A., Grotzinger J.P., Isachsen C.E., Knoll A.H., Pelechaty S.M., Kolosov P. Calibrating rates of early Cambrian evolution // Science, 1993, v. 261, p. 1293—1298.

Bowring S., Myrow P., Landing E., Ramezani J., Grotzinger J. Geochronological constraints on terminal Neoproterozoic events and the rise of metazoans // Geophys. Res. Abstr., 2003, v. 5, 13219.

Burns S.J., Matter A. Carbon isotopic record of the latest Proterozoic from Oman // Eclogae geol. Helv., 1993, v. 86, p. 595–607.

Burzin M.B. Late Vendian (Neoproterozoic III) microbial and algal communities of the Russian Platform: models of facies-dependent distribution, evolution and reflection of basin development // Riv. Ital. di Paleontol. e Stratigr., 1996, v. 102, p. 307—316.

Busch J.F., Hodgin E.B., Ahm A.-S.C., Husson J.M., Macdonald F.A., Bergmann K.D., Higgins J.A., Strauss J.V. Global and local drivers of the Ediacaran Shuram carbon isotope excursion // Earth Planet. Sci. Lett., 2022, v. 579, article 117368, doi: 10.1016/j.epsl.2022.117368.

Cherry L.B., Gilleaudeau G.J., Grazhdankin D.V., Romaniello S.J., Martin A.J., Kaufman A.J. A diverse Ediacara assemblage survived under low-oxygen conditions // Nat. Commun., 2022, v. 13, article 7306, doi: 10.1038/s41467-022-35012-y.

Condon D., Zhu M., Bowring S., Wang W., Yang A., Jin Y. U-Pb ages from the Neoproterozoic Doushantuo Formation, China // Science, 2005, v. 308, p. 95–98.

Cozzi A., Allen P.A., Grotzinger J.P. Understanding carbonate ramp dynamics using δ^{13} C profiles: examples from the Neoproterozoic Buah Formation of Oman // Terra Nova, 2004, v. 16, p. 62—67.

Cui H., Grazhdankin D.V., Xiao S., Peek S., Rogov V.I., Bykova N.V., Sievers N.E., Liu X.-M., Kaufman A.J. Redox-dependent distribution of early macro-organisms: Evidence from the terminal Ediacaran Khatyspyt Formation in Arctic Siberia // Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol., 2016, v. 461, p. 122–139, doi: 10.1016/j.palaeo.2016.08.015.

Cui H., Kaufman A.J., Xiao S., Zhou C., Liu X.-M. Was the Ediacaran Shuram Excursion a globally synchronized early diagenetic event? Insights from methane-derived authigenic carbonates in the uppermost Doushantuo Formation, South China // Chem. Geol., 2017, v. 450, p. 59—80, doi: 10.1016/j.chem-geo.2016.12.010.

Derry L.A. A burial diagenesis origin for the Ediacaran Shuram—Wonoka carbon isotope anomaly // Earth Planet. Sci. Lett., 2010, v. 294, p. 152—162, doi: 10.1016/j.epsl.2010.03.022.

Fike D.A., Grotzinger J.P., Pratt L.M., Summons R.E. Oxidation of the Ediacaran Ocean // Nature, 2006, v. 444, p. 744—747, doi: 10.1038/nature05345.

Font E., Nédélec A., Trindade R.I.F., Morea C. Fast or slow melting of the Marinoan snowball Earth? The cap dolostone record // Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol., 2010, v. 295, 215—225, doi: 10.1016/j. palaeo.2010.05.039.

Gladkochub D.P., Pisarevsky S.A., Donskaya T.V., Natapov L.M., Mazukabzov A.M., Stanevich A.M., Sklyarov E.V. Siberian Craton and its evolution in terms of Rodinia hypothesis // Episodes, 2006, v. 29, p. 169–174.

Grazhdankin D. Patterns of distribution in the Ediacaran biotas: facies versus biogeography and evolution // Paleobiology, 2004, v. 30, p. 203—221, doi: 10.1666/0094-8373(2004)030<0203:PODITE>2.0.CO;2.

Grazhdankin D. Patterns of evolution of the Ediacaran soft-bodied biota // J. Paleont., 2014, v. 88, p. 269—283, doi: 10.1666/13-072.

Grazhdankin D.V., Balthaar U., Nagovitsin K.E., Kochnev B.B. Carbonate-hosted Avalon-type fossils in arctic Siberia // Geology, 2008, v. 36, p. 803—806. doi: 10.1130/G24946A.1.

Grazhdankin D.V., Marusin V.V., Izokh O.P., Karlova G.A., Kochnev B.B., Markov G.E., Nagovit-

sin K.E., Sarsembaev Zh., Peek S., Cui H., Kaufman A.J. Quo vadis, Tommotian? // Geol. Mag., 2020, v. 157, p. 22—34, doi:10.1017/S0016756819001286.

Grey K. Ediacaran palynology of Australia // Mem. Assoc. Australas. Palaeontol. V. 31. Canberra, AAP, 2005, 439 p.

Grotzinger J.P., Knoll A.H. Anomalous carbonate precipitates: is the Precambrian the key to the Permian? // Palaios, 1995, v. 10, p. 578—596.

Grotzinger J.P., Bowring B.Z., Saylor B.Z., Kaufman A.J. Biostratigraphic and geochronological constrains on early animal evolution // Science, 1995, v. 270, p. 598—604.

Grotzinger J.P., Fike D.A., Fischer W.W. Enigmatic origin of the largest-known carbon isotope excursion in Earth's history // Nat. Geosci., 2011, v. 4, p. 285—292, doi: 10.1038/NGEO1138.

Halverson G. A Neoproterozoic chronology // Neoproterozoic geobiology and paleobiology. Topics in geobiology. V. 27 / Eds. S. Xiao, A. Kaufman. New York, Springer, 2006, p. 231–271.

Halverson G., Hoffman P., Schrag D., Maloof A., Rice A. Towards a Neoproterozoic composite carbon isotope record // Geol. Soc. Am. Bull., 2005, v. 117, p. 1181–1207.

Halverson G.P., Wade B.P., Hurtgen M.T., Barovich K.M. Neoproterozoic chemostratigraphy // Precambrian Res., 2010, v. 182, p. 337—350.

Halverson G., Porter S., Shields G. The Tonian and Cryogenian periods // Geologic Time Scale 2020. V. 1 / Eds. F.M. Gradstein, J.G. Ogg, M.D. Schmitz, G.M. Ogg. Elsevier, 2020, p. 495—519. doi: 10.1016/b978-0-12-824360-2.00017-6.

Hambrey M.J., Harland W.B. The late Proterozoic glacial era // Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol., 1985, v. 51, p. 255–272.

Hoffman P.F., Schrag D.P. The Snowball Earth hypothesis: testing the limits of global change // Terra Nova, 2002, v. 14, p. 129–155.

Hoffman P.F., Kaufman A.J., Halverson G.P., Schrag D.P. A Neoproterozoic snowball earth // Science, 1998, v. 281, p. 1342—1346.

Hoffmann K.H., Condon D.J., Bowring S.A., Crowley J.L. U—Pb zircon date from the Neoproterozoic Ghaub Formation, Namibia. Constraints on Marinoan glaciation // Geology, 2004, v. 32, p. 817—820, doi: 10.1130/G20519.1.

Hofmann G.E., Smith J.E., Johnson K.S., Send U., Levin L.A., Micheli F., Paytan A., Price N.N., Peterson B., Takeshita Y., Matson P.G., Crook E.D., Kroeker K.J., Gambi M.C., Rivest E.B., Frieder C.A., Yu P.C., Martz T.R. High-frequency dynamics of ocean pH: a multi-ecosystem comparison // PloS ONE, 2011, v. 6, article e28983, doi: 10.1371/journal.pone.0028983.

International Stratigraphic Guide — An abridged version / Eds. M.A. Murphy, A. Salvador // Episodes, 1999, v. 22, p. 255–272.

Ivantsov A.Yu. Vendian macrofossils of the Yudoma Group, southeast of the Siberian Platform // Paleon-tol. J., 2018, v. 52 (12), p. 1335—1346, doi: 10.1134/S0031030118120092.

James N.P., Narbonne G.M., Kyser T.K. Late Neoproterozoic cap carbonates: Mackenzie Mountains, northwestern Canada: precipitation and global glacial meltdown // Can. J. Earth Sci., 2001, v. 38, p. 1229—1262, doi: 10.1139/e01-046.

Jiang G., Sohl L.E., Christie-Blick N. Neoproterozoic stratigraphic comparison of the Lesser Himalaya (India) and Yangtze Block (South China): paleogeographic implications // Geology, 2003, v. 31, p. 917—920, doi: 10.1130/G19790.1.

Jiang G., Kennedy M.J., Christie-Blick N., Wu H., Zhang S. Stratigraphy, sedimentary structures and textures of the late Neoproterozoic Doushantuo cap carbonate in South China // J. Sediment. Res., 2006, v. 76, p. 978—995, doi: 10.2110/jsr.2006.086.

Jiang G., Kaufman A.J., Christie-Blick N., Zhang S., Wu H. Carbon isotope variability across the Ediacaran Yangtze platform in South China: implications for a large surface-to-deep ocean δ^{13} C gradient // Earth Planet. Sci. Lett., 2007, v. 261, p. 303—320, doi:10.1016/j.epsl.2007.07.009.

Kaufman A.J. The Ediacaran-Cambrian transition: a resource-based hypothesis for the rise and fall of the Ediacara biota // Chemostratigraphy across major chronological boundaries. Geophysical monograph 240. First Edition / Eds. by A.N. Sial, C. Gaucher, M. Ramkumar, V.P. Ferreira. Washington, Am. Geophys. Union, 2019, p. 115–142.

Kaufman A.J., Hayes J.M., Knoll A.H., Germs G.J.B. Isotopic compositions of carbonates and organic carbon from upper Proterozoic successions in Namibia: stratigraphic variation and the effects of diagenesis and metamorphism // Precambrian Res., 1991, v. 49, p. 301—327, doi: 10.1016/0301-9268(91)90039-D.

Kaufman A.J., Knoll A.H., Semikhatov M.A., Grotzinger J.P., Jacobsen S.B., Adams W. Integrated chronostratigraphy of Proterozoic—Cambrian boundary beds in the western Anabar region, northern Siberia // Geol. Mag., 1996, v. 133, p. 509—533, doi: 10.1017/S0016756800007810.

Kaufman A.J., Sovetov J.K., Peek S., Sievers N., Agbebakun K. Carbon, oxygen and strontium isotope stratigraphy of the Oselok Group, Sayan Mountains, Siberia // Guidebook on field trip to the East Sayan foothills. International conference «Neoproterozoic sedimentary basins. Stratigraphy, geodynamics and petroleum potential», Novosibirsk, IPGG SB RAS, 2011, p. 230–239.

Kaufman A.J., Kriesfeld L., Vickers-Rich P., Narbonne G. When life got hard: An environmental driver for metazoan biomineralization // Estud. Geol., 2019, v. 75, doi: 10.3989/egeol.43597.556.

Kennedy M.J. Stratigraphy, sedimentology, and isotope geochemistry of Australian Neoproterozoic postglacial cap dolostones: deglaciation, δ^{13} C excursions, and carbonate precipitation // J. Sed. Res., 1996, v. 66, p. 1050—1064, doi: 10.2110/jsr.66.1050.

Kennedy M.J., Christie-Blick N., Sohl L.E. Are Proterozoic cap carbonates and isotopic excursions a record of gas hydrate destabilization following Earth's coldest intervals? // Geology, 2001, v. 39, p. 443—446.

Knauth L.P., Kennedy M.J. The late Precambrian greening of the Earth // Nature, 2009, v. 460, p. 728—732, doi: 10.1038/nature08213, doi: 10.1038/nature08213.

Knoll A.H., Kaufman A.J., Grotzinger J.P., Kolosov P. Integrated approaches to terminal Proterozoic stratigraphy: an example from the Olenek Uplift, northern Siberia // Precambrian Res., 1995, v. 73, p. 251—270., doi: 10.1016/0301-9268(94)00081-2.

Knoll A.H., Bambach R.K., Canfield D.E., Grotzinger J.P. Comparative Earth history and late Permian mass extinction // Science, 1996, v. 273, p. 452—457, doi:10.1126/science.273.5274.452.

Kolesnikov A.V., Martin V.V., Nagovitsin K.E., Maslov A.V., Grazhdankin D.V. Ediacaran biota in the aftermath of the Kotlinian crisis: Asha Group of the South Urals // Precambrian Res., 2015, v. 263, p. 59—78, doi: 10.1016/j.precamres.2015.03.011.

Kouchinsky A., Bengtson S., Pavlov V.E., Runnegar B., Torssander P., Young E.D., Ziegler K. Carbon isotope stratigraphy of the Precambrian-Cambrian Sukharikha River section, northwestern Siberian Platform // Geol. Mag., 2007, v. 144, p. 1—10, doi: 10.1017/S0016756807003354.

Kouchinsky A., Bengtson S., Landing E., Steiner M., Vendrasco M., Ziegler K. Terreneuvian stratigraphy and faunas from the Anabar Uplift, Siberia // Acta Palaeontol. Pol., 2017, v. 62, p. 311–440.

Kumpulainen R.A., Hamilton M.A., Söderlund U., Nystuen J.P. U-Pb baddeleyite age for the Ottfjället Dyke Swarm, central Scandinavian Caledonides: new constraints on Ediacaran opening of the Iapetus Ocean and glaciations on Baltica // GFF, 2021, v. 143, p. 40–54, doi: 10.1080/11035897.2021.1888314.

Liivamägi S., Srodon J., Bojanowski M.J., Stanek J.J., Roberts N.M.W. Precambrian paleosols on the Great Unconformity of the East European Craton: An 800 million year record of Baltica's climatic conditions // Precambrian Res., 2021, v. 363, article 106327, doi: 10.1016/j.precamres.2021.106327.

Liu A.G., McIlroy D., Brasier M.D., Matthews J.J. Confirming the metazoan character of a 565 Ma trace-fossil assemblage from Mistaken Point, Newfoundland // Palaios, 2014, v. 29, p. 420—430, doi: 10.2120/palo.2014.011.

Liu P., Moczydłowska M. Ediacaran microfossils from the Doushantuo Formation chert nodules in the Yangtze Gorges area, South China, and new biozones // Fossils and Strata, 2019, № 65, p. 1—172.

Marusin V.V., Kochnev B.B., Karlova G.A., Nagovitsin K.E. Resolving Terreneuvian stratigraphy in subtidal-intertidal carbonates: palaeontological and chemostratigraphical evidence from the Turukhansk Uplift, Siberian Platform // Lethaia, 2019, v. 4, p. 464—485.

Matthews J., Liu A.G., Yang C., Mcilroy D. A chronostratigraphic framework for the rise of the Ediacaran macrobiota: new constraints from Mistaken Point ecological reserve, Newfoundland // Geol. Soc. Am. Bull., 2020, v. 133 (3—4), p. 612—624, doi: 10.1130/B35646.1.

McFadden K.A., Huang J., Chu X., Jiang G., Kaufman A.J., Zhou C., Yuan X., Xiao S. Pulsed oxidation and biological evolution in the Ediacaran Doushantuo Formation // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., 2008, v. 105, p. 3197—3202, doi: 10.1073/pnas.0708336105.

McFadden K.A., Xiao S., Zhou C., Kowalewski M. Quantitative evaluation of the biostratigraphic distribution of acanthomorphic acritarchs in the Ediacaran Doushantuo Formation in the Yangtze Gorges area, South China // Precambrian Res., 2009, v. 173, p. 170—190, doi: 10.1016/j.precamres.2009.03.009.

Meister P. Two opposing effects of sulfate reduction on carbonate precipitation in normal marine, hypersaline, and alkaline environments // Geology, 2013, v. 41, p. 499—502, doi: 10.1130/G34185.1.

Melezhik V.A., Pokrovsky B.G., Fallick A.E., Kuznetsov A.B., Bujakaite M.I. Constraints on ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr of Late Ediacaran seawater: insight from Siberian high-Sr limestones // Terra Nova, 2009, v. 21, p. 119—126, doi: 10.1111/j.1365-3121.2009.00864.x.

Morais L., Fairchild T.R., Freitas B.T., Rudnitzki I.D., Silva E.P., Lahr D., Moreira A.C., Abrahão Filho E.A., Leme J.M., Trindade R.I.F. Doushantuo—Pertatataka-like acritarchs from the late Ediacaran Bocaina Formation (Corumbá Group, Brazil) // Earth Sci. Front, 2021, v. 9, article 787011, doi: 10.3389/ feart.2021.787011.

Nédélec A., Affaton P., France-Lanord C., Charrière A., Alvaro J. Sedimentology and chemostratigraphy of the Bwipe Neoproterozoic cap dolostones (Ghana, Volta Basin): a record of microbial activity in a peritidal environment // C.R. Geoscience, 2007, v. 339, p. 223—239, doi: 10.1016/j.crte.2005.06.002.

Ouyang Q., Guan C., Zhou C., Xiao S. Acanthomorphic acritarchs of the Doushantuo Formation from an upper slope section in northwestern Hunan Province, South China, with implications for early—middle Ediacaran biostratigraphy // Precambrian Res., 2017, v. 298, p. 512—529, doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.pre-camres.2017.07.005.

Paszkowski M., Budzyń B., Mazur S., Sláma J., Shumlyanskyy L., Środoń J., Dhuime B., Kędzior A., Liivamägi S., Pisarzowska A. Detrital zircon U-Pb and Hf constraints on provenance and timing of T deposition of the Mesoproterozoic to Cambrian sedimentary cover of the East European Craton, Belarus // Precambrian Res., 2019, v. 331, article 105352, doi: 10.1016/j.precamres.2019.105352.

Peek S. Geochemical and radiometric constraints on the redox history of late Ediacaran oceans. Thesis submitted to the Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, College Park, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science, 2012, 168 p.

Peryt T.M., Hoppe A., Bechstadt T., Koster J., Pierre C., Richter D.K. Late Proterozoic aragonitic cement crusts, Bambu Group, Minas Gerais, Brazil // Sedimentology, 1990, v. 37, p. 279—286, doi: 10.1111/j.1365-3091.1990.tb00959.x.

Pelechaty S.M. Integrated chronostratigraphy of the Vendian System of Siberia: implications for a global stratigraphy // J. Geol. Soc., 1998, v. 155, p. 957—973, doi: 10.1144/gsjgs.155.6.095.

Pelechaty S.M., Kaufman A.J., Grotzinger J.P. Evaluation of δ^{13} C chemostratigraphy for intrabasinal correlation: Vendian strata of northeast Siberia // Geol. Soc. Am. Bull., 1996, v. 108, p. 992—1003, doi: 10.1130/0016-7606(1996)108<0992:EOCCFI>2.3.CO;2.

Prave A.R., Condon D.J., Hoffmann K.H., Tapster S., Fallick A.E. Duration and nature of the end-Cryogenian (Marinoan) glaciation // Geology, 2016, v. 44, p. 631—634, doi: https://doi.org/10.1130/G38089.1.

Pu J.P., Bowring S.A., Ramezani J., Myrow P., Raub T.D., Landing E., Mills A., Hodgin E., Macdonald F.A. Dodging snowballs: geochronology of the Gaskiers glaciation and the first appearance of the Ediacaran biota // Geology, 2016, v. 44, p. 955—958, doi: 10.1130/G38284.1.

Romanov M., Sovetov J.K., Vernikovsky V.A., Rosenbaum G., Wilde S.A., Vernikovskaya A.E., Matushkin N.Y., Kadilnikov P.I. Late Neoproterozoic evolution of the southwestern margin of the Siberian Craton: evidence from sedimentology, geochronology and detrital zircon analysis // Int. Geol. Rev., 2020, v. 63, p. 1658—1681, doi: 10.1080/00206814.2020.1790044.

Rooney A.D., Strauss J.V., Brandon A.D., Macdonald F.A. A Cryogenian chronology: two long-lasting synchronous Neoproterozoic glaciations // Geology, 2015, v. 43, p. 459—462, doi: 10.1130/G36511.1.

Rooney A.D., Cantine M.D., Bergmann K.D., Gómez-Pérez I., Baloushi B.A., Boag T.H., Busch J.F., Sperling E.A., Strauss J.V. Calibrating the coevolution of Ediacaran life and environment // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., 2020, v. 117, p. 16824—16830, doi: 10.1073/pnas.2002918117.

Rothman D.H., Hayes J.M., Summons R. E. Dynamics of the Neoproterozoic carbon cycle // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., 2003, v. 100, p. 8124—8129, doi: 10.1073/pnas.0832439100.

Rud'ko S.V., Kuznetsov A.B., Petrov P.Yu., Sitkina D.R., Kaurova O.K. Pb-Pb dating of the Dal'nyaya Taiga Group in the Ura uplift of southern Siberia: Implications for correlation of C-isotopic and biotic events in the Ediacaran // Precambrian Res., 2021, v. 362, artcile 106285, doi: 10.1016/j.precamres.2021.106285.

Saylor B.Z., Kaufman A.J., Grotzinger J.P., Urban F. A composite reference section for terminal Proterozoic strata of southern Namibia // J. Sediment. Res., 1998, v. 68, p. 1223—1235.

Schrag D.P., Higgins J.A., Macdonald F.A., Johnston D.T. Authigenic carbonate and the history of the global carbon cycle // Science, 2013, v. 339, p. 540—543.

Schmitz M.D. Appendix 2 — Radiometric ages used in GTS2012 // The geologic time scale 2012 / Eds. F. Gradstein, J. Ogg, M.D. Schmitz, G. Ogg. Boston, Elsevier, 2012, p. 1045—1082.

Scott R.W., Brett C., Fluegeman R., Pratt B.R. North American Commission on stratigraphic nomenclature Note 71 — Application for addition of chemostratigraphic units to the North American Stratigraphic Code: A case for formalizing chemostratigraphic units // Stratigraphy, 2020, v. 17, p. 135—139, doi: 10.29041/ strat.17.2.135-139. **Sokolov B.S., Fedonkin M.A.** The Vendian as the terminal system of the Proterozoic // Episodes, 1984, v. 7, p. 12—19.

Sovetov J.K. Late Cryogenian (Vendian) glaciogenic deposits in the Marnya Formation, Oselok Group, in the foothills of the East Sayan Range, southwestern Siberian Craton // The geological record of Neoproterozioc glaciations / Eds. E. Arnaud, G.P. Halverson, G. Schields-Zhou. Geol. Soc. Lond. Mem., v. 36. London, Geol. Soc. Lond., 2011, p. 317—329.

Środoń J., Gerdes A., Kramers J., Bojanowski M.J. Age constraints of the Sturtian glaciation on western Baltica based on U-Pb and Ar-Ar dating of the Lapichi Svita // Precambrian Res., 2022, v. 371, article 106595, doi: 10.1016/j.precamres.2022.106595.

Środoń J., Condon D.J., Golubkova E., Millar I.L., Kuzmenkova O., Paszkowski M., Mazur S., Kędzior A., Drygant D., Ciobotaru V., Liivamägi S. Ages of the Ediacaran Volyn-Brest trap volcanism, glaciations, paleosols, Podillya Ediacaran soft-bodied organisms, and the Redkino-Kotlin boundary (East European Craton) constrained by zircon single grain U—Pb dating // Precambrian Res., 2023, v. 386, article 106962, doi: 10.1016/j.precamres.2023.106962.

Tahata M., Ueno Y., Ishikawa T., Sawaki Y., Murakami K., Han J., Shu D., Li Y., Guo J., Yoshida N., Komiya T. Carbon and oxygen isotope chemostratigraphies of the Yangtze platform, South China: decoding temperature and environmental changes through the Ediacaran // Gondwana Res., 2013, v. 23, p. 333—353, doi: 10.1016/j.gr.2012.04.005.

Tziperman E., Halevy I., Johnston D.T., Knoll A.H., Schrag D.P. Biologically induced initiation of Neoproterozoic snowball-Earth events // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., 2011, v. 108, p. 15091—15096, doi: 10.1073/pnas.1016361108.

Veizer J., Compston W. ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr in Precambrian carbonates as an index of crustal evolution // Geochim. Cosmochim. Acta, 1976, v. 40, p. 905—914, doi: 10.1016/j.gr.2021.03.013.

Veizer J., Hoefs J. The nature of O^{18}/O^{16} and C^{13}/C^{12} secular trends in sedimentary carbonate rocks // Geochim. Acta, 1976, v. 40, p. 1387—1395, doi: 10.1016/0016-7037(76)90129-0.

Vorob'eva N.G., Sergeev V.N., Knoll A.H. Neoproterozoic microfossils from the margin of the East European Platform and the search for a biostratigraphic model of lower Ediacaran rocks // Precambrian Res., 2009a, v. 173, p. 163—169, doi: 10.1016/j.precamres.2009.04.001.

Vorob'eva N.G., Sergeev V.N., Knoll A.H. Neoproterozoic microfossils from the northeastern margin of the East European Platform // J. Paleontol., 2009b, v. 83, p. 161–196, doi: 10.1666/08-064.1.

Wood R., Curtis A., Penny A., Zhuravlev A.Yu., Curtis-Walcott S., Iipinge S., Bowyer F. Flexible and responsive growth strategy of the Ediacaran skeletal *Cloudina* from the Nama Group, Namibia // Geology, 2017, v. 45, p. 259—262.

Wood R., Liu A.G., Bowyer F., Wilby P.R., Dunn F.S., Kenchington C.G., Hoyal Cuthill J.F., Mitchell E.G., Penny A. Integrated records of environmental change and evolution challenge the Cambrian Explosion // Nat. Ecol. Evol., 2019, v. 3, p. 528—538, doi: 10.1038/s41559-019-0821-6

Xiao S., Narbonne G.M., Zhou C., Laflamme M., Grazhdankin D.V., Moczydłowska-Vidal M., Cui H. Towards an Ediacaran time scale: problems, protocols, and prospects // Episodes, 2016, v. 39. p. 540—555, doi: 10.18814/epiiugs/2016/v39i4/103886.

Xiao S., Chen Z., Pang K., Zhou C., Yuan X. The Shibantan lagerstätte: insights into the Proterozoic— Phanerozoic transition // J. Geol. Soc. London, 2021, v. 178, article jgs2020—135, doi: 10.1144/jgs2020-135.

Yang C., Rooney A.D., Condon D.J., Li X., Grazhdankin D.V., Bowyer F.T., Hu C., Macdonald F.A., Zhu M.Y. The tempo of Ediacaran evolution // Sci. Adv., 2021, v. 7, article eabi9643, doi: 10.1126/sciadv. abi9643.

Yu W., Algeo T.J., Zhou Q., Du Y., Wang P. Cryogenian cap carbonate models: a review and critical assessment // Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol, 2020, v. 552, article 109727, doi: 10.1016/j.palaeo.2020.109727.

Zhuravlev A.Yu., Liñán E., Gámez Vintaned J.A., Debrenne F., Fedorov A.B. New finds of skeletal fossils in the terminal Neoproterozoic of the Siberian Platform and Spain // Acta Palaeontol. Pol., 2012, v. 57, p. 205—224.