

УДК 551.735.1

DOI: 10.24930/2500-302X-2025-25-3-398-418

Особенности распределения изотопного состава углерода в карбонатах разреза сартъюской свиты (нижний карбон, Воркутинское поднятие)

А. В. Ерофеевский¹, А. Н. Плотичын¹, А. В. Журавлев¹, Я. А. Вевель¹, Р. М. Иванова²

¹Институт геологии им. академика Н.П. Юшкина ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 167982, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, 54, e-mails: averofeevsky@geo.komisc.ru; anplotitsyn@rambler.ru

²Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, 620110, г. Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, 15, e-mail: geoivanur@mail.ru

Поступила в редакцию 24.06.2024 г., принята к печати 22.08.2024 г.

Объект исследования. Изотопный состав углерода и кислорода карбонатов породы и раковин брахиопод в разрезе верхней части сартъюской свиты (нижний карбон, Воркутинское поднятие). **Цель.** Сравнительная оценка сохранности материала и вариаций изотопного состава углерода и кислорода в раковинах брахиопод и вмещающей породе на примере в значительной степени вторично преобразованных отложений. **Материал и методы.** Стратиграфическую основу составили данные по фораминиферам, конодонтам и брахиоподам. Изотопный анализ углерода и кислорода карбонатов раковин брахиопод и вмещающей породы проведен для 76 образцов из 35 уровней в пределах верхней части серпуховского яруса. При оценке пригодности карбонатных компонентов для реконструкции исходного изотопного состава древней морской воды использованы данные о перекристаллизации карбонатов, содержание органического углерода, соотношение изотопного состава углерода и кислорода, катодолуминесценция, таксономическая принадлежность брахиопод. **Результаты.** Изучение изотопного состава углерода показало существенные различия изотопных составов раковин брахиопод и вмещающей породы. Нижняя часть разреза (около 4.3 м) характеризуется утяжелением изотопного состава углерода раковинного материала от 2 до 4.1‰. Выше по разрезу (следующие 2.5 м) происходит резкое увеличение значений $\delta^{13}\text{C}$ до 7.3‰ (образец с *Davidsonina carbonaria*), затем снижение до 3.4‰ и, наконец, наблюдается разброс значений $\delta^{13}\text{C}$ от 1.2 до 6‰ в прикровельной части. При этом изотопный состав углерода известняков довольно однороден по всему разрезу ($\delta^{13}\text{C}$ от –0.2 до 2.6‰, среднее значение 1.0‰), демонстрируя в то же время незначительный негативный тренд в верхней части. Предполагается, что изотопный состав углерода изученных образцов известняков сильно изменен вторичными процессами. Карбонат раковин брахиопод, предположительно, обладает изотопным составом углерода, близким к равновесному с бикарбонатом морской воды палеобассейна. Однако у представителей рода *Davidsonina* отмечено значительное (на 4–6‰) утяжеление изотопного состава углерода относительно других таксонов. Средние значения $\delta^{18}\text{O}$ известняков составляют 21.3‰ SMOW (отвечает –9.3‰ PDB), а раковин брахиопод – 22.2‰ (отвечает –8.4‰ PDB), что исключает первичную природу изотопного состава кислорода. **Выводы.** Изученный материал показал хорошую сохранность изотопного состава углерода в раковинах брахиопод даже в случае существенной перекристаллизации вмещающих карбонатов. Утяжеление изотопного состава углерода в раковинном материале представителей рода *Davidsonina* объясняется возможным “жизненным эффектом”, что затрудняет использование изотопных данных, полученных по раковинам этих брахиопод, для изотопной стратиграфии. В целях корректной изотопно-стратиграфической интерпретации вариаций изотопного состава углерода в разрезах необходимо изучение таксономически однородных выборок в рамках как минимум одного рода.

Ключевые слова: изотопный состав углерода, карбонаты, брахиоподы, *Davidsonina*, нижний карбон, Предуральский краевой прогиб

Источник финансирования

Работа выполнена в рамках госбюджетных тем № 1220406000010-8, 1220406000008-5, 123011800010-5

Distribution features of carbon isotopes in carbonates on the example of the Sartiu Formation (Lower Carboniferous, Vorkuta Uplift)

Andrey V. Erofeevsky¹, Artem N. Plotitsyn¹, Andrey V. Zhuravlev², Yadviga A. Vevel¹, Rimma M. Ivanova²

Для цитирования: Ерофеевский А.В., Плотичын А.Н., Журавлев А.В., Вевель Я.А., Иванова Р.М. (2025) Особенности распределения изотопного состава углерода в карбонатах разреза сартъюской свиты (нижний карбон, Воркутинское поднятие). *Литосфера*, 25(3), 398–418. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-3-398-418>. EDN: DJVLTP

For citation: Erofeevsky A.V., Plotitsyn A.N., Zhuravlev A.V., Vevel Ya.A., Ivanova R.M. (2025) Distribution features of carbon isotopes in carbonates on the example of the Sartiu Formation (Lower Carboniferous, Vorkuta Uplift). *Lithosphere (Russia)*, 25(3), 398–418. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-3-398-418>. EDN: DJVLTP

¹N.P. Yushkin Institute of Geology, FRC Komi SC UB RAS, 54 Pervomaiskaya st., Syktyvkar 167982, Russia,
e-mails: averofeevsky@geo.komisc.ru; anplotitzyn@rambler.ru

²A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS, 15 Academician Vonsovsky st., Ekaterinburg 620110, Russia,
e-mail: geoivanur@mail.ru

Received 24.06.2024, accepted 22.08.2024

Research subject. The carbon and oxygen isotope composition of rock carbonates and brachiopod shells in the section of the upper part of the Sartiu Formation (Mississippian, Vorkuta uplift). **Aim.** Comparative evaluation of isotopic signal preservation in brachiopod shells and host rock on the example of strongly secondary altered sediments. **Methods.** Data on foraminifera, conodonts, and brachiopods formed the stratigraphic framework. Carbon and oxygen isotope analyses of carbonates of brachiopod shells and host rock, accompanied by screening tests, were determined for 76 samples from 35 levels within the upper part of the Serpukhovian Stage. Data on carbonate recrystallisation, organic carbon content, carbon-oxygen isotope ratio, cathodoluminescence, and taxonomic affiliation of brachiopods were used for screening. **Results.** The data on carbon isotope composition showed significant differences in isotopic signals in brachiopod shells and in the host rock. The lower part of the section (approximately 4.3 m) is characterized by a heavying of the carbon isotopic composition of the shell material from 2.0 to 4.1‰. Higher up the section (next 2.5 m), a sharp increase in $\delta^{13}\text{C}$ up to 7.3‰ is observed (sample with *Davidsonina carbonaria*) followed by a decrease to 3.4‰ and then a scatter of values from 1.2 to 6‰ in the uppermost part. At the same time, the carbon isotope composition of limestones shows rather stable values along the entire section (from –0.2 to 2.6‰, mean value 1.0‰), showing a slight negative trend towards the upper part. According to the screening tests, all limestone samples show a highly altered signal by secondary processes; however, brachiopod shell carbonate is assumed to have a near-primary isotopic composition. At the same time, the isotopic composition of brachiopod shells strongly depends on taxonomic affiliation. In representatives of the *Davidsonina* genus, a significant (by 4–6‰) heavying of the carbon isotopic composition was noted. The average $\delta^{18}\text{O}$ values of limestones are 21.3‰ SMOW (corresponding to –9.3‰ PDB) and brachiopod shells 22.2‰ (corresponding to –8.4‰ PDB), which rules out the primary nature of oxygen isotopic composition. **Conclusions.** The studied material showed good preservation of the isotopic signal in brachiopod shells even in the case of significant recrystallisation of the host carbonates. The significant vital effect characteristic of representatives of the *Davidsonina* genus makes it difficult to use isotopic data obtained from these brachiopod shells for the purposes of isotopic stratigraphy. For correct isotope-stratigraphic interpretation of variations in carbon isotope composition in sections, taxonomically homogeneous samples within at least one genus should be studied.

Keywords: carbon isotopic composition, carbonates, brachiopods, *Davidsonina*, Mississippian, Cis-Urals foredeep

Funding information

The work was carried out within the framework of the state order of the Institute of Geology of Komi SC UB RAS. Project Nos. 1220406000010-8, 1220406000008-5, 123011800010-5

Acknowledgements

The authors express their gratitude to I.V. Smoleva for conducting isotope analyses, S.T. Neverov for assistance during field studies, and anonymous reviewers for constructive comments that allowed us to improve the work.

ВВЕДЕНИЕ

Изотопный состав углерода и кислорода карбонатов широко используется в изотопной стратиграфии (Mii et al., 1999; Saltzman, 2002; Saltzman, Thomas, 2012; Al-Husseini, Ruebsam, 2020; Gröcke, 2020; Zhuravlev et al., 2020; и мн. др.). Кроме стратиграфических исследований, значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ и $\delta^{18}\text{O}_{\text{карб}}$ применяются при проведении палеоокеанологических и палеоклиматических построений (Mii et al., 1999, 2001; Hayes et al., 1999; Saltzman et al., 2004). При этом для корректной интерпретации изотопного состава углерода и кислорода необходима уверенность в его первичности или сла-

бой искаженности вторичными преобразованиями. Иначе возникает проблема с применением карбонатных пород в качестве образцов для изотопного анализа (Killingley, 1983; Lohmann, 1988; Immenhauser et al., 2003). Другими альтернативными объектами исследований в изотопной стратиграфии являются ископаемые органические остатки (см.: Wefer, Berger, 1991; Gröcke, 2020), в том числе брахиоподы. Раковины брахиопод, по мнению многих исследователей, сохраняют изотопный состав углерода и кислорода, отражающий условия окружающей среды, в которой жил организм (Popp et al., 1986; Buening, 2001; Brand et al., 2012). Однако чаще всего предпочтение отдается осадочному ми-

криту как более доступному материалу, позволяющему получить представительные серии данных по разрезу (Saltzman, Thomas, 2012).

Считается, что материал раковин ринхонеллиформных брахиопод, который образовался в процессе их жизнедеятельности, находится в изотопном равновесии с бикарбонатом морской воды бассейна седиментации (Lowenstam, 1961). Большинство раковин брахиопод, белемнитов и фораминифер состоит из низкомagneзиального кальцита (Jope, 1965; Veizer et al., 1999), представляющего собой устойчивый к диагенетическим изменениям материал карбонатного скелета (Al-Assam, Veizer, 1982; Brand, 1989; Van Geldern et al., 2006; Brand et al., 2011). При этом наиболее диагенетически устойчивым материалом у раковин брахиопод на основании исследований текстуры, геохимического состава и катодолюминесценции считается вторичный (волоконистый) или третичный (призматический) слой (Popp et al., 1986, Grossman et al., 1996), но их диагенетическая стабильность иногда ставится под сомнение (Rush, Chafetz, 1990).

В некоторых случаях таксономическая принадлежность брахиопод оказывает существенное влияние на изотопный состав (Grossman et al., 1991; Mii et al., 1999), а в других – существенных различий не отмечается (Lee, Wan, 2000). При этом установлено, что спирифериды, ринхонеллиды и ортиды имеют достаточно толстый вторичный слой раковины, который, вероятно, формировался в изотопном равновесии с окружающей морской водой или близко к нему (Samtleben et al., 2001). Таким образом, карбонат раковин брахиопод в целом представляется более перспективным для проведения изотопно-геохимических исследований. Однако до конца не ясна степень влияния существенных вторичных изменений на преобразование изотопного состава раковинного материала брахиопод.

Основная проблема состоит в доказательстве первичности измеренного изотопного состава. Обычно она решается “скрининг-тестами”, применяемыми как к микриту породы, так и к раковинному веществу брахиопод (Brand, Legrand-Blain, 1993; Brand et al., 2012). Под “скрининг-тестами” понимается комплекс диагностических методов (визуальный и оптический осмотр, исследование микроструктур, катодная люминесценция, распределение микроэлементов и др.), направленный на оценку пригодности карбонатных компонентов для реконструкции исходного изотопного состава древней морской воды, а также степени их диагенетических изменений (см. обзор в (Brand et al., 2011)).

В разрезах складчатых областей значительная часть образцов не проходят “скрининг-тесты” из-за существенных вторичных преобразований (перекристаллизации, доломитизации) отложений. Например, в разрезах турнейского яруса нижне-

го карбона на Приполярном Урале “скрининговые тесты” не проходят около половины всех образцов карбонатных пород (Zhuravlev et al., 2020).

Цель данной работы состоит в сравнительной оценке сохранности и вариаций изотопного состава углерода в раковинах брахиопод и вмещающей породе на примере в значительной степени вторично преобразованных отложений. Для выяснения этого вопроса изучены образцы, характеризующие раковины брахиопод и вмещающую породу, из верхней части сартъюской свиты (нижний карбон) в зоне Главного Западноуральского надвига (ГЗУН) (разрез в бассейне р. Малая Уса, полярная часть Предуральского краевого прогиба) (рис. 1).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Статья базируется на данных (каменный и палеонтологический материал, литологическая колонка и описание разреза), полученных из верхней части сартъюской свиты, которая была описана авторами в 2017 г. в районе слияния руч. Мал. и Бол. Пайсошор и по руч. Пайсошор (нижнее течение р. Мал. Уса, Полярный Урал) (для более подробной информации см. раздел “Характеристика разреза”). В данной работе использованы результаты изучения 76 образцов из 35 уровней из нижней части обн. *mul8b*, характеризующих раковины брахиопод (40 проб) и вмещающую породу (36 проб). Отбор образцов происходил в пределах небольшого интервала разреза (7.6 м по мощности) с шагом от 10 до 60 см (в среднем 10–20 см). Из всех образцов были изготовлены шлифы, а также проведено изучение изотопного состава углерода и кислорода карбонатов. В описании разреза использована гранулометрическая классификация обломочных карбонатов по (Дмитриева и др., 1968): детрит грубый (1–2 мм), крупный (0.5–1 мм), средний (0.25–0.5 мм), мелкий (0.10–0.25 мм), тонкий (0.05–0.10 мм).

Биостратиграфическая привязка образцов осуществлена на основе данных по фораминиферам и редким находкам конодонтов. Сохранность структуры стенки раковин брахиопод изучалась в поперечных и продольных срезах при помощи сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Axia ChemiSEM LoVac с выдвижным детектором для цветовой и панхроматической регистрации катодолюминесценции в режиме высокого вакуума на базе ЦКП “Геонаука” (г. Сыктывкар). Образцы были запечатаны в эпоксидной смоле, разрезаны вдоль продольных и поперечных сечений, затем пластины (0.5 см) протравливались 10%-й уксусной кислотой в течение 5 с и напылялись углеродом. Эмиссия катодолюминесценции регистрировалась при ускоряющем напряжении от 10 до 30 кВ и токе пучка 0.2 мА. Шлифы изучались под поляризационным микроскопом ПЛМ-215. Оцен-

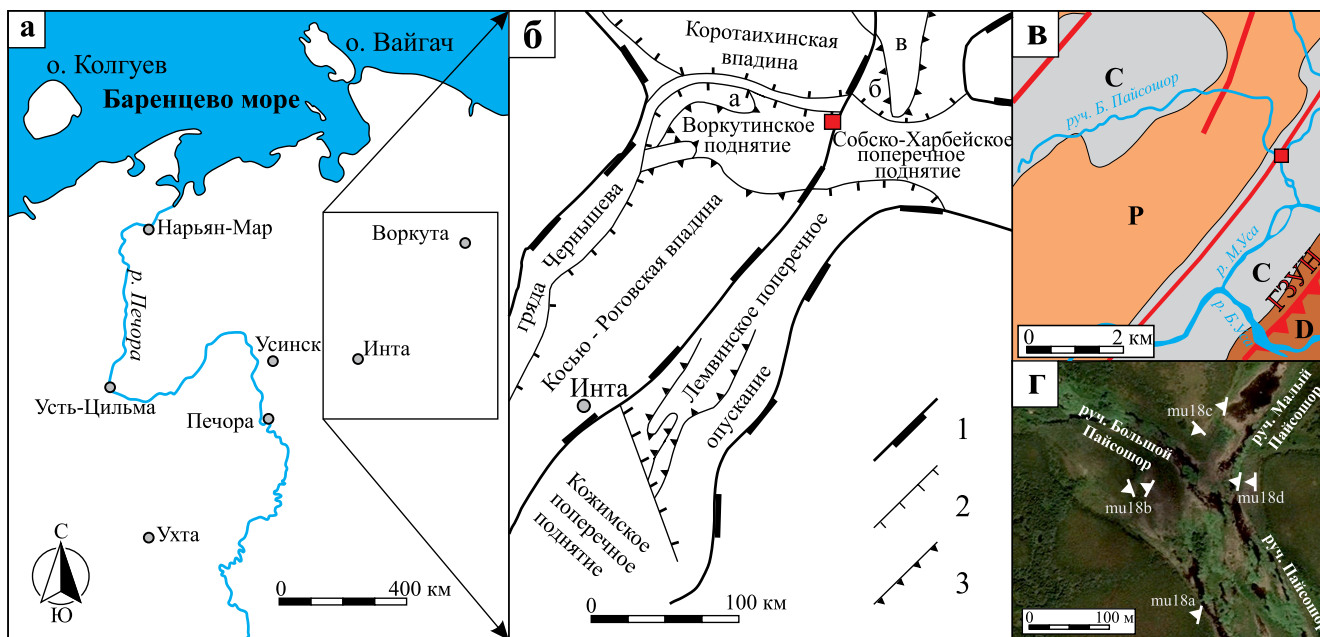


Рис. 1. Схема расположения обнажений mul8a–mul8d сарт'юской свиты в месте слияния руч. Мал. Пайсошор и Бол. Пайсошор (правый приток р. Мал. Уса).

а – обзорная схема Европейского Северо-Востока России.
б – схема тектонического районирования северной части западной зоны Уральской складчато-надвиговой области и Предуральяского краевого прогиба, по (Тимонин, 1998). Границы структур: 1 – надпорядковых, 2 – первого порядка, 3 – второго порядка; структуры: а – Падимейская ступень, б – Верхнеусинское опускание, в – Оченырское поднятие.
в – геологическая схема района слияния рр. Бол. Уса и Мал. Уса, по (Шишкин и др., 2013) с упрощениями и изменениями.
г – схема расположения обнажений.

Fig. 1. Location scheme of mul8a–mul8d outcrops of the Sart'yu Formation at the confluence of the Malaya Paisoshor and Bolshoi Paisoshor streams (right tributary of the Malaya Usa River).

а – overview scheme of the European north-east of Russia.
б – tectonic scheme of the northern part of the western zone of the Urals and Cis-Urals, from (Timonin, 1998). Boundaries of structures: 1 – supra-order, 2 – first-order, 3 – second-order; structures: а – Padimey step, б – Verkhnyaya Usa downlift, в – Ochenird uplift.
в – geological scheme of the confluence of the Bolshaya Usa and Malaya Usa rivers, from (Shishkin et al., 2013) with simplifications and modifications.
г – outcrop location scheme.

ка размера кристаллитов карбоната проводилась на том же микроскопе с использованием камеры MC-18 и программного обеспечения MC-View (Lomo Microsystems). Фораминиферы изучались в шлифах площадью 4 см² (61 шлиф, из них фораминиферы обнаружены в 26 шлифах). Конодонтовые элементы выделялись из породы по стандартной методике в 7–10%-й уксусной кислоте (Harris, Sweet, 1989) и обнаружены в двух из 30 изученных образцов.

Материал для изотопного анализа отбирался со свежей поверхности образцов стальным микробуром из раковин брахиопод и вмещающих их известняков в пределах одного образца, максимально близко друг к другу. Карбонатный порошок для изотопного анализа брахиопод по возможности извлекался в пределах вторичного или третичного

слоя раковины, состоящего из кальцитовых призм, поскольку первичные слои, ближайшие к внешнему краю, либо не сохраняются в ископаемом состоянии, либо состоят из волокон, которые считаются менее пригодными (Mii et al., 1999). Кроме того, отбор проб производился преимущественно из брюшных створок, имеющих большую толщину стенок, чем у спинных. При этом более тонкие спинные створки считаются менее устойчивыми к диагенетическим изменениям, чем брюшные (Armendariz et al., 2008). Изотопный состав углерода и кислорода в карбонатах изучался на масс-спектрометре DELTA V Advantage с пробоподготовкой на линии Gas Bench II по стандартной методике. Значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ приводились относительно стандарта V-PDB (Vienna Pee Dee Belemnite), а $\delta^{18}\text{O}_{\text{карб}}$ – относительно стандарта SMOW (Standard

Mean Ocean Water). Точность значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ составляет $\pm 0.04\text{‰}$, а $\delta^{18}\text{O}_{\text{карб}}$ – $\pm 0.06\text{‰}$. При калибровке использованы международные стандарты МАГАТЭ NBS18 (calcite) и NBS19 (TS-limestone). Изотопный анализ выполнен в ЦКП “Геонаука” Института геологии им. Н.П. Юшкина ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар, Россия), аналитик И.В. Смолева. Статистические методы реализованы с использованием программы PAST (Hammer et al., 2001).

Для оценки того, насколько данные изотопных анализов достоверно отражают первичный изотопный состав древней морской воды, использовался комплекс диагностических методов изучения собранного материала (Brand et al., 2011; Zhuravlev et al., 2020).

1. Визуальный осмотр образцов. Со свежих поверхностей образцов высверливался карбонатный порошок для анализа.

2. Оптическое исследование в шлифах. С осторожностью использовались образцы, демонстрирующие значительную перекристаллизацию микритовой составляющей породы (учитывался средний размер кристаллитов матрикса), а также образцы с другими вторичными преобразованиями.

3. Распределение стабильных изотопов углерода и кислорода. Использовалась составная диаграмма скрининга, основанная на работах (Lohmann, 1988; Immenhauser et al., 2003; Qie et al., 2011; Chen et al., 2016; Huck et al., 2017; Zhuravlev et al., 2020), на которой по соотношению $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ и $\delta^{18}\text{O}_{\text{карб}}$ выделяются области, где первичная природа полученного изотопного состава маловероятна.

4. Содержание органического вещества. Высокое содержание органического углерода в карбонатах (>1.7 мас. %) может приводить к включению в карбонаты ^{12}C , полученного из окисленного органического вещества (Scholle, Arthur, 1980). Этот процесс потенциально снижает значение $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$. Пробы, содержащие более 1.7 мас. % органического углерода, следует использовать с осторожностью. Содержание органического углерода в карбонатах оценивалось приближенно-количественным фотометрическим методом по шлифам. Этот метод основан на измерении коэффициента поглощения ИК-излучения. В диапазоне значений $\text{C}_{\text{орг}}$ от 0 до 5 мас. % существует статистически значимая зависимость ($R^2 = 0.8$) коэффициента поглощения ИК-излучения в шлифе и содержания $\text{C}_{\text{орг}}$.

Для установления сохранности раковинного вещества брахиопод также проводился ряд “скрининг-тестов”.

1. Визуальный и оптический (петрографический) осмотр, выявляющий признаки таких изменений, как непоследовательная окраска и отсутствие структурной целостности.

2. Исследование на базе СЭМ внутренних микроструктур стенки раковины.

3. Изучение карбонатного вещества пород и раковин с помощью детектора катодolumинесценции на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ-КЛ). Основой метода КЛ является то, что измененные карбонатные раковины подвержены эмиссии (Popp et al., 1986; Grossman et al., 1996), где степень свечения зависит от содержания в диagenетически измененном кальците Mn^{2+} и Fe^{2+} (Czerniakowski et al., 1984).

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ РАЙОНА

Рассматриваемый в статье район расположен в 3 км западнее фронтальной зоны ГЗУН и в структурном плане приурочен к восточной части Воркутинского поперечного поднятия, восточной окраине Предуральского краевого прогиба (см. рис. 1б). К западу и востоку ГЗУН сопровождается целой серией оперяющих взбросо-надвигов (Шишкин и др., 2013). При этом девонско-пермские отложения, обнажающиеся в районе исследований, смяты в узкие линейные складки преимущественно северо-восточного простирания. Крылья складок также часто осложнены разрывными нарушениями. Изученный разрез приурочен к юго-восточному крылу синклинали, ядро которой слагают терригенные отложения раннепермского возраста (сизымская, гусятинская и бельковская свиты), а крылья – преимущественно карбонатные каменноугольные отложения (важхановейская, сартыюская и цементнозаводская свиты). В принадвиговой зоне породы как аллохтона, так и паравтохтона сильно деформированы, разбиты серией разрывных нарушений и интенсивно трещиноваты. Трещиноватость, как правило, закрытая. Многие трещины залечены кальцитом. В позднедевонско-серпуховское время рассматриваемый район располагался в пределах обширного мелководного рампса с карбонатной седиментацией (Груздев, 2021).

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЗРЕЗА

Общая характеристика свиты. Сартыюская свита (C1sj) впервые выделена в процессе работ по ГДП-200 территории листа Q-41-V, VI (серия Полярно-Уральская) (Шишкин и др., 2013). Согласно описанию М.А. Шишкина с соавторами (2013), свита подразделена на нижнюю (C1sj1) и верхнюю (C1sj2) подсвиты и сложена серыми средне- и массивнослоистыми полидетритовыми известняками, иногда с пластами оолитово-обломочных известняков, доломитизированными известняками и доломитами. В верхней части свиты содержатся брекчиевидные известняки и известняковые брекчии. Граница между подсвитами проводится по подошве пачки светло-серых известняков с голубовато-серыми кремнистыми конкрециями при смене известняково-доломитового разре-

за известняковым. Нижняя подсвита содержит фораминиферы и брахиоподы тульского, алексинского, михайловского, веневского, косогорского и частично протвинского горизонтов верхнего визе-серпухова. Верхняя подсвита по фауне отвечает протвинскому и запалтубинскому горизонтам верхнего серпухова. Для свиты в целом характерны брахиоподы *Gigantoproductus striatosulcatus* (Schwetz.), *G. giganteus* (Sowerby), *Datangia cf. moderatus* (Schwetz.), *Semiplanus semiplanus* (Schwetz.), *Striatifera striata* (Fisch.), *S. coraesimilis* Sar., *Davidsonina carbonaria* (M'Coy), *Martinia* sp., *Linoproductus corrugatus* (M'Coy) и др. (Шишкин и др., 2013). Общая мощность свиты оценивается в 525–555 м (Шишкин и др., 2013).

Привязка разреза. В месте слияния руч. Мал. и Бол. Пайсошор и по руч. Пайсошор (правый приток р. Мал. Уса) в шести обнажениях (mul8a-f) изучена часть верхней подсвиты сартъюской свиты (см. рис. 1г, 2а). Предположение о том, что здесь представлена верхняя часть свиты, базируется на литологическом составе отложений, комплексах фораминифер и структурном положении обнажений. Наибольшее количество брахиопод в разрезе на руч. Пайсошор отмечено в нижней части описываемого ниже обн. mul8b.

В географическом плане обн. mul8b расположено примерно в 1 км к С-СЗ от места впадения руч. Пайсошор в р. Мал. Уса и приблизительно в 30 км от г. Воркута (координаты обн. mul8b N67.50367496 E64.75429002) (см. рис. 1). В структурном плане обн. mul8b располагается на северо-востоке Косью-Роговской впадины, непосредственно в пределах восточной части Воркутской ступени (Воркутинского поперечного поднятия) в зоне развития ГЗУН (см. рис. 1б) (Юдин, 1994; Тимонин, 1998; Шишкин и др., 2013).

Литолого-стратиграфическая характеристика обн. mul8b. Описание приведено в нормальной стратиграфической последовательности.

1. Известняки серые, формирующие циклиты (0.2–0.4 м) с бугристыми контактами. Нижняя часть циклита представлена известняком тонко- и мелкодетритовым с рассеянным мелким и средним детритом, члениками криноидей и брахиоподами (пакстоун), а верхняя часть циклита – известняком средне- и мелкодетритовым с многочисленными раковинами и створками брахиопод, одиночными и колониальными кораллами, члениками криноидей и единичными хететидами (грейнстоун). Брахиоподы представлены *Striatifera striata* (Fischer de Waldheim), *Striatifera* sp., *Carbocyrtina* sp. Диагностированы фораминиферы: *Eotuberitina reitlingerae* M.-Maklay, единичные *Archaeodiscus operosus* Shlyk. и *Asteroarchaeodiscus parvus* (Raus.-Chern.), *A. ovoides* (Raus.-Chern.), присутствуют *Biseriella procera* (Post.), *Endothyra prisca* Raus.-Chern. et Reit., *Endothyranopsis cf. crassa* (Brad.), *Globoendothyra cf.*

globulus (Eichw.), *G. magna* (Groz. et Leb.), *Omphalotis* sp., *Globoomphalotis inconstans* Grozd. et Leb.), чаще присутствуют *Pojarkovella* sp., *P. ex gr. nibelis* (Durk.), *P. aff. mira* Sim. и *Klubonibelis immanis* Con., *Mediocris mediocris* (Viss.), а также *Consobrinellopsis minima* (Lip.), *C. consobrina* (Lip.), *Ikensieformis ikensis* (Viss.), *Endostaffella* sp. и *Plectostaffella* sp., *Parastaffella struvei* (Möll.). В самой верхней части пачки (обн. mul8b-8R) встречена *Eostaffellina* ex gr. *actuosa* Reitl. Текстура массивная, до волнисто-слоистой, подчеркнутая распределением брахиопод. В верхней части пачки известняки существенно перекристаллизованы и рассечены тонкими прожилками белого крупнокристаллического кальцита. Кровля пачки бугристая. Видимая мощность 1.4 м.

2. Известняки серые, формирующие циклиты (0.4–0.6 м) с бугристыми контактами. Нижняя часть циклита представлена известняком пелиттонкодетритовым (вакстоун), а верхняя – известняком тонко- и мелкодетритовым с многочисленными раковинами и створками брахиопод, одиночными кораллами, члениками криноидей (пакстоун). Среди брахиопод преобладают *Davidsonina carbonaria* (McCoy), *Davidsonina* sp., а также редкие *Striatifera* sp. и *Carbocyrtina obtusa* (Kalash.). Определены те же фораминиферы, что и в пачке 1, а также *Pseudoglomospira gordialis irregularis* (Raus.-Chern.), *P. gordialis prisca* (Raus.-Chern.), *P. karzhantavica* Rum., *Pseudoammodiscus priscus* (Raus.-Chern.), *Archaeodiscus moelleri* Raus.-Chern., *Globoomphalotis antoninae* (Groz. et Leb.), *G. inconstans* (Groz. et Leb.), *Pojarkovella* aff. *eostaffelloides* Sim., много бисериелл *Biseriella* sp., *B. ex gr. moderata* Reitl. и *B. parva* (N. Tchern.), *Endostaffella delicata* Ros., разнообразные медиокрисы *Mediocris breviscula* (Gan.), *Mediocris evolutis elongatus* R. Ivan., *Vissarionovella tujmasensis* (Viss.), *Ikensieformis mirifica compressa* Brazhn., *Eostaffella prisca* Raus.-Chern., *E. mosquensis* Viss., *E. infulaeformis* (Gan.), *E. aff. angularis* Brazhn., *Eostaffella* ex gr. *mutabilis* (aff. *rjasanensis*) Raus.-Chern. (обн. mul8b-33R), *Eostaffellina* sp. (ex gr. *scharitimiensis* (Malakh.)), *Eostaffellina actuosa subsymmetrica* Reitl., *Pseudoendothyra orbiculata* Meln., *P. illustria* (Viss.), *P. illustria grandis* Reitl., *P. averinensa* Post., *P. ex gr. angularata* (Raus.-Chern.), *Parastaffella struvei suppressa* Shlyk. Присутствуют *Pachysphaerina pachisphaerica* Pron. и редкие зеленые водоросли *Palaeoberesella lahuseni* (Moll.), *Beresella machaevi* Kul., *B. polyramosa* Kul., *Kamaena delicata* Antr., в верхней половине пачки встречены *Koninkopora inflata* (Kon.), единичная *K. mortelmansi* Mamet, а также цианобактерии *Ortonella fruticulosa* R. Ivan., *O. kershopenensis* Garw. Текстура массивная, до волнисто-слоистой, подчеркнута распределением брахиопод. Вверх по разрезу пачки размер детрита снижается до тонкого. Для верхних 3.5 м пачки характерна рассеян-

ная вкрапленность вторичного идиоморфного тонкокристаллического кварца. В верхней части (1 м) скоплений брахиопод нет. Кровля пачки бугристая. Видимая мощность 6.2 м (см. рис. 2).

3. Необнаженный интервал, мощность 2 м.

4. Известняки серые, до темно-серых, тонкодетритово-пелитоморфные с неотчетливой волнисто-слоистой текстурой, гнездовидным распределением тонко-мелкого детрита и линзовидно-гнездовидным распределением крупных створок брахиопод (пак-вакстоун). Уровни, обогащенные створками брахиопод, появляются в разрезе с интервалом 0.2–0.3 м. Вверх по разрезу пачки количество брахиопод и гнезд мелкого и среднего детрита возрастает, появляется тонкая вкрапленность сульфидов. Кровля пачки бугристая. Видимая мощность 1.7 м.

5. Известняки серые, до темно-серых, тонкодетритово-пелитоморфные с рассеянно-гнездовидным распределением тонкого и мелкого детрита, массивные (мад-вакстоун). Вверх по разрезу пачки количество тонкого и мелкого детрита возрастает, мелкий и средний детрит распределены гнездовидно. Обнаружены конодонты *Rhachistognathus* sp. Кровля пачки пологоволнистая. Видимая мощность 1.6 м.

6. Известняки серые, формирующие неотчетливые циклиты (0.2–0.3 м по мощности) с пологоволнистыми контактами. Нижняя часть циклита сложена мелкодетритовым известняком, а верхняя – тонкодетритовым (пакстоун). Текстура от неотчетливо волнисто-слоистой до пологоволнисто-слоистой. В мелкодетритовых разностях присутствуют створки крупных брахиопод, членики криноидей, рассеянный средний детрит. Видимая мощность 1.2 м.

7. Необнаженный интервал, мощность 6 м.

8. Волнисто-линзовидное чередование (маштаб чередования 0.1–0.2 м) с волнистыми границами известняков серых, до темно-серых, тонкодетритовых (пакстоун) и известняков серых, до темно-серых, мелкодетритовых (пак-грейнстоун), местами с линзовидными скоплениями створок и раковин брахиопод. Вверх по разрезу пачки возрастает контрастность чередования — известняки становятся тонкодетритово-пелитоморфными и средне- и мелкодетритовыми. Встречены остатки цианобактерий *Ortonella*. Видимая мощность 4.4 м.

Общая мощность разреза в обн. m18b с учетом необнаженного интервала составляет 24.5 м.

Характер цикличности и текстурно-структурные особенности отложений позволяют реконструировать условия седиментации. Широко распространенные в разрезе циклиты с бугристыми контактами и волнисто-слоистой текстурой, сложенные преимущественно пак- и пакстоунами с незначительным увеличением размера форменных элементов в верхней части, вероятно, формирова-

лись в условиях относительного мелководья с умеренной динамикой среды. Такие циклиты соответствуют пологой волновой ряби. На это же указывает линзовидно-гнездовидное распределение органических остатков. Скопления брахиопод в этих отложениях представляют собой намывы со слабо-перемещенным раковинным материалом и частично прижизненные захоронения. Вероятность диахронного переотложения раковин в таких условиях крайне мала, следовательно, комплексы брахиопод могут рассматриваться как субавтохтонные. Присутствие в отложениях многочисленных остатков бентосных стеногалинных организмов (криноидеи, кораллы, многокамерные фораминиферы) позволяет реконструировать условия с нормальной соленостью и хорошей аэрацией придонных вод.

БИОСТРАТИГРАФИЯ

Стратиграфическое положение изученной части разреза установлено на основе изучения конодонтов, фораминифер и брахиопод (см. рис. 2).

Находки **конодонтов** в разрезе крайне редки и отличаются плохой сохранностью. В обн. m18d обнаружен единственный конодонтовый элемент *Hindeodus* cf. *scitulus* (Hinde), а в средней части обн. m18b (пачка 5 не отображена на рис. 2) – не диагностируемая до вида ювенильная форма *Rhachistognathus*. Все конодонтовые элементы несут признаки перекристаллизации и коррозии поверхности. Индекс окраски конодонтов варьируется от 5 до 5.5, что соответствует температуре катагенеза 300–350°C (по (Jones, 1992; Журавлев, 2017)). Вид *Hindeodus scitulus* (Hinde) известен из стратиграфического диапазона от среднего турне до верхнего серпухова (Журавлев, 2003). Представители рода *Rhachistognathus* характерны для нижней части среднего карбона, но встречаются и в верхневизейско-серпуховском интервале (Jenkins et al., 1993). Находки указанных конодонтов допускают лишь очень приблизительное сопоставление изученной части разреза с верхневизейско-серпуховским стратиграфическим интервалом.

Комплексы **фораминифер**, в отличие от конодонтов, демонстрируют умеренное разнообразие и также характеризуются плохой сохранностью. Раковины фораминифер сильно перекристаллизованы, что затрудняет таксономическую диагностику. В комплексе встречены представители поздне-визейско-серпуховских родов *Pseudoglomospira*, *Endothyra*, *Omphalotis*, *Endothyranopsis*, *Globoendothyra*, *Globoomphalotis*, *Klubonibelia*, *Pojarkovella*, *Endostaffella*, *Mediocris*, *Consobrinellopsis*, *Biseriella*, *Ikensieformis* и *Eostaffella*. Реже, на отдельных уровнях, встречаются *Asteroarchaediscus*, *Archaediscus*, *Mikhailovella*, *Eostaffellina*, *Vissarionovella*, *Plectostaffella*. В целом комплекс фораминифер в изученной части разреза достаточно разноо-

бразен и включает серпуховские псевдоэндоиты *Pseudoendothyra globosa*, *P. orbiculata*, *P. illustria grandis* Reitl. и эоштаффеллины *Eostaffellina* sp., *Eostaffellina actiosa* Reitl. и *E. actiosa subsymmetrica* Reitl., своеобразные эоштаффеллы *E. aff. angularis* Brazhn., *Eostaffella* ex gr. *mutabilis* (aff. *rjasanensis*) Raus.-Chern., единичную *Ikensieformis mirifica compressa* Brazhn. и *Mediocris evolutis elongatus* R. Ivan. Этот комплекс характерен для верхней части серпуховского яруса, скорее для протвинского горизонта, и соответствует фораминиферовой зоне *Eostaffellina protvae* – *Ikensieformis mirifica* Западно-Уральского субрегиона (Стратиграфические схемы Урала..., 1993).

Встреченные в разрезе единичные зеленые водоросли также характерны для визейско-серпуховского интервала. Однако комплекс водорослей, по сравнению с визейским, более беден по систематическому составу, что более характерно для серпухова (Богущ и др., 1990). Распространенные в разрезе представители зеленых водорослей *Koninkopora* и цианобактерий *Ortonella* указывают на крайне мелководные условия (Иванова, Степанова, 2021).

Брахииподы нижней части разреза (первые 7.6 м) преимущественно представлены родами *Striatifera*, *Davidsonina* и *Carbocyrtina* (рис. 3). Совместное нахождение представителей этих родов характеризует верхневизейско-серпуховский интервал. Сообщества брахипод *Davidsonina* и *Striatifera* в изученном разрезе образуют линзовидные скопления-ракушники, где они представлены целыми раковинами и изолированными створками, что свидетельствует о сортировке раковин в процессе седиментогенеза. В основу коллекции брахипод вошли образцы с поврежденной внешней скульптурой, однако ее детали сохранились в тех частях, которые были заключены в породу, что позволило определить их таксономическую принадлежность. Многие раковины имеют неправильную форму, что, вероятно, обусловлено теснотой их поселения. При этом стенки раковин *Davidsonina* хорошо сохранились (рис. 4). Такие же ракушники, состоящие из давидсонин, изучены ранее из соседних разрезов верхнего визе на р. Уса (устье руч. Кеч-Шор), где отмечено совместное нахождение со стриатиферами и *Latiproductus latissimus* (Sow.) (Калашников, 1963). Подобные скопления *Striatifera striata* и *Davidsonina septosa* установлены также в серпуховских отложениях на юге Лыжско-Кыртаельского вала (Калашников, 1974). Кроме того, сходный комплекс брахипод, состоящий из стриатифер и давидсонин крупного размера, известен из нижнего карбона на Новой Земле (губа Южная Сульменева), где отмечены также *Gigantoproductus giganteus* (Sow.), характерные для верхневизейско-нижнесерпуховского интервала (Янишевский, 1926). Род *Davidsonina* включен в отряд

Spiriferinida (Carter et al., 1994) и представлен формами, которые достигали максимального размера (до 20 см в ширину) среди спириферинид (Иванова, 1975). Изученные нами *Davidsonina carbonaria* (McCoy) имеют средние размеры брюшных створок – от 4 до 8 см в длину, которые сходны с параметрами для этого вида из соседних разрезов на р. Уса (Калашников, 1963). Особенности давидсонин являются ветвистая радиальная ребристость, ярко выраженный двойной спондилиум, отсутствие брахидиума (спиралей брахиального аппарата) и тихоринума, а также пористости в первичном и третичном слоях раковины (Иванова, 1971; Эрлангер, 1987). Предполагается, что давидсонины лишены поддержек лофофора вследствие их редукции у крупных и тяжелых форм данной группы спириферинид (Иванова, 1975), существовавшей непродолжительное время в визейском и серпуховском веках Европы, Урала и Средней Азии (Полетаев, 2018). В целом, по биостратиграфическим данным, изученная часть разреза вполне может быть сопоставлена с верхней частью серпуховского яруса (протвинский горизонт).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В обн. му18b для определения изотопного состава углерода и кислорода в раковинном материале брахипод и вмещающих карбонатных породах детально опробована нижняя часть разреза (7.6 м), которая соответствует слоям 1 и 2 (см. рис. 2). Далее проведены “скрининг-тесты” для выявления образцов, которые могли быть подвергнуты постседиментационным изменениям (подробную информацию см. в разделе “Материал и методы”).

По результатам изучения шлифов породы представлены вак- и пакстоунами и в значительной степени перекристаллизованы. Измерение размера кристаллитов карбонатов матрикса показало вариации от 9 до 26 мкм со средним по изученному интервалу значением 14 мкм. Распределение данного параметра по разрезу довольно хаотичное, что позволяет предположить существенные вариации интенсивности перекристаллизации карбонатов в пределах пачек 1 и 2. Присутствие в верхней части интервала идиоморфных кристаллов кварца и практическое отсутствие реликтов микрита указывают на значительную перекристаллизацию всего объема породы. В этом же интервале в шлифах отмечается трещиноватость и частичная перекристаллизация раковинного вещества брахипод. В целом раковины брахипод из пачек 1 и 2, судя по остаткам, не тронутым выветриванием, характеризуются сохранившейся внешней морфологией (см., например, рис. 3, фиг. 6а) и по текстурно-структурным характеристикам незначительно отличаются от неизмененных раковин ро-

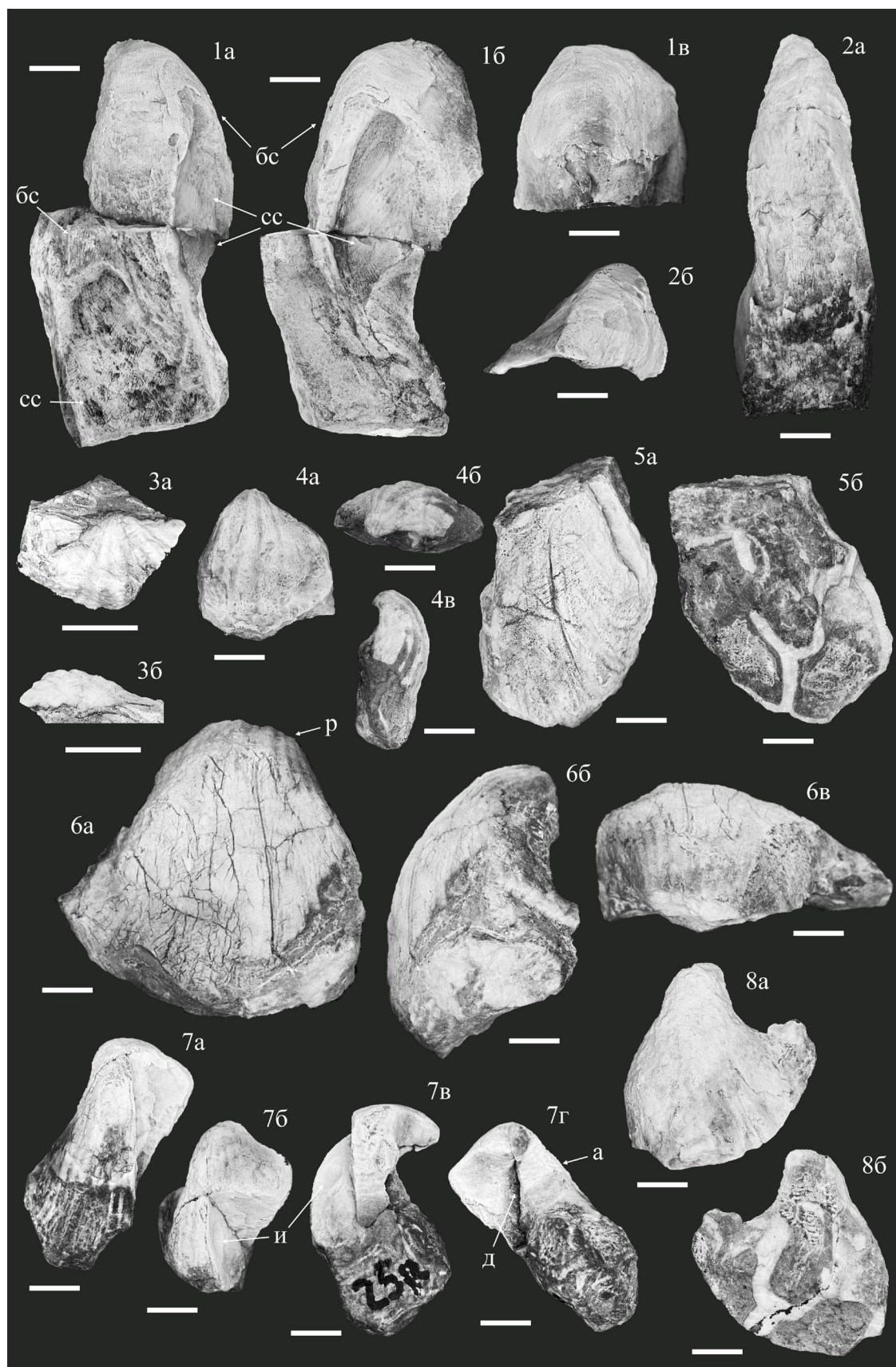


Рис. 3. Брахиоподы из разреза верхнего серпухова на руч. Пайсошор.

Фиг. 1, 2. *Striatifera striata* (Fischer de Waldheim, 1837): 1 – экз. № 738/1; 1а, б – скопление раковин в двух положениях; 1в – брюшная створка со стороны замочного края; обр. mu18b-7B. Фиг. 3. *Carbocyrtina* sp.: 3 – экз. № 738/3; 3а, б – спинная створка в двух положениях; обр. mu18b-6B. Фиг. 4. *Carbocyrtina obtusa* (Kalashnikov, 1963): 4 – экз. № 738/4; 4а-в – брюшная створка в трех положениях; обр. mu18b-15B. Фиг. 5–7. *Davidsonina carbonaria* (McCoy, 1855): 5 – экз. № 738/5; 5а – брюшная створка с обломанной макушкой и частично сохраненной ребристой скульптурой, 5б – внутренняя сторона брюшной створки с двойным спондилием; обр. mu18b-23B; 6 – экз. № 738/6; 6а-в – брюшная створка в трех положениях; обр. mu18b-24B; 7 – экз. № 738/7; 7а-г – брюшная створка в четырех положениях; обр. mu18b-25B. Фиг. 8. *Davidsonina* sp.: 8 – экз. № 738/8; 8а, б – брюшная створка с нарушенной скульптурой в двух положениях; обр. mu18b-26B. Обозначения: а – аррея, бс – брюшная створка, д – узкий дельтирий, и – место взятия пробы на изотопный анализ, р – сохранившиеся ребра, сс – спинная створка. Масштабные линейки – 10 мм.

Fig. 3. Upper Serpukhovian brachiopods from the Paisoshor Creek section.

Figs. 1, 2. *Striatifera striata* (Fischer de Waldheim, 1837): 1 – specimen No. 738/1; 1a, б – cluster of shells in two positions; 1в – ventral valve in posterior view; sample mu18b-7B. Fig. 3. *Carbocyrtina* sp.: 3 – specimen No. 738/3; 3a, б – dorsal valve in two positions; sample mu18b-6B. Fig. 4. *Carbocyrtina obtusa* (Kalashnikov, 1963): 4 – specimen No. 738/4; 4a-в – ventral valve in three positions; sample mu18b-15B. Figs 5–7. *Davidsonina carbonaria* (McCoy, 1855): 5 – specimen No. 738/5; 5a – ventral valve with broken off umbo and preserved ribbed sculpture, 5б – ventral interiors with double spondylium; sample mu18b-23B; 6 – specimen No. 738/6; 6a-в – ventral valve in three positions; sample mu18b-24B; 7 – specimen No. 738/7; 7a-г – ventral valve in four positions; sample mu18b-25B. Fig. 8. *Davidsonina* sp.: 8 – specimen No. 738/8; 8a, б – ventral valve with broken external sculpture in two positions; sample mu18b-26B. Designations: a – interarea, бс – ventral valve д – narrow delthyrium, и – place of sampling for isotopic analysis, сс – dorsal valve, р – preserved ribs. Scale bars – 10 mm.

да *Davidsonina* из разрезов Лыжско-Кыртаельского вала (см. рис. 4). Содержание C_{org} , определенное приближенно-количественным фотометрическим методом, в изученных известняках не превышает 0.3 мас. %, что исключает существенное влияние окисления органического вещества на изотопный состав углерода в карбонатах. Следы процессов доломитизации, по данным РФА (рентгенофлуоресцентного анализа), отсутствуют (содержание MgO менее 2.2 мас. %). Таким образом, можно предположить, что основным фактором, который мог искажать изотопный состав углерода в данном разрезе, является перекристаллизация карбонатов.

Изотопный состав углерода и кислорода изученных образцов пород и раковин брахиопод из разреза mu18b представлен в табл. 1. Диаграмма соотношения значений $\delta^{13}C_{carb}$ и $\delta^{18}O_{carb}$ известняков и раковинного материала брахиопод из разреза сартынской свиты (рис. 5) наглядно демонстрирует, что значительная часть данных из раковинного материала брахиопод, скорее всего, характеризуется слабоизмененным изотопным составом углерода. При этом данные, полученные из известняков, по большей части попадают в область вероятных вторичных изменений с сильнооблегченным изотопным составом кислорода (менее -8‰ PDB, или 22.7‰ SMOW).

По данным катодOLUMИнесценции на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ-КЛ), можно предположить, что кальцит в раковинах некоторых брахиопод менее изменен, чем окружающая их порода. Несмотря на то что для СЭМ-КЛ при получении изображений в кальцитовом матриксе возникают трудности из-за фосфоресценции (Pagel et al., 2000), в обр. mu18b/24aB нами наблюдалось отсутствие люминесценции в раковинном мате-

риале молодых особей и слабое свечение вмещающей карбонатной породы (рис. 6, фиг. 2). Подобное наблюдалось и при изучении ювенильных частей современных брахиопод, которые, в отличие от зрелых особей, как правило, не люминесцируют (Barbin, 2000). Тем не менее мы наблюдали также некоторые частично люминесцирующие раковины (см. рис. 6, фиг. 5). Анализ компонентов, не показывающих люминесценцию, должен обеспечить наибольшую достоверность первичного изотопного состава. Однако полагаться только лишь на КЛ для определения степени изменения кальцита брахиопод не следует, поскольку люминесценция присутствует также у современных (Barbin, Gaspar, 1995) и мезозойских брахиопод с хорошо сохранившейся микроструктурой (Tomašových, Farkaš, 2005).

Также следует учитывать, что по мере роста раковин могут наблюдаться некоторые различия в изотопных вариациях, обусловленные сезонными колебаниями температуры, химического состава воды и метаболизма (Mii, Grossman, 1994; Angiolini et al., 2011).

Результаты изучения изотопного состава углерода показали существенные различия величин $\delta^{13}C$ в раковинах брахиопод и во вмещающей породе (рис. 7). Нижняя часть разреза (примерно 4.3 м) характеризуется утяжелением изотопного состава углерода раковинного материала от 2 до 4.1 ‰. Выше по разрезу (следующие 2.5 м) происходит резкое увеличение $\delta^{13}C$ до 7.3 ‰ (образец с *Davidsonina carbonaria*), затем снижение до 3.4 ‰ и, наконец, наблюдается разброс величин от 1.2 до 6 ‰ в прикровельной части. При этом изотопный состав углерода известняков показывает довольно стабильные значения по всему разрезу (от -0.2 до 2.6‰ , среднее значение 1.0‰) (см. табл. 1), демон-

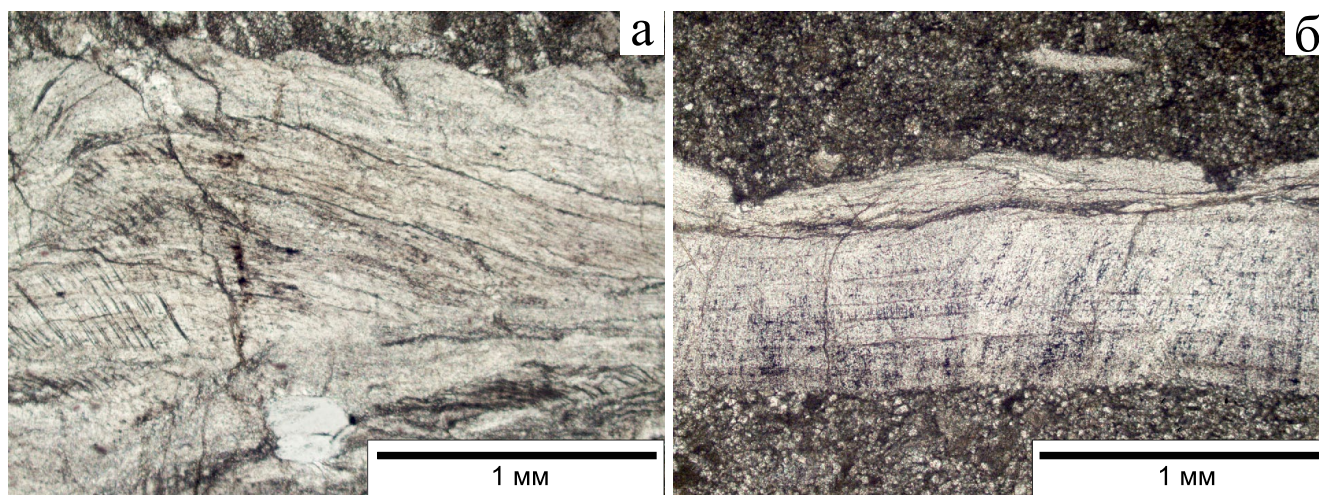


Рис. 4. Шлифы стенки раковин *Davidsonina*.

а – из разреза на руч. Пайсошор (обр. mul8b/24aB), б – из разреза на р. Кожва (Лыжско-Кыртаельский вал).

Fig. 4. Thin sections of *Davidsonina* shell walls.

а – thin section from a section on Paisoshor stream (mul8b/24aB), б – thin section from a section on the Kozhva River (Lyzha-Kyrtael Swell).

стрируя незначительный негативный тренд к верхней части. Вариации величин $\delta^{18}\text{O}$ известняков составляют от 19.3 до 24.3 ‰, раковин брахиопод – от 16.9 до 24.8 ‰. Средние значения $\delta^{18}\text{O}$ известняков и брахиопод – 21.3‰ SMOW (отвечает –9.3‰ PDB) и 22.2‰ (отвечает –8.4‰ PDB) соответственно. Столь низкие значения $\delta^{18}\text{O}$ исключают их первичную (осадочную) природу в условиях морского бассейна с нормальной соленостью (Виноградов, 2005), и поэтому в данной работе не интерпретируются. Изотопный состав углерода раковинного материала брахиопод варьируется в более широком диапазоне значений (от –0.7 до 8.7 ‰) (см. табл. 1, рис. 7), несмотря на то что согласно данным “скрининг-тестов” брахиоподы отражают более достоверные значения изотопии относительно вмещающих пород.

Согласно ранее опубликованным данным, средние значения $\delta^{13}\text{C}$ для визейских и серпуховских брахиопод Русской платформы составляют $2.4 \pm 0.7\text{‰}$, а максимальные значения визейских *Martinia* Западной Европы достигают 4‰ (Mii et al., 2001). Средний изотопный состав углерода слабоизмененных мелководных карбонатов позднего серпухова Тимано-Печорского бассейна (разрезы юга поднятия Чернышева и Лыжско-Кыртаельского вала) составляет 0.6‰ (Zhuravlev et al., 2023). В изученном нами разрезе наиболее высокие значения $\delta^{13}\text{C}$ показывают образцы раковин брахиопод, отнесенных к роду *Davidsonina*. Прямое сравнение обр. mul8b/24aB с *Davidsonina* показало, что он обогащен тяжелым изотопом углерода, по

сравнению со *Striatifera* (обр. mul8b/7aB) на 5.6‰. Это не противоречит тому, что в целом спирифериды характеризуются более тяжелым изотопным составом углерода по сравнению с продуктидами (Garbelli et al., 2014). На необычайно тяжелый изотопный состав углерода у давидсонин (*Davidsonina septosa* и *D. carbonaria*) обратили внимание еще при изучении изотопного состава брахиопод из нижнего карбона Дербишира (Англия) (Popp et al., 1986). Аномально высокие значения $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ определены в двух образцах *Davidsonina septosa* (Phill.), а у *Davidsonina carbonaria* (McCoy) из отложений позднего визе Англии установлено значение $\delta^{13}\text{C}$ 5‰ и $\delta^{18}\text{O}$ –4.0‰ V-PDB (26.8 SMOW). При этом данные образцы показывали тусклое свечение благодаря люминесцирующим трещинам (Popp et al., 1986). Образцы достоверно установленных *D. carbonaria* (McCoy) с руч. Пайсошор (р. Мал. Уса) содержат $\delta^{13}\text{C}$ от 5.4 до 7.3‰ V-PDB и $\delta^{18}\text{O}$ от 22.4 до 24.4‰ SMOW, что также является довольно высоким показателем. Статистический анализ изотопного состава углерода в раковинах брахиопод показал достоверное бимодальное распределение величин $\delta^{13}\text{C}$ со средними значениями 1.0‰ (стандартное отклонение 1.1) и 5.5‰ (стандартное отклонение 1.4) (рис. 8). Раковины с более тяжелым изотопным составом углерода, довольно хаотично распределенные по разрезу, вероятно, принадлежат роду *Davidsonina*, а раковины с более легким изотопным составом углерода – другим таксонам брахиопод. Предположительно, именно это обуславливает большую амплитуду вариаций значе-

Таблица 1. Изотопный состав углерода и кислорода изученных образцов из разреза mu18b (руч. Пайсошор)**Table 1.** C and O isotopic composition of the study samples from the section mu18b (Paisoshor Creek)

Образец	$\delta^{13}\text{C}$ V-PDB, ‰	$\delta^{18}\text{O}$ V-SMOW, ‰	Образец	Порода	$\delta^{13}\text{C}$ V-PDB, ‰	$\delta^{18}\text{O}$ V-SMOW, ‰
1B-1	1.3	23.4	1R	Пакстоун	1.9	23
1B-2	1.1	22.9				
1B-3	2.1	23.5				
2B	2.4	24.8	2R	—”—	2.6	24.3
3B	1.7	21.8	3R	—”—	1.3	21.7
4B	0.7	21.8	4R	—”—	1.3	21.7
5B	0.7	20.6	5R	Перекрист.	1.6	22.3
6B	0.4	19.3	6R	Вакстоун	1.3	21.1
7B	1.2	20.8	7R	Перекрист.	1	20.9
7aB	1.4	23.1				
8B	0.3	16.9	8R	—”—	1.1	21
9B	–0.2	19.7	9R	—”—	0.9	20.8
10B	0.1	20.8	10R	Пакстоун	2.1	21.4
11B	8.7	27	11R	Вакстоун	1.4	21.6
12B	1.9	20.4	12R	—”—	1.5	21.4
13B	5.1	22.9	13R	—”—	2	22
14B	5.3	23.9	14R	Перекрист.	1.4	20.3
15B	2.9	21.6	15R	—”—	1.6	21.5
16B	6.4	22.9	16R	—”—	0.9	20.6
17B	3.4	21.8	17R	—”—	1.4	20.8
18B	–0.6	20.4	18R	Вакстоун	1	20.6
19B	1.4	21	19R	Перекрист.	0.8	19.3
20B	5.6	23.2	20R	—”—	1.1	21
21B	4.13	21.6	21R	Вакстоун	0.3	20.3
22B	5.9	23.9	22R	—”—	0.4	20.9
23aB	6.9	23.9	23aR	—”—	0.9	21.7
23B	2.7	21.2	23R	—”—	1.5	21.6
24B	–0.7	19.9	24R	—”—	0.5	21.9
24aB	7	24.4				
25B	7.3	22.8	25R	Перекрист.	0.6	21
26B	5.4	22.3	26R	—”—	0.4	21.8
27B	5.3	23	27R	—”—	–0.2	21.2
28B	1.6	21	28R	—”—	0.4	20.5
29B	5.2	23	29R	—”—	0.2	20.6
30B	3.4	22.2	30R	—”—	1.1	20.6
31B	6	25.6	31R	—”—	0.3	21.2
32B	1.2	22.1	32R	—”—	0.4	19.6
33B	5.2	24.6	33R	—”—	0.1	21.1
34B	0.1	23	34R	—”—	0.2	23.2
35B	–0.1	22.4	35R	—”—	0.2	21.9

Примечание. Значения даны в промилле относительно стандартов V-PDB для углерода и V-SMOW для кислорода. B – брахиоподы, R – вмещающая их порода.

Note. The values are reported in permilles relative to V-PDB for carbon and relative to V-SMOW for oxygen. B marks samples of brachiopods, and R marks samples of the host rock.

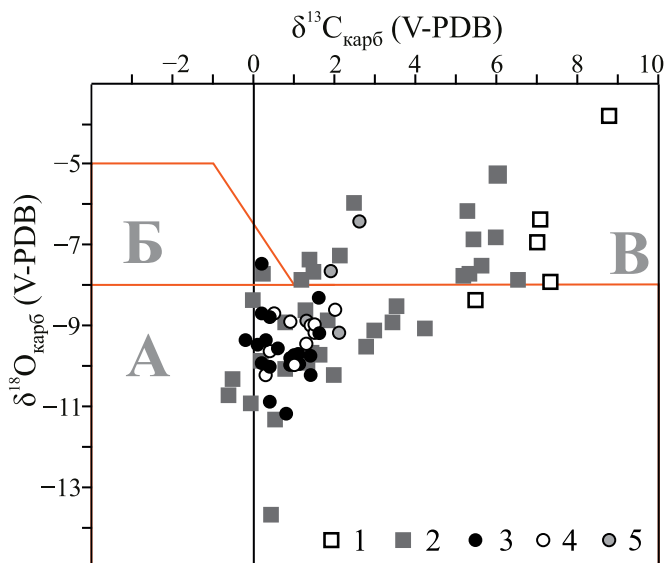


Рис. 5. Диаграмма соотношения изотопного состава $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ и $\delta^{18}\text{O}_{\text{карб}}$ известняков ($R^2 = 0.16$) и раковинного материала брахиопод ($R^2 = 0.49$) из разреза сартъюской свиты на руч. Пайсошор.

1 – раковины брахиопод, достоверно отнесенные к роду *Davidsonina*; 2 – раковины прочих брахиопод (большинство неясной таксономической принадлежности в силу плохой сохранности); 3 – перекристаллизованные известняки; 4 – вакстоуны; 5 – пакстоуны. А – область вероятных вторичных изменений; Б – область вероятного влияния атмосферных вод; В – область, соответствующая первичному изотопному составу (составлено по (Lohmann, 1988; Immenhauser et al., 2003; Qie et al., 2011; Chen et al., 2016; Huck et al., 2017; Zhuravlev et al., 2020).

Fig. 5. Diagram of the ratio of $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ and $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ isotopic composition of limestones and brachiopod shell material from the section of the Sart'yu Formation at Paisoshor Creek.

1 – brachiopod shells reliably assigned to the genus *Davidsonina*, 2 – shells of other brachiopods (most of them of uncertain taxonomic affiliation due to poor preservation), 3 – recrystallized limestones, 4 – wakestones, 5 – packstones. A – area of probable secondary changes, Б – area of probable influence of atmospheric waters; В – area corresponding to the primary isotope signal. Compiled from (Lohmann, 1988; Immenhauser et al., 2003; Qie et al., 2011; Chen et al., 2016; Huck et al., 2017; Zhuravlev et al., 2020).

ний $\delta^{13}\text{C}_{\text{брах}}$ в изученной части разреза (см. рис. 7). Если учитывать “жизненный эффект” (особенности биоминерализации, обусловленные физиологическими параметрами) рода *Davidsonina*, то данные по изотопному составу углерода раковин брахиопод демонстрируют в изученном интервале разреза плавное облегчение изотопного состава на 2–3‰, что хорошо согласуется с данными по вмещающей породе. Кроме того, сходный тренд в верхнем серпухове отмечался в разрезах южной

части поднятия Чернышева и Лыжско-Кыртаельского вала в отложениях, слабоизмененных вторичными процессами (Zhuravlev et al., 2023).

Таксономические различия при сравнении изотопных и элементных составов палеозойских брахиопод были выявлены ранее. Считается, что представители класса *Strophomenata* (отряд *Productida*) обычно демонстрируют более высокие концентрации Na, Mg и Sr, чем брахиоподы класса *Rhynchonellata* (отряд *Spiriferinida*) (Popp et al., 1986; Armendariz et al., 2008). Также выявлена закономерность, что значения изотопного соотношения углерода в рамках этих двух классов на одном стратиграфическом уровне имеют разницу в несколько промиллей в сторону утяжеления $\delta^{13}\text{C}$ у ринхонеллат (Garbeli et al., 2014). Поэтому различия в значениях $\delta^{13}\text{C}$ между этими двумя классами должны учитываться при построении кривых по изотопному составу углерода древней морской воды на основе кальцита брахиопод.

Таким образом, исходя из изложенного, можно сделать следующие выводы.

В сильнопреобразованных отложениях первичный изотопный состав углерода может частично сохраняться преимущественно в раковинном веществе брахиопод, более устойчивым ко вторичным преобразованиям благодаря структурным особенностям низкомагнезиального биогенного кальцита. Вмещающие карбонатные породы вследствие значительных вторичных преобразований (согласно результатам “скрининг-тестов”) в подавляющем большинстве попадают в области сомнительных данных (область вероятных вторичных изменений и область вероятного влияния атмосферных вод на рис. 5) и являются малопригодными для изотопной стратиграфии. Довольно хорошая стабильность значений изотопного состава углерода известняков может отражать лишь результат гомогенизации значений $\delta^{13}\text{C}$ при существенных вторичных преобразованиях.

Несмотря на то что большинство брахиопод ввиду плохой сохранности не поддаются таксономической диагностике, более высокая обогащенность раковин *Davidsonina* тяжелым изотопом углерода, по сравнению с раковинами других брахиопод, подтверждается на материале из разреза сартъюской свиты. В верхней части разреза, где *Davidsonina* диагностированы, изотопный состав углерода раковин брахиопод демонстрирует пиковые положительные отклонения (см. рис. 7). Наблюдаемая величина предполагаемого “жизненного эффекта” (vital effect) у давидсонин достигает 4–6‰. Это может быть связано со специфическим метаболическим эффектом у данной группы брахиопод, который обусловлен аномально высоким фракционированием изотопов углерода в организме. Можно предположить, что давидсонины, в отличие от большинства современ-

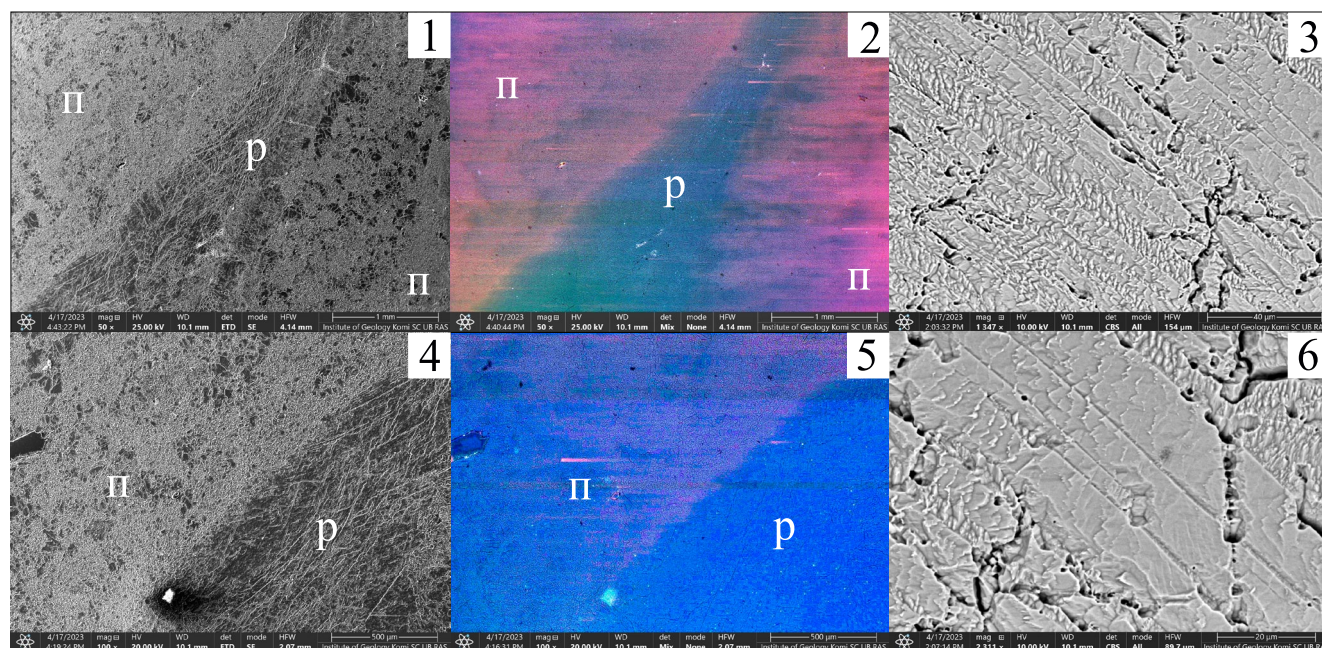


Рис. 6. Типичные СЭМ-микрофотографии срезов молодых экземпляров *Davidsonina* sp.

Экз. № 738/9, обр. mu18b/24aB. 1, 4 – фрагмент поперечного среза раковины в микритовом матрикесе; матрица слабо люминесцирует, что характерно для плохой сохранности (Mii et al., 1997), в то время как раковина брахиоподы не люминесцирует; 3, 6 – пример сохранившихся призм третичного слоя раковины в продольном разрезе; 2, 5 – тот же участок в катодолюминесценции (СЭМ-КЛ). Обозначения: п – порода, р – раковина.

Fig. 6. Typical SEM images of the sections of young specimen of *Davidsonina* sp.

Specimen No. 738/9, sample mu18b/24aB. 1, 4 – fragment of the transverse section of the shell in micritic matrix; 2, 5 – the same fragment in SEM-CL; the matrix is slightly luminescent, which is characteristic of poor preservation (Mii et al., 1997), while the brachiopod shell is nonluminescent; 3, 6 – details of the prismatic tertiary layer in longitudinal section. Notations: п – rock, р – shell.

ных и древних брахиопод, использовали при строительстве раковины преимущественно метаболическую углекислоту, а не углекислоту из окружающей морской воды. Не исключено, что это было связано с наличием у них микробийальных симбионтов, которые позволяли успешно питаться крупным организм, вероятно, со слабо развитым лофофором (отсутствие развитых поддержек лофофора) (McConnaughey et al., 1997). Это делает раковины представителей рода *Davidsonina* непригодными для изотопной стратиграфии и реконструкции изотопного состава углерода древней морской воды.

На довольно ощутимую разницу в значениях $\delta^{13}\text{C}$ у ископаемых брахиопод в отдельно взятом стратиграфическом интервале влияет не только их таксономическая принадлежность, но и степень сохранности раковинного материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты изучения изотопного состава углерода в раковинах брахиопод и вмещающих карбо-

натных породах верхней части сартъюской свиты показали лучшую сохранность изотопного состава углерода в раковинах брахиопод даже в случае существенной перекристаллизации вмещающих карбонатов. Изотопный состав кислорода как раковин брахиопод, так и вмещающих пород характеризуется крайне низкими значениями, обусловленными, скорее всего, вторичным преобразованием.

Несмотря на хорошую сохранность изотопного состава углерода в брахиоподах, в относительно небольшом стратиграфическом интервале исследованного нами разреза вариации изотопного состава углерода бикарбоната древней океанической воды не могут быть достоверно реконструированы ввиду аномально высоких значений $\delta^{13}\text{C}$ у брахиопод рода *Davidsonina*, которые могут быть связаны со значительным “жизненным эффектом”.

Существенный “жизненный эффект” (4–6‰), характерный для представителей рода *Davidsonina*, затрудняет использование изотопных данных, полученных по раковинам этих брахиопод, для целей изотопной стратиграфии. В целях корректной изотопно-стратиграфической интерпретации ва-

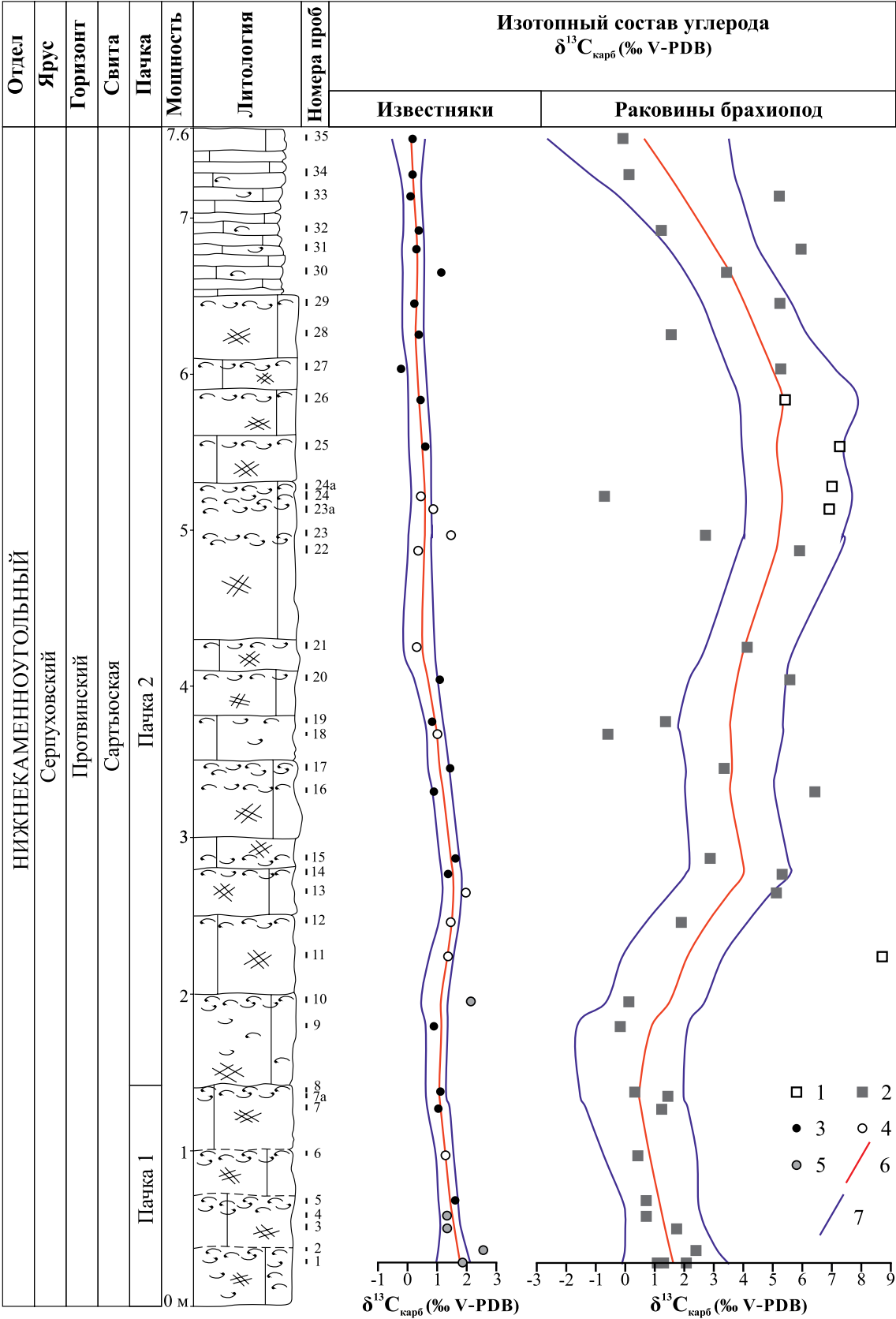


Рис. 7. Стратиграфическая колонка нижней части обнажения mi18b с распределением изотопных соотношений углерода раковинного материала брахиопод и вмещающих карбонатных пород.

1 – раковины брахиопод, достоверно отнесенных к роду *Davidsonina*; 2 – раковины прочих брахиопод (большинство неясной таксономической принадлежности); 3 – перекристаллизованные известняки; 4 – вакстоуны; 5 – пакстоуны; 6 – линия, отражающая сглаживание изотопных данных методом LOESS; 7 – 95%-й доверительный интервал для кривой. Остальные обозначения – см. рис. 2.

Fig. 7. Stratigraphic log of the lower part of outcrop mul8b with distribution of carbon isotopic ratios of brachiopod shell material and host carbonate rocks.

1 – brachiopod shells reliably assigned to the genus *Davidsonina*, 2 – shells of other brachiopods (most of them of uncertain taxonomic affiliation), 3 – recrystallized limestones, 4 – wakestones, 5 – packstones, 6 – isotopic data curve (LOESS smoothing), 7 – 95% confidence interval for the curve. Other notations – see Fig. 2.

риаций изотопного состава углерода в разрезах необходимо изучение таксономически однородных выборок в рамках как минимум одного рода в совокупности со вмещающими отложениями.

Благодарности

Авторы выражают признательность И.В. Смолевой за проведение изотопных анализов, С.Т. Неверову – за помощь во время полевых исследований, анонимным рецензентам за конструктивные замечания, позволившие улучшить работу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Богущ О.И., Иванова Р.М., Лучинина В.А. (1990) Известковые водоросли верхнего фанерозоя и нижнего карбона Урала и Сибири. Новосибирск: Наука, сиб. отд., 160 с.
- Виноградов В.И. (2005) Отражение глобальных изменений природной среды в изотопных характеристиках осадочных пород. Биосфера–экосистема–биота в прошлом Земли: палеобиогеографические аспекты. К 100-летию со дня рождения академика В.В. Мененра. *Тр. Геол. ин-та РАН*, вып. 516, 433–466.
- Груздев Д.А. (2021) Позднедевонско-раннекаменноугольные изолированные карбонатные платформы на севере Урала и Пай-Хоя. *Вестн. геонаук*, (10), 3–15.
- Дмитриева Е.В., Ершова Г.И., Либрович В.Л., Некрасова В.И., Орешникова Е.И. (1968) Атлас текстур и структур осадочных горных пород. Ч. 2. Карбонатные породы. М.: Недра, 700 с.
- Журавлев А.В. (2003) Конодонты верхнего девона – нижнего карбона северо-востока Европейской России. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 85 с.
- Журавлев А.В. (2017) Оценка степени термального катагенеза палеозойских отложений севера Пай-Хойского паравтохтона по индексам окраски конодонтов. *Литосфера*, (1), 44–52.
- Иванова Е.А. (1971) Введение в изучение спириферид. *Тр. ПИН*. Т. 126. М.: Наука, 105 с.
- Иванова Е.А. (1975) Некоторые *Spiriferinidina* Подмошского бассейна. *Палеонтол. журн.*, (2), 79–88.
- Иванова Р.М., Степанова Т.И. (2021) Альгофлора и микрофация нижнего карбона Урала и прилегающих территорий. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 264 с.
- Калашников Н.В. (1963) О роде *Davidsonina* из карбона Северного Урала. *Палеонтол. журн.*, (2), 43–53.
- Калашников Н.В. (1974) Раннекаменноугольные брахиоподы Печорского Урала. Л.: Наука, 220 с.
- Полетаев В.И. (2018) Атлас определитель каменноу-

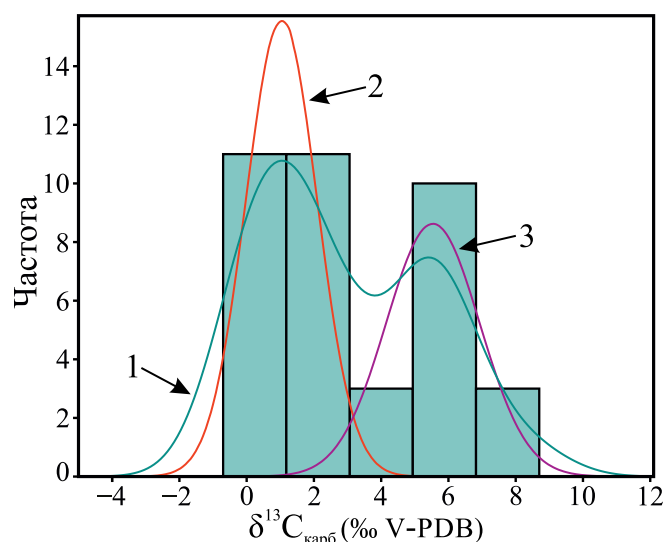


Рис. 8. Распределение изотопного состава раковин брахиопод в изученном разрезе.

Плотность вероятности: 1 – для всех брахиопод, 2 – для *Spiriferinida*, 3 – для *Davidsonina*.

Fig. 8. Distribution of isotopic composition of brachiopod shells in the studied section.

Kernel density: 1 – for all brachiopods, 2 – for *Spiriferinida*, 3 – for *Davidsonina*.

- гольных спириферид Восточной Европы. Киев: Нац. Ак. наук Украины, Ин-т геол. наук, 408 с.
- Стратиграфические схемы Урала (докембрий, палеозой). (1993) Межвед. Страт. Комитет России. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, Уралгеолком, 151 л.
- Тимонин Н.И. (1998) Печорская плита: история геологического развития в фанерозое. Екатеринбург: УрО РАН, 238 с.
- Шишкин М. А., Малых О.Н., Попов П.Е., Колесник Л.С. (2013) Государственная геологическая карта РФ м-ба 1:200 000 листа Q-41-V, VI (второе издание). М.: МФ ВСЕГЕИ, Мин-во природных ресурсов РФ, ЗАО “МИРЕКО”.
- Эрлангер О.А. (1987) Микроструктура стенки раковины спириферид рода *Davidsonina*. *Палеонтол. журн.*, (1), 124–128.
- Юдин В.В. (1994) Орогенез Севера Урала и Пай-Хоя. Екатеринбург: УИФ “Наука”, 284 с.
- Янишевский М.Э. (1926) Материалы к познанию палео-

зойской фауны Новой Земли. *Тр. Геол. и минерал. музея АН*, **5**(4), 73-116.

- Al-Assam I., Veizer J. (1982) Chemical Stabilization of Low-Mg Calcite: An Example of Brachiopods. *SEPM J. Sediment. Res.*, **52**, 1101-1109.
- Al-Husseini M., Ruebsam W. (2020) Ch. 2. Interpreting Phanerozoic $\delta^{13}\text{C}$ patterns as periodic glacio-eustatic sequences. *Stratigraphy and Timescales 5*. Cambridge, Academic Press, 41-105. <https://doi.org/10.1016/bs.sats.2020.08.005>
- Angiolini L., Stephenson M., Leng M. J., Jadoul F., Millward D., Aldridge A., Andrews J., Chenery S., Williams G. (2011) Heterogeneity, cyclicity and diagenesis in a Mississippian brachiopod shell of palaeoequatorial Britain. *Terra Nova*, **24**(1), 16-26.
- Armendariz M., Rosales I., Quesada C. (2008) Oxygen isotope and Mg/Ca composition of Late Visean (Mississippian) brachiopod shells from SW Iberia: Palaeoclimatic and palaeogeographic implications in northern Gondwana. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **268**(1-2), 65-79.
- Barbin V. (2000) Cathodoluminescence of Carbonate Shells: Biochemical vs Diagenetic Process. *Cathodoluminescence in Geosciences*. Berlin, Heidelberg, Springer, 303-329. https://doi.org/10.1007/978-3-662-04086-7_12
- Barbin V., Gaspard D. (1995) Cathodoluminescence of recent articulate brachiopod shells. Implications for growth stages and diagenesis evaluation. *Geobios*, (18), 39-45.
- Brand U. (1989) Biogeochemistry of Late Paleozoic North American brachiopods and secular variation of seawater composition. *Biogeochemistry*, **7**(3), 159-193.
- Brand U., Legrand-Blain M. (1993) Paleoecology and biogeochemistry of brachiopods from the Devonian – Carboniferous boundary interval of the Griotte Formation, La Serre, Montagne Noire, France. *Ann. Soc. Geol. Belg.*, (115), 497-505.
- Brand U., Jiang G., Azmy K., Bishop J., Montañez I.P. (2012) Diagenetic evaluation of a Pennsylvanian carbonate succession (Bird Spring Formation, Arrow Canyon, Nevada, U.S.A.) – I: Brachiopod and whole rock comparison. *Chem. Geol.*, **308-309**, 26-39. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.03.017>
- Brand U., Logan A., Bitner M., Griesshaber E., Azmy K., Buhl D. (2011) What is the ideal proxy of Paleozoic seawater chemistry? *Memoirs Assoc. Australas. Palaeontol.*, (41), 9-24.
- Buening N. (2001) Brachiopod Shells: Records of the Present and Keys to the Past. *Paleontol. Soc. Pap.*, **7**, 117-144. <https://doi.org/10.1017/S1089332600000930>
- Carter J., Johnson J., Gourvenec R., Hong-fei H. (1994) A revised classification of the spiriferid brachiopods. *Ann. Carnegie Museum*, **63**(4), 327-374.
- Chen J., Montañez I.P., Qi Y., Wang X., Wang Q., Lin W. (2016) Coupled sedimentary and $\delta^{13}\text{C}$ records of late Mississippian platform-to-slope successions from South China: Insight into $\delta^{13}\text{C}$ chemostratigraphy. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **448**, 162-178.
- Czerniakowski L., Lohmann K., Wilson J. (1984) Closed-system marine burial diagenesis: isotopic data from the Austin Chalk and its components. *Sedimentology*, **31**(6), 863-877. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1984.tb00892.x>
- Garbelli C., Angiolini L., Brand U., Jadoul F. (2014) Brachiopod fabric, classes and biogeochemistry: implications for the reconstruction and interpretation of seawater carbon-isotope curves and records. *Chem. Geol.*, **371**, 60-67.
- Grossman E.L., Mii H.S., Zhang C.L., Yancey T.E. (1996) Chemical variation in Pennsylvanian brachiopod shells Diagenetic, taxonomic, microstructural, and seasonal effects. *J. Sediment. Res.*, **66**(5) (Pt A), 1011-1022.
- Grossman E.L., Zhang C., Yancey T.E. (1991) Stable-isotope stratigraphy of brachiopods from Pennsylvanian shales in Texas. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **103**, 953-965.
- Gröcke D.R. (2020) Ch. 1. Carbon isotope stratigraphy: Principles and applications. *Stratigraphy and Timescales 5*. Cambridge, Academic Press, 1-40. <https://doi.org/10.1016/bs.sats.2020.08.002>
- Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. (2001) PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, **4**(1), 9. http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm
- Harris A.G., Sweet W.C. (1989) Mechanical and chemical techniques for separating microfossils from rock. Sediment and residue matrix. *Paleotechniques* (Eds R.M. Feldmann, R.E. Chapman, J.T. Hannibal). (Paleontol. Soc. Spec. Publ., **4**, 70-86).
- Hayes J.M., Strauss H., Kaufman A.J. (1999) The abundance of ^{13}C in marine organic matter and isotopic fractionation in the global biogeochemical cycle of carbon during the past 800 Ma. *Chem. Geol.*, **161**, 103-125. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(99\)00083-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(99)00083-2)
- Huck S., Wohlgend S., Coimbra R., Christ N., Weissert H. (2017) Disentangling shallow water bulk carbonate carbon isotope archives with evidence for multi stage diagenesis: An in depth component specific petrographic and geochemical study from Oman (mid Cretaceous). *Dep. Record*, **3**(2), 233-257. <https://doi.org/10.1002/dep2.35>
- Immenhauser A., Della Porta G., Kenter J.A.M., Bahamonde J.R. (2003) An alternative model for positive shifts in shallow marine carbonate $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$. *Sedimentology*, **50**, 953-959. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.2003.00590.x>
- Jenkins T.B.H., Crane D.T., Mory A.J. (1993) Conodont biostratigraphy of the Visean Series in eastern Australia. *Alcheringa. Australas. J. Palaeontol.*, **17**(3), 211-283. <https://doi.org/10.1080/03115519308619605>
- Jones G.L. (1992) Irish Carboniferous conodonts record maturation levels and the influence of tectonism, igneous activity and mineralization. *Terra Nova*, **4**(4), 238-244.
- Jope H.M. (1965) Composition of brachiopod shell. *Treatise on Invertebrate Paleontology*. Pt H, Brachiopoda. Geological Society of America & University of Kansas Press. New York & Lawrence. (1), 156-164.
- Killingley J.S. (1983) Effects of diagenetic recrystallization on $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ values of deep-sea sediments. *Nature*, **301**(5901), 594-597. [10.1038/301594a0](https://doi.org/10.1038/301594a0)
- Lee X., Wan G. (2000) No vital effect on $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values of fossil brachiopod shells. Middle Devonian of China. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **64**(15), 2649-2664.
- Lohmann K.C. (1988) Geochemical patterns of meteoric diagenetic systems and their application to studies of paleokarst. *Paleokarst*. Berlin, Springer, 58-80.
- Lowenstam H.A. (1961) Mineralogy, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios, and strontium and magnesium contents of recent and fos-

- sil brachiopods and their bearing on the history of the oceans. *J. Geol.*, **69**, 241-260.
- McConnaughey T.A., Burdett J., Whelan J.F., Paull C.K. (1997) Carbon isotopes in biological carbonates: Respiration and photosynthesis. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **61**(3), 611-622.
- Mii H., Grossman E. (1994) Late Pennsylvanian seasonality reflected in the ^{18}O and elemental composition of a brachiopod shell. *Geology*, **22**, 661-664.
- Mii H., Grossman E.L., Yancey T.E. (1997) Stable carbon and oxygen isotope shifts in Permian seas of West Spitsbergen – global change or diagenetic artifacts. *Geology*, **25**, 227-230.
- Mii H., Grossman E.L., Yancey T.E. (1999) Carboniferous isotope stratigraphies of North America: Implications for Carboniferous paleoceanography and Mississippian glaciation. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **111**(7), 960-973. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1999\)111%3C0960:CI SONA%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1999)111%3C0960:CI SONA%3E2.3.CO;2)
- Mii H.S., Grossman E.L., Yancey T.E., Chuvashov B., Egorov A. (2001) Isotopic records of brachiopod shells from the Russian Platform evidence for the onset of mid Carboniferous glaciation. *Chem. Geol.*, **175**(1-2), 133-147.
- Pagel M., Barbin V., Blanc P., Ohnenstetter D. (2000) Cathodoluminescence in Geosciences: An Introduction. *Cathodoluminescence in Geosciences*. Berlin, Heidelberg, Springer, 1-21. https://doi.org/10.1007/978-3-662-04086-7_1
- Popp B.N., Anderson T.F., Sandberg P.A. (1986) Brachiopods as indicators of original isotopic compositions in some Paleozoic limestones. *GSA Bull.*, **97**, 1262-1269.
- Qie W., Zhang X.H., Du Y.S., Zhang Y. (2011) Lower Carboniferous carbon isotope stratigraphy in South China: Implications for the Late Paleozoic glaciation. *Sci. China Earth Sci.*, **54**, 84-92. <https://doi.org/10.1007/s11430-010-4062-4>
- Rush P.F., Chafetz H.S. (1990) Fabric-retentive, non-luminescent brachiopods as indicators of original $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ composition: A test. *J. Sediment. Petrol.*, **60**, 968-981.
- Saltzman M.R. (2002) Carbon and oxygen isotope stratigraphy of the Lower Mississippian (Kinderhookian–lower Osagean), western United States: Implications for seawater chemistry and glaciation. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **114**, 96-108.
- Saltzman M.R., Groessens E., Zhuravlev A. (2004) Carbon cycle models based on extreme changes in $\delta^{13}\text{C}$: An example from the Lower Mississippian. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **213**, 359-377. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(04\)00389-X](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(04)00389-X)
- Saltzman M.R., Thomas, E. (2012) Carbon isotope stratigraphy. *Geol. Time Scale*, 207-232. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59425-9.00011-1>
- Samtleben C., Munneke A., Bickert T., Pätzold J. (2001) Shell succession, assemblage and species dependent effects on C/O-isotopic composition of brachiopods—Examples from the Silurian of Gotland. *Chem. Geol.*, **175**, 61-107.
- Scholle P.A., Arthur M.A. (1980) Carbon isotope fluctuations in Cretaceous pelagic limestones: Potential stratigraphic and petroleum exploration tool. *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, **64**, 67-87.
- Tomašových A., Farkaš J. (2005) Cathodoluminescence of Late Triassic terebratulid brachiopods: implications for growth patterns. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **216**(3-4), 215-233. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2004.11.010>
- Van Geldern R., Joachimski M.M., Day J., Jansen U., Alvarez F., Yolkina E.A., Ma X.P. (2006) Carbon, oxygen and strontium isotope records of Devonian brachiopod shell calcite. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **240**(1-2), 47-67.
- Veizer J., Ala D., Azmy K., Bruckschen P., Buhl D., Bruhn F., Carden G.A.F., Diener A., Ebner S., Godderis Y., Jasper T., Korte C., Pawellek F., Podlaha O.G., Strauss H. (1999) Sr-87/Sr-86, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater. *Chem. Geol.*, **161**(1-3), 59-88. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(99\)00081-9](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(99)00081-9)
- Wefer, G., Berger W.H. (1991) Isotope paleontology: growth and composition of extant calcareous species. *Mar. Geol.*, **100**, 207-248.
- Zhuravlev A.V., Plotitsyn A.N., Gruzdev D.A., Smoleva I.V. (2020) Ch. 9. Carbon isotope stratigraphy of the Tournaisian (Lower Mississippian) successions of NE Europe. Carbon Isotope Stratigraphy. *Stratigraphy and Timescales 5*. Cambridge, Academic Press, 467-528.
- Zhuravlev A.V., Vevel Y.A., Gruzdev D.A., Erofeevsky A.V. (2023) Late Mississippian (early Serpukhovian) carbon isotope record of northern Laurussia: A proposal for the Viséan/ Serpukhovian boundary. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, **40**(1), 35-43.

REFERENCES

- Al-Assam I., Veizer J. (1982) Chemical Stabilization of Low-Mg Calcite: An Example of Brachiopods. *SEPM J. Sediment. Res.*, **52**, 1101-1109.
- Al-Husseini M., Ruebsam W. (2020) Ch. 2. Interpreting Phanerozoic $\delta^{13}\text{C}$ patterns as periodic glacio-eustatic sequences. *Stratigraphy and Timescales 5*. Cambridge, Academic Press, 41-105. <https://doi.org/10.1016/bs.sats.2020.08.005>
- Angiolini L., Stephenson M., Leng M. J., Jadoul F., Millward D., Aldridge A., Andrews J., Chenery S., Williams G. (2011) Heterogeneity, cyclicity and diagenesis in a Mississippian brachiopod shell of palaeoequatorial Britain. *Terra Nova*, **24**(1), 16-26.
- Armendariz M., Rosales I., Quesada C. (2008) Oxygen isotope and Mg/Ca composition of Late Viséan (Mississippian) brachiopod shells from SW Iberia: Palaeoclimatic and palaeogeographic implications in northern Gondwana. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **268**(1-2), 65-79.
- Barbin V. (2000) Cathodoluminescence of Carbonate Shells: Biochemical vs Diagenetic Process. *Cathodoluminescence in Geosciences*. Berlin, Heidelberg, Springer, 303-329. https://doi.org/10.1007/978-3-662-04086-7_12
- Barbin V., Gaspard D. (1995) Cathodoluminescence of recent articulate brachiopod shells. Implications for growth stages and diagenesis evaluation. *Geobios*, (18), 39-45.
- Bogush O.I., Ivanova R.M., Luchinina V.A. (1990) Calcareous algae of the Upper Famennian and Lower Carboniferous of the Urals and Siberia. Novosibirsk, Nauka Publ., sib. otd., 160 p. (In Russ.)
- Brand U. (1989) Biogeochemistry of Late Paleozoic North American brachiopods and secular variation of seawater composition. *Biogeochemistry*, **7**(3), 159-193.
- Brand U., Legrand-Blain M. (1993) Paleocology and biogeochemistry of brachiopods from the Devonian – Car-

- boniferous boundary interval of the Griotte Formation, La Serre, Montagne Noire, France. *Ann. Soc. Geol. Belg.*, (115), 497-505.
- Brand U., Jiang G., Azmy K., Bishop J., Montañez I.P. (2012) Diagenetic evaluation of a Pennsylvanian carbonate succession (Bird Spring Formation, Arrow Canyon, Nevada, U.S.A. 1. Brachiopod and whole rock comparison. *Chem. Geol.*, **308-309**, 26-39. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.03.017>.
- Brand U., Logan A., Bitner M., Griesshaber E., Azmy K., Buhl D. (2011) What is the ideal proxy of Paleozoic seawater chemistry? *Memoirs Assoc. Australas. Palaeontol.*, (41), 9-24.
- Buening N. (2001) Brachiopod Shells: Recorders of the Present and Keys to the Past. *Paleontol. Soc. Pap.*, **7**, 117-144. <https://doi.org/10.1017/S1089332600000930>
- Carter J., Johnson J., Gourvenec R., Hong-fei H. (1994) A revised classification of the spiriferid brachiopods. *Annals of the Carnegie Museum*, **63**(4), 327-374.
- Chen J., Montañez I.P., Qi Y., Wang X., Wang Q., Lin W. (2016) Coupled sedimentary and $\delta^{13}\text{C}$ records of late Mississippian platform-to-slope successions from South China: Insight into $\delta^{13}\text{C}$ chemostratigraphy. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **448**, 162-178.
- Czerniakowski L., Lohmann K., Wilson J. (1984) Closed-system marine burial diagenesis: isotopic data from the Austin Chalk and its components. *Sedimentology*, **31**(6), 863-877. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1984.tb00892.x>
- Dmitrieva E.V., Ershova G.I., Librovich V.L., Nekrasova V.I., Oreshnikova E.I. (1968) Atlas of textures and structures of sedimentary rocks. Pt 2. Carbonate rocks. Moscow, Nedra Publ., 700 p. (In Russ.)
- Erlanger O.A. (1987) Microstructure of the shell wall of spiriferids of the genus *Davidsonina*. *Paleontol. J.*, (1), 124-128. (In Russ.)
- Garbelli C., Angiolini L., Brand U., Jadoul F. (2014) Brachiopod fabric, classes and biogeochemistry: implications for the reconstruction and interpretation of seawater carbon-isotope curves and records. *Chem. Geol.*, **371**, 60-67.
- Grossman E.L., Zhang C., Yancey T.E. (1991) Stable-isotope stratigraphy of brachiopods from Pennsylvanian shales in Texas. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **103**, 953-965.
- Grossman E.L., Mii H.S., Zhang C.L., Yancey T.E. (1996) Chemical variation in Pennsylvanian brachiopod shells Diagenetic, taxonomic, microstructural, and seasonal effects. *J. Sediment. Res.*, **66**(5) (Pt A), 1011-1022.
- Gröcke D.R. (2020) Ch. 1. Carbon isotope stratigraphy: Principles and applications. *Stratigraphy and Timescales 5*. Cambridge, Academic Press, 1-40. <https://doi.org/10.1016/bs.sats.2020.08.002>
- Gruzdev D.A. (2021) Late Devonian-Early Carboniferous isolated carbonate platforms of the North of the Urals and Pay-Khoy. *Vestnik Geonauk*, **10**, 3-15. (In Russ.)
- Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. (2001) PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, **4**(1), 9. http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm
- Harris A.G., Sweet, W.C. (1989) Mechanical and chemical techniques for separating microfossils from rock. Sediment and residue matrix. *Paleotechniques* (Eds R.M. Feldmann, R.E. Chapman, J.T. Hannibal). (Paleontol. Soc. Spec. Publ., **4**, 70-86).
- Hayes J.M., Strauss H., Kaufman A.J. (1999) The abundance of ^{13}C in marine organic matter and isotopic fractionation in the global biogeochemical cycle of carbon during the past 800 Ma. *Chem. Geol.*, **161**, 103-125. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(99\)00083-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(99)00083-2)
- Huck S., Wohllwend S., Coimbra R., Christ N., Weissert H. (2017) Disentangling shallow water bulk carbonate carbon isotope archives with evidence for multi stage diagenesis: An in depth component specific petrographic and geochemical study from Oman (mid Cretaceous). *Depos. Record*, **3**(2), 233-257. <https://doi.org/10.1002/dep2.35>
- Immenhauser A., Della Porta G., Kenter J.A.M., Bahamonde J.R. (2003) An alternative model for positive shifts in shallow marine carbonate $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$. *Sedimentology*, **50**, 953-959. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.2003.00590.x>
- Ivanova E.A. (1971) Introduction to the study of spiriferidae. *Trudy PIN*, **13**, 105. Moscow, Nauka Publ. (In Russ.)
- Ivanova R.M., Stepanova T.I. (2021) Algaeflora and microfacies of the Lower Carboniferous of the Urals and adjacent territories. Ekaterinburg, RIO UrO RAN Publ., 264 p. (In Russ.)
- Jenkins T.B.H., Crane D.T., Mory A.J. (1993) Conodont biostratigraphy of the Viséan Series in eastern Australia. Alcheringa. *Australas. J. Palaeontol.*, **17**(3), 211-283. <https://doi.org/10.1080/03115519308619605>
- Jones G.L. (1992) Irish Carboniferous conodonts record maturation levels and the influence of tectonism, igneous activity and mineralization. *Terra Nova*, **4**(4), 238-244.
- Jope H.M. (1965) Composition of brachiopod shell. *Treatise on Invertebrate Paleontology. Pt H, Brachiopoda*. Geological Society of America & University of Kansas Press. N. Y. & Lawrence. V. 1, 156-164.
- Kalashnikov N.V. (1974) Early Carboniferous brachiopods of the Pechora Urals. Leningrad, Nauka Publ., 220 p. (In Russ.)
- Kalashnikov N.V. (1963) On the genus *Davidsonina* from the Carboniferous of the Northern Urals. *Paleontol. J.*, (2), 43-53. (In Russ.)
- Killingley J.S. (1983) Effects of diagenetic recrystallization on $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ values of deep-sea sediments. *Nature*, **301**(5901), 594-597.
- Lee X., Wan G. (2000) No vital effect on $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values of fossil brachiopod shells. Middle Devonian of China. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **64**(15), 2649-2664.
- Lohmann K.C. (1988) Geochemical patterns of meteoric diagenetic systems and their application to studies of paleokarst. Paleokarst. Berlin, Springer, 58-80.
- Lowenstam H.A. (1961) Mineralogy, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios, and strontium and magnesium contents of recent and fossil brachiopods and their bearing on the history of the oceans. *J. Geol.*, **69**, 241-260.
- McConnaughey T.A., Burdett J., Whelan J.F., Paull C.K. (1997) Carbon isotopes in biological carbonates: Respiration and photosynthesis. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **61**(3), 611-622.
- Mii H., Grossman E. (1994) Late Pennsylvanian seasonality reflected in the ^{18}O and elemental composition of a brachiopod shell. *Geology*, **22**, 661-664.
- Mii H., Grossman E.L., Yancey T.E. (1997) Stable carbon and oxygen isotope shifts in Permian seas of West Spitsbergen – global change or diagenetic artifacts. *Geology*, **25**, 227-230.

- Mii H., Grossman E.L., Yancey T.E. (1999) Carboniferous isotope stratigraphies of North America: Implications for Carboniferous paleoceanography and Mississippian glaciation. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **111**(7), 960-973. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1999\)111%3C0960:CI SONA%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1999)111%3C0960:CI SONA%3E2.3.CO;2)
- Mii H.S., Grossman E.L., Yancey T.E., Chuvashov B., Egorov A. (2001) Isotopic records of brachiopod shells from the Russian Platform evidence for the onset of mid Carboniferous glaciation. *Chem. Geol.*, **175**(1-2), 133-147.
- Pagel M., Barbin V., Blanc P., Ohnenstetter D. (2000) Cathodoluminescence in Geosciences: An Introduction. *Cathodoluminescence in Geosciences*. Berlin, Heidelberg, Springer, 1-21. https://doi.org/10.1007/978-3-662-04086-7_1
- Poletaev V.I. (2018) Atlas of Carboniferous spiriferids of Eastern Europe. Kiev, National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Geological Sciences, 408 p. (In Russ.)
- Popp B.N., Anderson T.F., Sandberg P.A. (1986) Brachiopods as indicators of original isotopic compositions in some Paleozoic limestones. *GSA. Bull.*, **97**, 1262-1269.
- Qie W., Zhang X.H., Du Y.S., Zhang Y. (2011) Lower Carboniferous carbon isotope stratigraphy in South China: Implications for the Late Paleozoic glaciation. *Science China Earth Sciences*, **54**, 84-92. <https://doi.org/10.1007/s11430-010-4062-4>
- Rush P.F., Chafetz H.S. (1990) Fabric-retentive, non-luminescent brachiopods as indicators of original $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ composition: A test. *J. Sediment. Petrol.*, **60**, 968-981.
- Saltzman M.R. (2002) Carbon and oxygen isotope stratigraphy of the Lower Mississippian (Kinderhookian-lower Osagean), western United States: Implications for seawater chemistry and glaciation. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **114**, 96-108.
- Saltzman M.R., Groessens E., Zhuravlev A. (2004) Carbon cycle models based on extreme changes in $\delta^{13}\text{C}$: An example from the Lower Mississippian. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **213**, 359-377. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(04\)00389-X](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(04)00389-X)
- Saltzman M.R., Thomas E. (2012) Carbon isotope stratigraphy. *The Geologic Time Scale*, 207-232. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59425-9.00011-1>
- Samtleben C., Munnecke A., Bickert T., Pätzold J. (2001) Shell succession, assemblage and species dependent effects on C/O-isotopic composition of brachiopods – Examples from the Silurian of Gotland. *Chem. Geol.*, **175**, 61-107.
- Scholle P.A., Arthur M.A. (1980) Carbon isotope fluctuations in Cretaceous pelagic limestones: Potential stratigraphic and petroleum exploration tool. *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, **64**, 67-87.
- Shishkin M.A., Malykh O.N., Popov P.E., Kolesnik L.S. (2013) State geological map of the Russian Federation at a scale of 1:200 000 sheet Q-41-V, VI (second edition). Moscow, MF VSEGEI, Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, Mireko. (In Russ.)
- Stratigraphic schemes of the Urals (Precambrian, Palaeozoic). (1993) Mezhd. Strat. Committee of Russia. Ekaterinburg, IGG UrO RAN, Uralgeolcom, 151 sh. (In Russ.)
- Timonin N.I. (1998) Pechora plate: history of geological development in the Phanerozoic. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 238 p. (In Russ.)
- Tomašových A., Farkaš J. (2005) Cathodoluminescence of Late Triassic terebratulid brachiopods: implications for growth patterns. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **216**(3-4), 215-233. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2004.11.010>
- Van Geldern R., Joachimski M.M., Day J., Jansen U., Alvarez F., Yolkin E.A., Ma X.P. (2006) Carbon, oxygen and strontium isotope records of Devonian brachiopod shell calcite. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **240**(1-2), 47-67.
- Veizer J., Ala D., Azmy K., Bruckschen P., Buhl D., Bruhn F., Carden G.A.F., Diener A., Ebner S., Godderis Y., Jasper T., Korte C., Pawellek F., Podlaha O.G., Strauss H. (1999) Sr-87/Sr-86, delta C-13 and delta O-18 evolution of Phanerozoic seawater. *Chem. Geol.*, **161**(1-3), 59-88. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(99\)00081-9](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(99)00081-9)
- Vinogradov V.I. (2005) Advantages and limitations of the isotopic methods in reconstructing sedimentational environments. *Biosphere-ecosystem-biota in the history of the Earth. Paleobiogeographic aspects. To the Centenary of Academician V.V. Menner. (Trudy Geol. Instituta, (516), 433-466)*. (In Russ.)
- Wefer G., Berger W.H. (1991) Isotope paleontology: growth and composition of extant calcareous species. *Mar. Geol.*, **100**, 207-248.
- Yanishevskii M.E. (1926) Materials to the knowledge of the Palaeozoic fauna of Novaya Zemlya. *Trudy Geol. i Mineral. Muzeya Akademii Nauk*, **5**(4), 73-116. (In Russ.)
- Yudin V.V. (1994) Orogeny of the North of the Urals and Pai-Khoy. Ekaterinburg, UIF "Nauka", 284 p. (In Russ.)
- Zhuravlev A.V. (2003) Conodonts of the Upper Devonian-Lower Carboniferous of north-eastern European Russia. Saint-Petersburg, VSEGEI Publ., 85 p. (In Russ.)
- Zhuravlev A.V. (2017) Estimation of Palaeozoic sediments thermal maturity of Northern Pay-Khoy parautochthone on the basis of conodont colour alteration indexes. *Lithosphere (Russia)*, (1), 44-52. (In Russ.)
- Zhuravlev A.V., Plotitsyn A.N., Gruzdev D.A., Smoleva I.V. (2020) Ch. 9. Carbon isotope stratigraphy of the Tournaisian (Lower Mississippian) successions of NE Europe. Carbon Isotope Stratigraphy. *Stratigraphy and Timescales 5*. Cambridge, Academic Press, 467-528.
- Zhuravlev A.V., Vevel Y.A., Gruzdev D.A., Erofeevsky A.V. (2023) Late Mississippian (early Serpukhovian) carbon isotope record of northern Laurussia: A proposal for the Viséan. Serpukhovian boundary. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, **40**(1), 35-43.