

УДК 551.734.5(470.5)

DOI: 10.24930/1681-9004-2026-26-4-857-875

Среднефаменский изотопный углеродный экскурс в разрезе на р. Изъяель (верхний девон, гряда Чернышева)

А. Н. Плотницын, Д. А. Груздев

Институт геологии им. академика Н.П. Юшкина ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 167982, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, 54, e-mails: anplotitsyn@rambler.ru; dag79@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.07.2025 г., принята к печати 30.12.2025 г.

Объект исследования. В статье рассматриваются вариации изотопного состава углерода в карбонатных породах, слагающих среднефаменскую часть разреза на р. Изъяель (юг гряды Чернышева, северо-восток европейской части России). **Цель исследования** заключается в анализе изотопного состава углерода карбонатных пород исследуемого разреза и определении стратиграфического значения имеющихся изотопных отклонений. **Материалы и методы.** Материалы включают данные литологического исследования (76 шлифов), биостратиграфического анализа (51 проба на микрофаунистические остатки) и геохимических исследований (69 анализов на $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ и 24 анализа на $\text{C}_{\text{орг}}$). Для микропалеонтологических исследований карбонатные породы дезинтегрировались в 7–10%-м растворе уксусной кислоты по стандартной методике. Для оценки того, насколько данные изотопных анализов достоверно отражают первичный изотопный состав древней морской воды, использовался комплекс диагностических методов (скрининг-тестов). **Результаты.** Среднефаменская часть разреза на р. Изъяель представлена комплексом кремнисто-глинисто-карбонатных пород, которые сформировались в глубоководно-шельфовых условиях. Стратиграфический объем снизу ограничен интервалом конодонтовых зон Lower crepida–Upper rhomboidea, а сверху – зоной Upper marginifera. Вблизи нижней границы конодонтовой зоны Lower marginifera установлены облегчение изотопного состава углерода (амплитуда отклонения $\approx 1.5\text{--}2.0\text{‰}$) и последующий положительный сдвиг (амплитуда сдвига $\approx 4\text{‰}$), которые идентифицируются в разнофациальных географически существенно удаленных друг от друга разрезах (Центральная и Восточная Европа, Восточная и Юго-Восточная Азия, Северная Америка, Австралия). **Выводы.** Отрицательная изотопная аномалия $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ вблизи нижней границы зоны Lower marginifera и последующий положительный сдвиг в интервале зон Lower marginifera–Upper marginifera могут служить надежным геохимическим репером при проведении стратиграфических построений в пределах Тимано-Североуральского региона. Субглобальный/глобальный характер распространения изотопного отклонения обуславливает потенциал для использования данного репера при проведении межрегиональных корреляций.

Ключевые слова: верхний девон, фаменский ярус, гряда Чернышева, биостратиграфия, конодонты, $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ изотопная стратиграфия

Источник финансирования

Исследования проводились в рамках государственного задания по теме 122040600008-5

Mid-Famennian carbon isotope shift in the Iz'yayol River section (Upper Devonian, Chernyshev Ridge)

Artem N. Plotitsyn, Denis A. Gruzdev

N.P. Yushkin Institute of Geology, FRC Komi SC UB RAS, 54 Pervomaiskaya st., Syktyvkar 167000, Russia, e-mails: anplotitsyn@rambler.ru; dag79@yandex.ru

Received 25.07.2025, accepted 30.12.2025

Research subject: This paper examines variations in the carbon isotopic composition of carbonate rocks from the middle Famennian part of the Iz'yayol River section (south of the Chernyshev Ridge, north-east of European part of Russia). **Aim.** To analyze the carbon isotopic composition of the carbonate rocks under study and assess the stratigraphic significance of the observed isotopic deviations. **Materials and methods.** The research was based a lithological analysis of 76 thin sections, a biostratigraphic analysis of conodonts from 51 limestone samples, and a geochemical analysis of 69 samples for $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ and 24 samples for C_{org} analyses. For micropalaeontological studies, the carbonate rocks were disintegrated in a

Для цитирования: Плотницын А.Н., Груздев Д.А. (2026) Среднефаменский изотопный углеродный экскурс в разрезе на р. Изъяель (верхний девон, гряда Чернышева). *Литосфера*, **26**(4), 857–875. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2026-26-4-857-875>. EDN: YQKCIS

For citation: Plotitsyn A.N., Gruzdev D.A. (2026) Mid-Famennian carbon isotope shift in the Iz'yayol River section (Upper Devonian, Chernyshev Ridge). *Lithosphere (Russia)*, **26**(4), 857–875. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2026-26-4-857-875>. EDN: YQKCIS

7–10% acetic acid solution using standard techniques. A series of screening tests was performed to determine whether the isotopic data preserve the primary isotopic composition of ancient seawater. **Results.** The middle Famennian succession of the Iz'yayol River section consists of siliceous, clayey-carbonate rocks, which formed in slope deep-water shelf conditions. This section spans the conodont zonal interval from the Lower *crepida* Zone to the Upper *rhomboidea* Zone and extends into the Upper *marginifera* Zone. Near the base of the Lower *marginifera* Zone, a negative shift in the carbon isotopic composition (≈ 1.5 –2‰) and a subsequent positive shift (≈ 4 ‰) was established; these shifts are also identified in different facies of geographically significantly distant sections of Central and Eastern Europe, East and Southeast Asia, North America, and Australia. **Conclusions.** The negative $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ isotope shift near the base of the Lower *marginifera* Zone along with the subsequent positive shift in the Lower *marginifera*–Upper *marginifera* zonal interval can be used for solving stratigraphic problems within the Timan–North Urals region. The subglobal/global character of these isotopic deviations indicates their potential for interregional stratigraphic correlation.

Keywords: Upper Devonian, Famennian, Chernyshev Ridge, biostratigraphy, conodonts, $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ isotope stratigraphy

Funding information

The study was supported by the state project No. 122040600008-5

Acknowledgements

The authors are grateful to the staff of the Institute of Geology, Federal Research Centre Komi Science Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IG FRC Komi SC UB RAS); A.V. Zhuravlev for valuable consultations; A.O. Ivanov and S.V. Nikolaev for diagnostics of fish remains and ammonoids; D.A. Bushnev and V.A. Lobanov for consultations and analytical support in the field of organic geochemistry; I.V. Smoleva and the Isotope Geochemistry Research Group for providing the opportunity to conduct isotope geochemical analyses; and E.M. Tropnikov for obtaining SEM images of the fossils.

ВВЕДЕНИЕ

Изотопный состав углерода ($\delta^{13}\text{C}$) в настоящее время является мощным инструментом для решения стратиграфических задач и реконструкции гидрохимических и палеоклиматических условий. В современной стратиграфии изотопные методы стали стандартным подходом, применяемым в комплексе с биостратиграфическими, другими хемос- и циклостратиграфическими исследованиями. Особую значимость метод приобретает при изучении глобальных геологических событий. Резкие колебания $\delta^{13}\text{C}$ в карбонатных породах ($\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$) часто сопутствуют ключевым событиям в истории Земли, включая пять крупнейших массовых вымираний фанерозоя, известных как Большая пятерка (Big Five) (см. обзорные работы: Walliser, 1996; Qie et al., 2019; Racki, 2020). Отдельный интерес представляют изотопные вариации углерода в верхнедевонских отложениях. Этот стратиграфический интервал характеризуется несколькими крупными глобальными биотическими кризисами (события Келльвассер и Хангенберг), а также является отражением начальной фазы развития Позднепалеозойского ледникового периода (LPIA).

В фаменском ярусе (верхний девон) по всему миру регистрируется несколько крупных аномалий изотопов углерода ($\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$). В самых низах фамена (интервал конодонтовых зон Lower triangularis–Middle triangularis или *Palmatolepis subperlobata*–*Palmatolepis delicatula platys*) диагностируется положительный сдвиг значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$, который наряду с верхнефранскими экскурсами ассоциирует-

ся обычно со следами проявления события Келльвассер (Buggisch, Joachimski, 2006; Racki et al., 2018; Piszarszowska, Racki, 2020; и др.). В терминальном фамене (конодонтовая зона Upper praesulcata или нижняя часть зоны *Protognathodus kockeli*) отмечается высокоамплитудный положительный экскурс $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$, который часто имеет два отчетливых пика. Эти положительные сдвиги именуются HICE или HngICE и связываются с Хангенбергским событием (Kaiser et al., 2006; Cramer et al., 2008; Kumpan et al., 2014; Qie et al., 2016; Piszarszowska et al., 2020; Plotitsyn et al., 2024). Изотопные аномалии, связанные с этими двумя событиями, длительное время успешно используются при решении стратиграфических задач ввиду сближенности с границами франского и фаменского ярусов, а также девонской и каменноугольной систем. “Внутрифаменская” изотопная картина $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ остается в значительной степени менее изученной, за исключением небольшого количества работ (см., например: Buggisch, Joachimski, 2006; Piszarszowska, Racki, 2020; Груздев и др., 2023). При этом в фаменском ярусе помимо Келльвассерского и Хангенбергского регистрируется еще ряд событий более низкого порядка (например, Nehden, Condroz, Enkeberg, Annulata и Dasberg (Becker, 1993; Walliser, 1996; Becker et al., 2004)), которые охарактеризованы в значительно меньшей степени.

В нижнем и среднем фамене, согласно данным (Buggisch, Joachimski, 2006), отмечается несколько уровней существенных вариаций изотопного состава углерода: облегчение к конодонтовой зоне Lower crepida с минимумом значений вблизи гра-

ницы зон Upper rhomboidea и Lower marginifera, утяжеление в пределах зоны Lower marginifera с максимумом в пределах зон Upper marginifera и Uppermost marginifera. Отрицательный экскурс изотопного состава углерода вблизи границы зон Upper rhomboidea и Lower marginifera (или положительный сдвиг в пределах зоны Lower marginifera как утяжеление изотопного состава углерода) регистрируются в ряде разнофациальных разрезов по всему миру (Saltzman, 2005; Buggisch, Joachimski, 2006; Königshof et al., 2012; Girard et al., 2017), в том числе в разрезах Предуральского краевого прогиба (Груздев и др., 2023). В качестве возможных причин среднефаменского глобального изотопного отклонения рассматривались интенсификация вулканической и гидротермальной деятельности, усиление терригенного стока из-за регрессии, относительно высокое содержание углекислоты в атмосфере и локальное снижение первичной биопродуктивности (Груздев и др., 2023).

Актуальность исследования среднефаменской изотопной аномалии в частных разрезах связана с ее стратиграфическим значением вкупе с ее предполагаемым глобальным или как минимум субглобальным распространением (Груздев и др., 2023). Глобальные изотопные отклонения в настоящее время широко используются при разномасштабных корреляционных построениях и в диагностике изменений окружающей палеосреды. Потенциально результаты исследования среднефаменской углеродной изотопной аномалии могут найти практическое применение при совершенствовании региональных стратиграфических схем Тимано-Печорской провинции и ее обрамления, учитывая современный тренд в комплексном подходе к стратиграфическим исследованиям. Кроме того, детальные исследования “внутренней части” фаменского яруса актуальны в связи с открытым вопросом о его подъярусном подразделении.

Настоящая статья отражает результаты комплексного (литологического, био- и хемотратиграфического) исследования среднефаменской части разреза на р. Изъяель (юг гряды Чернышева, северная часть Предуральского краевого прогиба). Целью работы являлось выяснение корреляционного потенциала вариаций изотопного состава углерода ($\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$) в среднем фамене для их использования в качестве инструмента для региональной, межрегиональной и, потенциально, глобальной стратиграфической корреляции.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материалы для исследования получены коллективом авторов в процессе экспедиционных работ в составе геологического отряда Института геологии им. академика Н.П. Юшкина Коми НЦ УрО РАН (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН) в 2015 г. на р. Изъя-

ель (Печорский район Республики Коми, Европейский Северо-Восток России). Анализы и изготовление шлифов и шлифовок проводились в ЦКП “Геонаука” ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар).

Палеонтологические остатки (конодонтовые элементы, остатки рыб, раковины остракод и их ядра) выделялись из нерастворимого остатка карбонатных разностей путем дезинтеграции породы в 7–10%-м растворе уксусной кислоты по стандартной методике (Harris, Sweet, 1989). Скелетные остатки ископаемых организмов выделялись под бинокулярными микроскопами “ЛабОстеми-4” и МБС-10. В общей сложности химической дезинтеграции подвергнута 51 проба средней массой 1 кг.

Для детализации литологической характеристики было проанализировано 76 шлифов. Изучение и фотографирование шлифов проводилось под микроскопом “Полам-215” с цифровой камерой МС-20.

Разложение карбонатов и измерение изотопного состава углерода и кислорода в режиме непрерывного потока производились на аналитическом комплексе, включающем в себя систему подготовки и ввода проб Gas Bench II, соединенную с масс-спектрометром DELTA V Advantage фирмы Thermo Fisher Scientific (Бремен, Германия). Значения $\delta^{13}\text{C}$ даны в промилле относительно стандарта VPDB (Vienna Pee Dee Belemnite), $\delta^{18}\text{O}$ – стандарта VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water). При калибровке были использованы международные эталонные материалы МАГАТЭ NBS18 (calcite) и NBS19 (TS-limestone). Ошибка определения составляет $\pm 0.1\%$.

Содержание органического углерода в породе ($\text{C}_{\text{орг}}$) определялось на приборе МЕТАБАК CS-30 при предварительном получении нерастворимого в 14%-й соляной кислоте остатка породы (НОП). Предел допускаемого относительного среднего квадратичного отклонения (СКО) случайной составляющей погрешности измерений массовой доли $\text{C}_{\text{орг}}$ для значений свыше 0.05% до 5% включительно достигает 3–5% от результата. Пределы допускаемой относительной погрешности измерений массовой доли для значений более 0.05% до 5% включительно составляет $\pm 6\text{--}10\%$ от результата.

Для оценки надежности изотопной записи использовался ряд скрининговых тестов: визуальный осмотр и высверливание карбонатного порошка для анализа алмазным микробуром строго со свежих поверхностей образцов; оптическое исследование в шлифах (с осторожностью применялись образцы с серьезными вторичными преобразованиями); использовалась составная диаграмма скрининга, на которой по соотношению $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ и $\delta^{18}\text{O}_{\text{карб}}$ выделяется область, где первичная природа полученного изотопного сигнала маловероятна (основана на работах (Lohmann, 1988; Immenhauser

et al., 2003; Qie et al., 2011; Chen et al., 2016; Huck et al., 2017; Zhuravlev et al., 2020)). Для составления диаграммы изотопные значения кислорода относительно стандарта VSMOW (авторы получили данные относительно этого стандарта) были переведены в стандарт VPDB.

ЛИТОЛОГО-ПАЛЕОНТОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЗРЕЗА

Разрез верхнедевонско-нижнекаменноугольных отложений на р. Изъель расположен в ее среднем течении, приблизительно в 30 км на Ю-ЮВ от станции Косью (Печорский район Республики Коми) и примерно в 14 км выше по течению от места слияния с р. Косью. Фаменско-турнейские отложения образуют здесь выходы в виде протяженных низких обнажений в бортовых частях реки (обн. GER1-GER5) (рис. 1). В данной статье рассматривается только ниже-среднефаменская часть упомянутого разреза, которая вскрывается в обнажении GER2 (координаты обнажения N 65°21'48" E

58°41'11"). Породы обнажения GER2 падают на СВ-В (аз. пад. 67°) под углом 62°.

В обнажении GER2 выделяются 8 пачек, которые дифференцируются на основании состава и структурных характеристик пород (рис. 2). Описание ведется снизу вверх по разрезу, вниз по течению реки.

Пачка 1 (образцы GER2-1–GER2-5) представлена переслаивающимися известняками (мадстоуны в основании и средней части пачки до грейнстоунов в кровле пачки) и аргиллитами. Известняки серого, темно-серого цвета микритовые, часто перекристаллизованы (до тонкокристаллических) с комковатой, волнисто-слоистой или массивной текстурой. Отмечается рассеянная сульфидизация. В прикровельной части пачки отмечаются “кальцисферово”-литокластовые известняки (рис. 3а). Аргиллиты темно-серого, до черного цвета, нередко с карбонатными конкрециями. Органические остатки представлены криноидеями, брахиоподами, остракодами, редкими рыбами, водорослями и немногочисленными

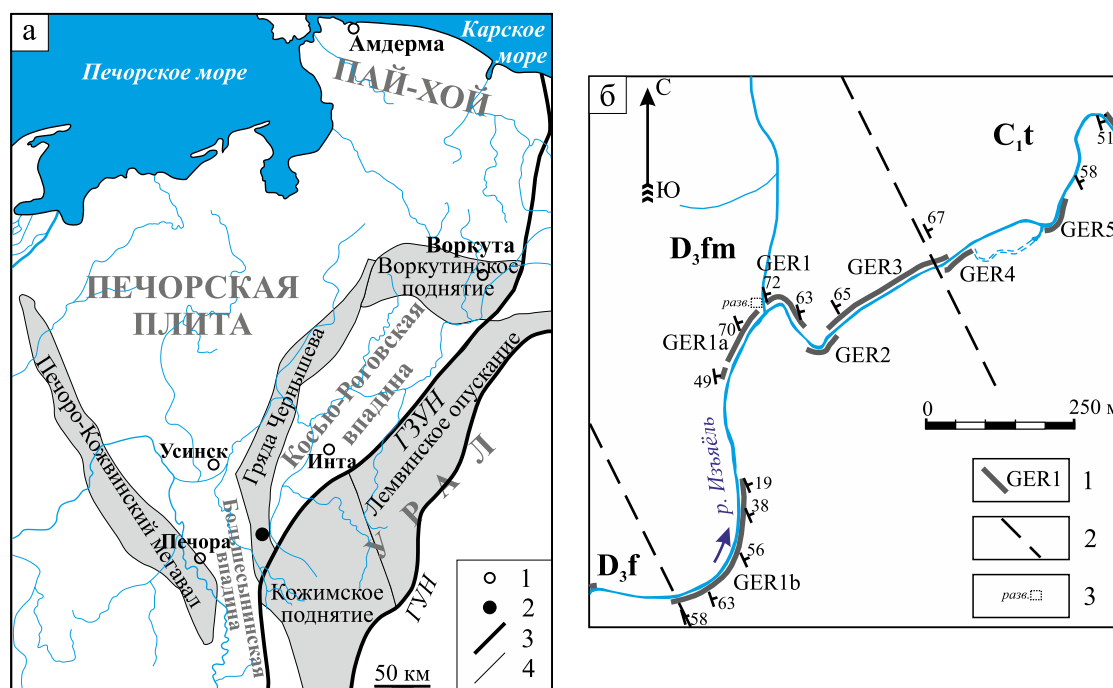


Рис. 1. Схема расположения изученного района и обнажения GER2.

а – структурная схема северо-востока европейской части России (Тимонин, 1998 с упрощениями): 1 – города, 2 – район исследований, 3 – надвиги, 4 – границы некоторых структур; ГЗУН – Главный Западно-Уральский надвиг, ГУН – Главный Уральский надвиг; б – геологическая схема среднего течения р. Изъель (Плотицын, Груздев, 2019): 1 – обнажение, 2 – предполагаемые границы стратиграфических подразделений, 3 – старая изба.

Fig. 1. Scheme of the location of the studied area and succession (outcrop GER2).

а – structural scheme of the northeast of the European part of Russia (Timonin, 1998, with simplifications): 1 – settlements, 2 – study area, 3 – thrusts, 4 – boundaries of structures; ГЗУН – Main West Ural Thrust, ГУН – Main Ural Thrust; б – geological map of the middle reaches of the Iz'yael River (Plotitsyn, Gruzdev, 2019): 1 – outcrop, 2 – supposed boundaries of stratigraphic units, 3 – old hut.

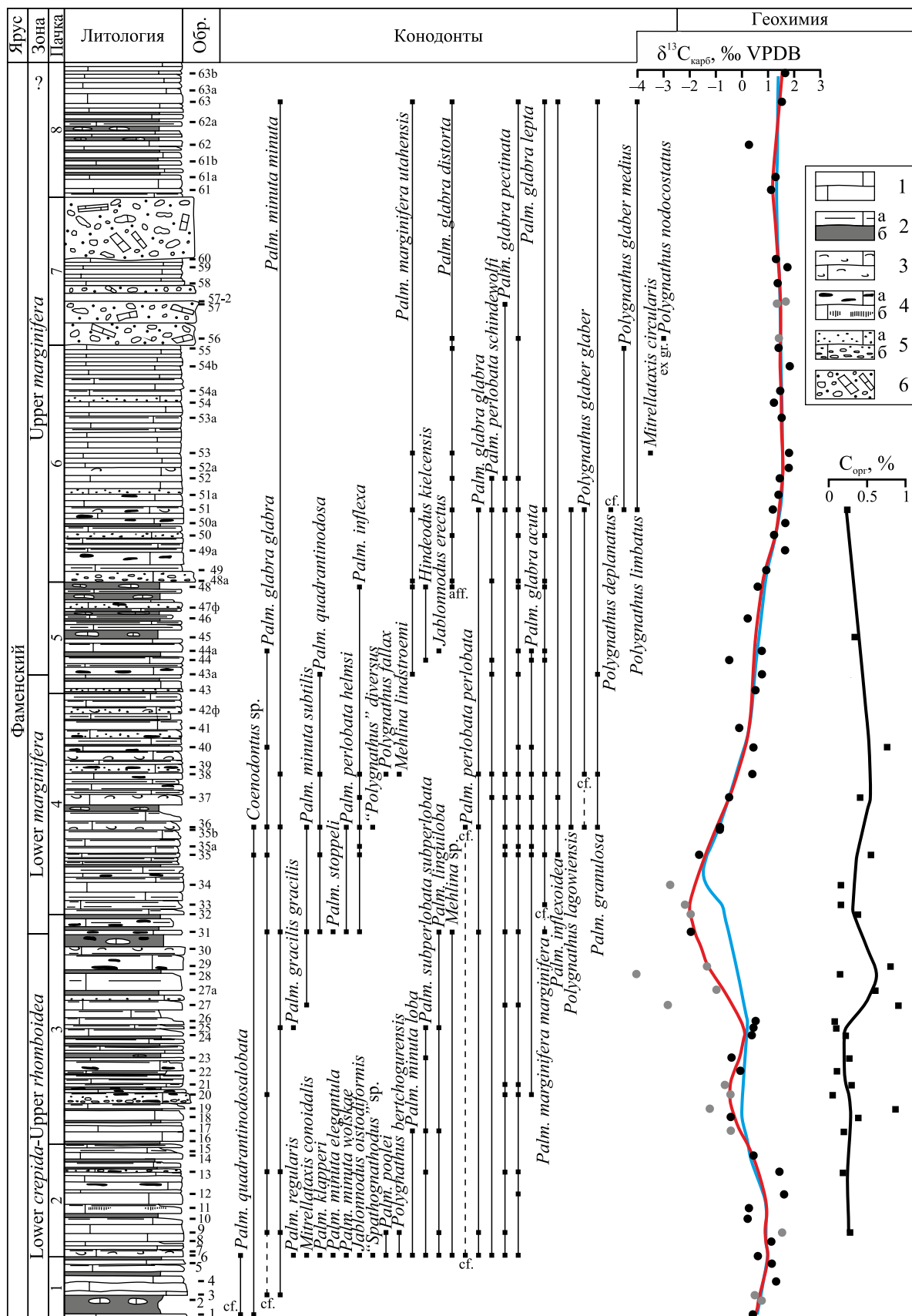


Рис. 2. Литолого-стратиграфическая колонка ниже-среднефаменских отложений среднего течения р. Изъяель (обнажение GER2) с геохимическими данными ($\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ и $\text{C}_{\text{орг}}$).

1 – известняк; 2a – глинистый известняк; 2б – аргиллит; 3 – брахиоподовый известняк; 4a – конкреции кремня с отчетливыми границами; 4б – неоформленные кремнистые стяжения; 5a – известняковый песчаник (литокластовый известняк); 5б – грубый известняковый песчаник, известняковый гравелит с единичными карбонатными обломками галечной размерности; 6 – известняковая конглобрекция. Красная и синяя кривые – две сглаженные методом LOESS кривые, отражающие распределение значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ всех полученных данных (красная) и данных, прошедших скрининг-тестирование (синяя).

Fig. 2. Lithological-stratigraphic log of the lower-middle Famennian succession of the middle reaches of the Iz'yayol River (outcrop GER2) with geochemical data ($\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ и C_{org}).

1 – limestone; 2a – clayey limestone; 2б – argillite; 3 – brachiopod limestone; 4a – chert concretions with distinct margins; 4б – unformed chert concretions; 5a – calcareous sandstone (lithoclastic limestone); 5б – coarse calcareous sandstone, gravelite with single pebbles; 6 – conglobreкция. The red and blue curves are two LOESS-smoothed curves reflecting the distribution of $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ values for all data obtained (red) and data that passed screening tests (blue).

конодонтами. Диагностированы конодонтовые элементы *Coenodontus* sp., *Palmatolepis glabra* cf. *glabra* Ulrich et Bassler, *Palm. minuta minuta* Branson et Mehl и *Palm. cf. quadrantinodosalobata* Sannemann. А.О. Ивановым определены пластиножаберные рыбы *Phoebodus turnerae* Ginter et Ivanov. Мощность пачки 3.5 м.

Пачка 2 (образцы GER2-6–GER2-15) представляет собой чередующиеся “кальцисферовые” (вакстоуны, пак-вакстоуны), биолитокластовые известняки с микритовым матриксом (пак-вакстоуны и вак-пакстоуны) (рис. 3б) и спаритовым (грейнтоуны о рудстоунов) цементом серого, темно-серого цвета с массивной текстурой или пологоволнистой, субгоризонтальной слоистостью (редко). Распространены маломощные (часто в виде тонких (до 5 см) примазок) прослои аргиллитов черного или коричневатого-черного цвета. В литокластовых разностях известняков размерность кластической части колеблется от тонкопесчаной до гравелитовой. Известняки перекристаллизованы в разной степени, часто содержат рассеянные мелкие кристаллы пирита. Аргиллиты могут содержать мелкие известняковые конкреции. Органические остатки представлены криноидеями, остракодами, брахиоподами, конодонтами, радиоляриями, спикулами губок и рыбами. А.О. Ивановым диагностированы рыбные остатки *Cladodontomorphi* indet. Определены многочисленные конодонты *Jablonnodus oistodiformis* Dzik, *Mehlina* sp., *Mitrellataxis conoidalis* Dzik, *Ligonodina* sp., *Mehlina* sp., *Palm. glabra glabra*, *Palm. glabra lept* Ziegler et Huddle, *Palm. glabra pectinata* Ziegler, *Palm. glabra prima* Ziegler et Huddle, *Palm. klapperi* Sandberg et Ziegler, *Palm. linguiloba* Dzik, *Palm. minuta elegantula* Wang et Ziegler, *Palm. minuta loba* Helms, *Palm. minuta minuta*, *Palm. minuta wolskae* Szulczewski, *Palm. poolei* Sandberg et Ziegler, *Palm. perlobata perlobata* Ulrich et Bassler, *Palm. perlobata schindewolfi* Müller, *Palm. quadrantinodosalobata*, *Palm. subperlobata subperlobata* Branson et Mehl, *Palm. regularis* Cooper, *Polygnathus bertchogurensis* Gatovsky и “*Spathognathodus*” sp. Мощность пачки 5.7 м.

Пачка 3 (образцы GER2-16–GER2-31) характеризуется чередованием микритовых, часто сфе-

ровых (“кальцисферы”) и глинистых известняков (мадстоуны до вакстоунов) темно-серого цвета (рис. 3в), биолитокластовых и литокластовых известняков (вакстоуны до грейнстоунов) серого цвета и черноцветных аргиллитов. Известняки имеют массивную текстуру или тонкую субгоризонтальную (часто микрокомковатую), реже косую слоистость, а также в некоторых прослоях отмечается видимая градационная сортировка обломочного материала. В таких прослоях обычно отчетливо диагностируются элементы цикла Боума. Отмечаются редкие маломощные (первые сантиметры) примазки желто-рыжих глин. В наиболее массивных известняках присутствуют черноцветные кремнистые конкреции. В этой пачке наблюдается увеличение доли глинистого вещества. Нередки прослои аргиллитов мощностью 20–30 см. Органические остатки представлены беззамковыми и замковыми брахиоподами, криноидеями, радиоляриями, конодонтами, не диагностируемыми рыбными остатками и многочисленными остракодами. Определены конодонты *Mehlina* sp., *Palmatolepis glabra acuta* Helms, *Palm. glabra glabra*, *Palm. glabra lept*, *Palm. glabra pectinata*, *Palm. glabra prima*, *Palm. gracilis gracilis* Branson et Mehl, *Palm. inflexa* Müller, *Palm. linguiloba*, *Palm. marginifera marginifera* Helms, *Palm. minuta loba*, *Palm. minuta minuta*, *Palm. minuta subtilis* Chalymbdzha et Tschernysheva, *Palm. sublobata helmsi* Ziegler, *Palm. quadrantinodosa* Branson et Mehl, *Palm. stoppeli* Sandberg et Ziegler, *Palm. subperlobata subperlobata*, “*Spathognathodus*” sp. Мощность пачки 11.7 м.

В пачке 4 (образцы GER2-32–GER2-42ф) наблюдается увеличение доли обломочных (литокластовых, биолитокластовых) известняков над аргиллитами, микритовыми, часто глинистыми и микритовыми “кальцисферовыми” известняками. Лито- и биокластовые известняки (от пак- до грейнстоунов), а также их разности характеризуются градационной сортировкой обломочного материала и имеют массивную текстуру, косую или пологоволнистую слоистость. Достоверно диагностируются элементы цикла Боума (рис. 3г). Микритовые известняки (преимущественно мад-вакстоуны и вакстоуны, реже пак-вакстоуны) обладают либо мас-

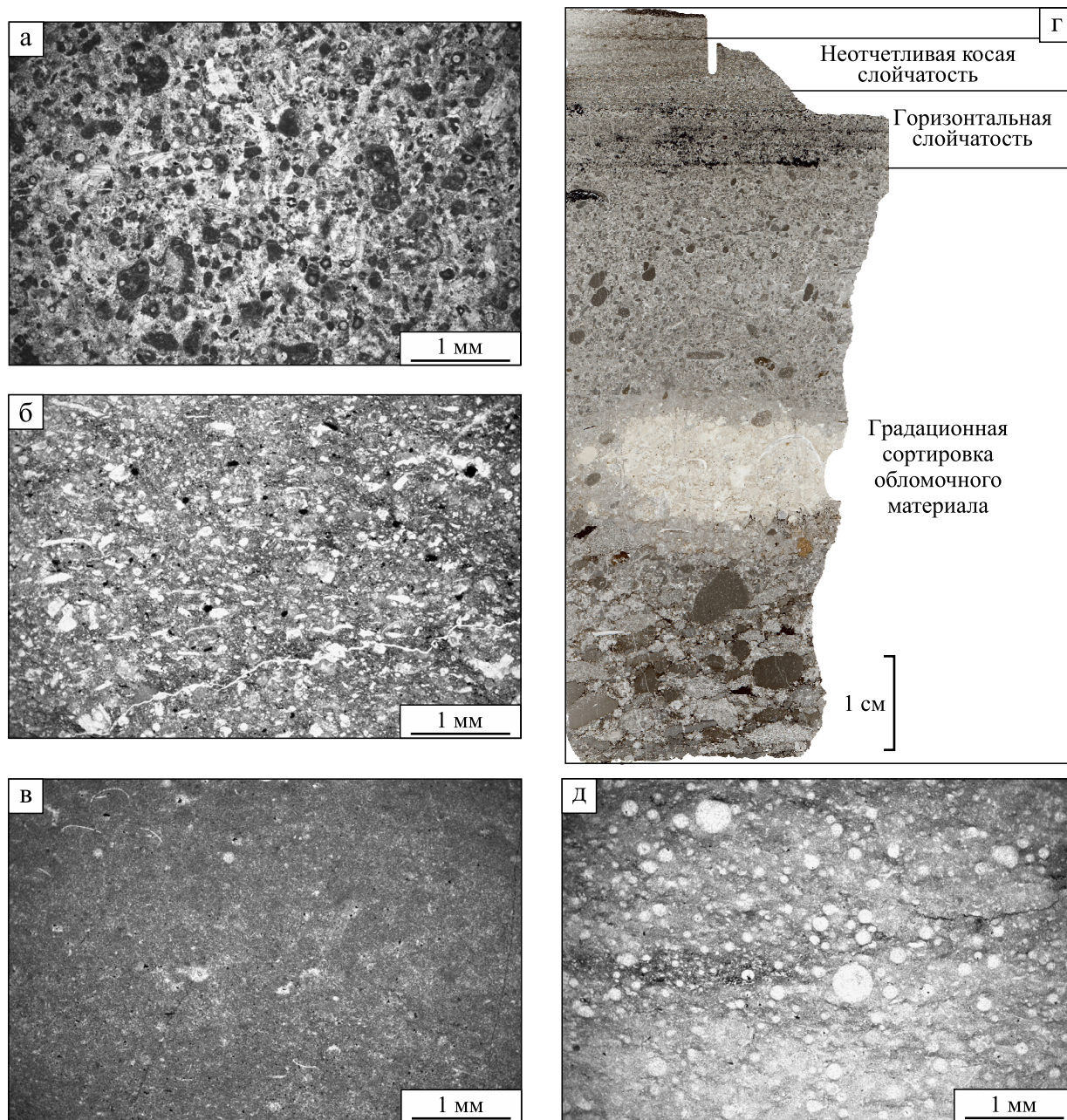


Рис. 3. Основные литологические типы ниже-среднефамениских пород разреза р. Изъяель (обнажение GER2).

а – “calcisphere”-литокластовый известняк со спаритовым цементом (грейнстоун), обр. GER2-5; б – литобиокластовый известняк с микритовым матриксом (пакстоун), обр. GER2-14; в – микритовый известняк с единичными “кальцисферами” и створками раковин остракод (вак-мадстоун), обр. GER2-26; г – карбонатный градационный циклит, обр. GER2-39; д – “кальцисферовый” микритовый известняк (вакстоун), обр. GER2-48.

Fig. 3. The main lithological types composing the sequence of the outcrop GER2.

а – “calcisphere”-lithoclastic limestone with sparite cement (grainstone), sample GER2-5; б – litho-bioclastic limestone with micritic cement (packstone), sample GER2-14; в – micritic limestone with rare calcispheres and ostracod shell valves (wacke-mudstone), sample GER2-26; г – carbonate gradational cyclite, sample GER2-39; д – micritic limestone with “calcispheres” (wackestone), sample GER2-48.

сивной текстурой, либо горизонтально-микрослойчатой. Повсеместно отмечаются кремнистые конкреции черного цвета как с отчетливыми грани-

цами, так и неоформленные. Органические остатки представлены многочисленными конодонтами, остракодами, фораминиферами, филлокарида-

ми, брахиоподами, аммоноидеями, криноидеями. Ювенильные аммоноидеи С.В. Николаевой (ПИН РАН) диагностированы, предположительно, как *Paratorleyoceras* sp. Среди конодонтов определены *Coenodontus* sp., *Mehlina lindstroemi* Matveeva, Zhuravlev et Eremenko, *Palmatolepis glabra acuta*, *Palm. glabra glabra*, *Palm. glabra lept*, *Palm. glabra pectinata*, *Palm. glabra prima*, *Palm. granulosa* Dreesen, *Palm. inflexa*, *Palm. inflexoidea* Ziegler, *Palm. marginifera marginifera*, *Palm. minuta minuta*, *Palm. minuta subtilis*, *Palm. perlobata helmsi*, *Palm. perlobata perlobata*, *Palm. perlobata schindewolfi*, *Palm. quadrantinodosa*, “*Polygnathus*” *diversus* Helms, *Pol. fallax* Helms et Wolska, *Pol. glaber glaber* Ulrich et Bassler, *Pol. lagowiensis* Helms et Wolska. Мощность пачки 11.2 м.

Пачка 5 (образцы GER2-43–GER2-48) характеризуется значительным увеличением глинистой составляющей. Карбонаты представлены лито-био-кластовыми или биокластовыми (вак-пакстоуны до грейнстоунов) разностями с массивной, пологоволнисто-слоистой или косослоистой текстурами в основании пачки. В верхней части пачки известняки преимущественно массивные или тонко-горизонтально-слоистые микритовые “кальцисферовые” (вакстоуны) (рис. 3д) или микритовые с примесью тонкой биокластики (вакстоуны до пакстоунов). Существенное увеличение доли глинистой составляющей отражено в увеличении количества и мощности аргиллитовых прослоев, относительно подстилающих отложений. Прослой аргиллитов мощностью до 40–45 см часто содержат линзы и тонкие слои глинистых известняков. Органические остатки в этой пачке представлены брахиоподами, конодонтами, остракодами, рыбами, фораминиферами. Диагностированы следующие таксоны конодонтов: *Hindeodus kielcensis* (Dzik), *Jablonnodus erectus* Dzik, *Jabl. oistodiformis*, *Palmatolepis glabra acuta*, *Palm. glabra* aff. *distorta* Branson et Mehl, *Palm. glabra glabra*, *Palm. glabra lept*, *Palm. granulosa*, *Palm. inflexa*, *Palm. marginifera marginifera*, *Palm. marginifera utahensis* Ziegler et Sandberg, *Palm. perlobata schindewolfi* и *Palm. quadrantinodosa*. Мощность пачки 5.6 м.

В пачке 6 (образцы GER2-48a–GER2-55) отмечается существенное сокращение глинистой составляющей. В основании пачки имеется пласт известнякового конгломерата (с гальками до 7 см) мощностью 50 см. Среди карбонатных пород диагностируются микритовые известняки с биокластикой часто тонкой размерности (вакстоуны и пак-вакстоуны), “кальцисферовые” известняки (вакстоуны) и биолитокластовые, литокластовые известняки (пакстоуны или грейнстоуны, крайне редко рудстоуны) с массивной, неотчетливо пологоволнистой или комковатой (вторичной) текстурой. Глинистое вещество присутствует в виде тонких примазок аргиллитов и в прикровельных ча-

стях известняков – верхних элементов цикла Боума (предположительно элемент Е (Bouma, 1962) или Е и F (Stow, Smillie, 2020)). В нижней части пачки отмечаются немногочисленные черные кремнистые конкреции. Органические остатки представлены спикулами губок, брахиоподами, криноидеями, фораминиферами, остракодами, конодонтами. Комплекс конодонтов включает *Mitrellataxis circularis* (Wang et Wang), *Palmatolepis glabra distorta*, *Palm. glabra lept*, *Palm. glabra pectinata*, *Palm. glabra prima*, *Palm. perlobata schindewolfi*, *Palm. marginifera marginifera*, *Palm. marginifera utahensis*, *Polygnathus* cf. *deplanatus* Chalymbadzha, Shinkaryev et Gatovsky, *Pol. glaber glaber*, *Pol. glaber medius* Helms et Wolska, *Pol. lagowiensis* и *Pol. limbatus* Matyja. Мощность пачки приблизительно 12 м.

Пачка 7 (образцы GER2-56–GER2-60) представлена двумя мощными (от 2.5 до более 3.0 м) пластами известняковых конглобрекций, которые разделены биокластовыми горизонтально-слоистыми известняками (от вакстоунов до пакстоунов) мощностью 1.0–1.4 м, где вариации мощности связаны с различной глубиной эрозионного вреза перекрывающего пласта конглобрекций. Обломки в конглобрекциях по структурным и текстурным характеристикам аналогичны подстилающим отложениям. Конглобрекция представляет собой несортированную или слабосортированную смесь карбонатных обломков разных размеров (от алевритово-тонкопесчаной до средне-крупногалечной, средне-крупнощебневой), “плавающих” в общем известняковом заполнителе. Органические остатки представлены криноидеями, сколекодонтами, остракодами, фораминиферами, конодонтами. Среди конодонтовых элементов диагностированы *Palmatolepis glabra distorta*, *Palm. glabra lept*, *Palm. glabra pectinata* и *Polygnathus* ex gr. *nodocostatus* Branson et Mehl. Мощность пачки 7.4 м.

Пачка 8 (образцы GER2-61–GER2-63b) характеризуется чередованием микритовых известняков (мад-вакстоуны, вакстоуны), микритовых “кальцисферовых” известняков (вакстоуны), редких литокластовых известняков (пак-вакстоуны) с известковистыми аргиллитами. Доля и размерность литокластового материала относительно подстилающих отложений существенно сокращается. Кластический материал имеет в среднем тонкую размерность. Текстуры преимущественно массивные, реже неотчетливо горизонтально- или волнисто-слоистые. Известковистые аргиллиты повсеместно содержат мелкие линзы глинистых известняков. Отмечаются единичные неоформленные конкреции кремня. Среди органических остатков диагностированы створки остракод, конодонтовые элементы, створки и раковины брахиопод, рыбные остатки, мандибулярные элементы филлокаррид. Определены конодонты *Palmatolepis glabra distorta*, *Palm.*

glabra lepta, *Palm. granulosa*, *Palm. inflexoidea*, *Palm. marginifera marginifera*, *Palm. marginifera utahensis*, *Palm. minuta minuta* и *Polygnathus limbatus*. Мощность пачки 6.8 м.

Общая мощность обнажения GER2 63.9 м.

Литологический состав и структурно-текстурные характеристики комплекса пород обн. GER2, в совокупности с уже существующими представлениями о фациальной приуроченности перекрывающих отложений (Плотицын и др., 2018; Plotitsyn et al., 2024) и современными представлениями о палеогеографии региона (Никонов и др., 2000), позволяют предположить, что рассматриваемый разрез этих отложений формировался в условиях внутреннего склона Кожимской внутришельфовой впадины, располагавшейся в полосе шельфа шириной 300–500 км, приуроченного к пассивной окраине Евроамериканского континента (Юдин, 1994). При этом образование обломочных карбонатов с элементами цикла Боума происходило, вероятно, турбидными потоками, а грубообломочных пород (конглобрекций) – дебритными потоками.

БИОСТРАТИГРАФИЯ

Биостратиграфический анализ среднего фамена на р. Изъяель базируется на данных по конодонтам (рис. 4). В качестве основы для расчленения отложений обн. GER2 используется стандартная зональная шкала по конодонтам верхнего девона (Ziegler, Sandberg, 1990). Следует отметить, что уже ранее при проведении исследования органического вещества кремнисто-глинисто-карбонатных отложений обн. GER2 производилась их предварительная датировка по конодонтам (Бушнев и др., 2017).

Нижняя часть разреза (пачки 1, 2 и большая часть пачки 3 до слоя с образцом GER2-30, включительно) характеризуется комплексом конодонтов, чье распространение ограничивается интервалом зон Lower crepida–Upper rhomboidea. При этом распространение вида *Palmatolepis poolei* ограничено только зонами Lower rhomboidea и Upper rhomboidea (Барсков и др., 1987; Spalletta et al., 2017), а таксоны *Palm. linguiloba*, *Palm. minuta elegantula*, *Palm. minuta loba*, *Palm. minuta wolskae*, *Palm. quadrantinodosalobata*, *Palm. regularis*, *Polygnathus bertchogurensis* не отмечаются выше зоны Upper rhomboidea (Барсков и др., 1987; Dzik, 2006; Гатовский, 2010; Spalletta et al., 2017). В целом точный стратиграфический объем нижней части разреза установить сложно ввиду отсутствия видов, индексирующих основания зональных подразделений внутри интервала Lower crepida–Upper rhomboidea. Вероятно, стратиграфический объем более узкий и ограничивается интервалом зон Lower rhomboidea–Upper rhomboidea. Основание

конодонтовой зоны Lower marginifera установлено в слое с образцом GER2-31 по первому появлению вида-индекса *Palmatolepis marginifera marginifera*. Совместно с видом-индексом отмечается первое появление *Palmatolepis quadrantinodosa*, а незначительно выше по разрезу в образце GER2-35 *Palm. inflexoidea*. Эти два таксона начинают существование совместно с *Palm. marginifera marginifera* (Spalletta et al., 2017) и служат вспомогательными маркерами основания зоны Lower marginifera. Основание зоны Upper marginifera по находкам вида *Palmatolepis marginifera utahensis* установлено в основании пачки 5 (образец GER2-43a). Верхняя граница зоны Upper marginifera в пределах обн. GER2 не устанавливается. Следует отметить, что в верхней части обнажения (пачки 7 и 8) количественный и таксономический состав конодонтов значительно сокращается.

Вид пластиножаберных рыб *Phoebodus turnerae* известен в разрезах Урала и Польши из интервала конодонтовых зон Lower crepida–Lower marginifera (Ginter, Ivanov, 1992). Этот вид обнаружен в нижней части разреза в пачке 1 (образец GER2-5) в пределах интервала, который по конодонтам сопоставлен с зонами Lower crepida–Upper rhomboidea. Данные о распространении *Phoebodus turnerae* не противоречат данным о распространении конодонтов в этих зонах.

ИЗОТОПНАЯ СТРАТИГРАФИЯ ($\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ и $\text{C}_{\text{орг}}$)

Изотопный состав углерода карбонатных пород обнажения GER2 (разрез Изъяель) характеризуется значительной вариабельностью. Значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ колеблются в диапазоне от -4.1‰ (образец GER2-28) до 1.8‰ (образец GER2-54b) (табл. 1). Однако часть образцов, демонстрирующих пиковые отрицательные значения, не подходит для хемотратиграфических интерпретаций в соответствии с результатами скрининг-тестирования.

На диаграмме соотношения изотопного состава углерода и кислорода карбонатов (рис. 5) видно, что часть образцов попадает в область вероятных вторичных преобразований и первичная природа полученного изотопного сигнала в этих образцах ставится под сомнение (для подробной информации по образцам см. табл. 1). Большая часть интерпретируемых данных попадает в область значений с высокой долей вероятности “существенно первичного” изотопного сигнала (см. рис. 5б). По литологическим особенностям (перекристаллизованные известняки, конглобрекции) часть образцов, попавшая в область значений “а”, была исключена из анализа (см. рис. 5а). Правомочность примененной методики скрининга подтверждается статистическими данными. После исключения предположительно вторичных проб сила линейной корреляции между значениями $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ и $\delta^{18}\text{O}_{\text{карб}}$ демонстрирует

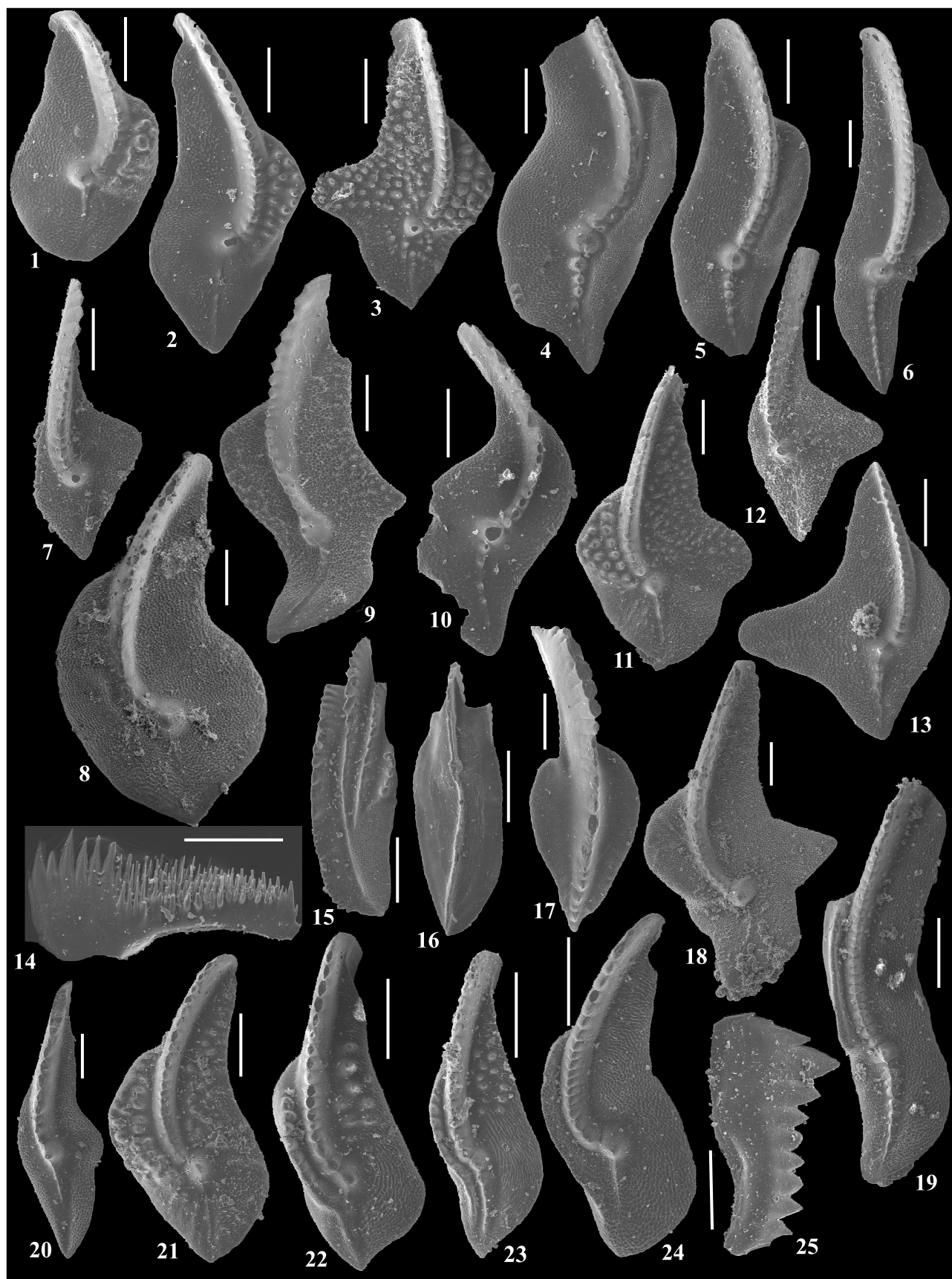


Рис. 4. Конодонтовые элементы из фаменского разреза (обн. GER2) среднего течения р. Изъяель.

1 – *Palmatolepis quadrantinodosa* Branson et Mehl, колл. № 434/26-5, обр. GER2-38; 2 – *Palmatolepis quadrantinodosa* Branson et Mehl, колл. № 434/26-8, обр. GER2-38; 3 – *Palmatolepis quadrantinodosalobata* Sannemann, колл. № 434/26-14, обр. GER2-6; 4 – *Palmatolepis klapperi* Sandberg et Ziegler, колл. № 434/26-19, обр. GER2-6; 5 – *Palmatolepis glabra prima* Ziegler et Huddle, колл. № 434/26-22, обр. GER2-6; 6 – *Palmatolepis glabra lepta* Ziegler et Huddle, колл. № 434/27-30, обр. GER2-38; 7 – *Palmatolepis minuta wolskae* Szulczewski, колл. № 434/26-26, обр. GER2-6; 8 – *Palmatolepis stoppeli* Sandberg et Ziegler, колл. № 512/5-57, обр. GER2-31; 9 – *Palmatolepis perlobata schindewolfi* Müller, колл. № 434/26-28, обр. GER2-6; 10 – *Palmatolepis regularis* Cooper, колл. № 434/26-29, обр. GER2-6; 11 – *Palmatolepis poolei* Sandberg et Ziegler, колл. № 434/26-33, обр. GER2-9; 12 – *Palmatolepis minuta loba* Helms, колл. № 512/16-7, обр. GER2-6; 13 – *Palmatolepis linguiloba* Dzik, колл. № 434/26-16, обр. GER2-6; 14 – *Mehlina lindstroemi* Matveeva, Zhuravlev et Eremenko, колл. № 434/26-9, обр. GER2-38; 15, 16 – *Polygnathus bertchogurensis* Gatovsky, колл. №№ 434/26-31 и 434/26-32, обр. GER2-9; 17 – *Polygnathus glaber glaber* Ulrich et Bassler, колл. № 434-26-43a, обр. GER2-36; 18 – *Palmatolepis perlobata schindewolfi* Müller, колл. № 434/26-39, обр. GER2-36; 19 – *Palmatolepis glabra distorta* Branson et Mehl, колл. № 434/27-41, обр. GER2-63; 20 – *Palmatolepis minuta minuta* Branson et Mehl, колл. № 434/26-25, обр. GER2-6; 21 – *Palmatolepis granulosa* Dreesen, колл. № 434/27-31, обр. GER2-38; 22 – *Palmatolepis marginifera utahensis* Ziegler et Sandberg, колл. № 434/27-33, обр. GER2-43a; 23 – *Palmatolepis marginifera utahensis* Ziegler et Sandberg, колл. № 512/16-11, обр. GER2-48; 24 – *Palmatolepis marginifera marginifera* Helms, колл. № 434/27-42, обр. GER2-63; 25 – *Hindeodus kielcensis* (Dzik), колл. № 512/16-12, обр. GER2-48. Масштабные линейки 0.2 мм.

Fig. 4. Conodont elements from the Famennian section (outcrop GER2) of the middle reaches of the Iz'yayol River.

1 – *Palmatolepis quadrantinodosa* Branson et Mehl, coll. no. 434/26-5, sample GER2-38; 2 – *Palmatolepis quadrantinodosa* Branson et Mehl, coll. no. 434/26-8, sample GER2-38; 3 – *Palmatolepis quadrantinodosalobata* Sannemann, coll. no. 434/26-14, sample GER2-6; 4 – *Palmatolepis klapperi* Sandberg et Ziegler, coll. no. 434/26-19, sample GER2-6; 5 – *Palmatolepis glabra prima* Ziegler et Huddle, coll. no. 434/26-22, sample GER2-6; 6 – *Palmatolepis glabra lepta* Ziegler et Huddle, coll. no. 434/27-30, sample GER2-38; 7 – *Palmatolepis minuta wolskae* Szulczewski, coll. no. 434/26-26, sample GER2-6; 8 – *Palmatolepis stoppeli* Sandberg et Ziegler, coll. no. 512/5-57, sample GER2-31; 9 – *Palmatolepis perlobata schindewolfi* Müller, coll. no. 434/26-28, sample GER2-6; 10 – *Palmatolepis regularis* Cooper, coll. no. 434/26-29, sample GER2-6; 11 – *Palmatolepis poolei* Sandberg et Ziegler, coll. no. 434/26-33, sample GER2-9; 12 – *Palmatolepis minuta loba* Helms, coll. no. 512/16-7, sample GER2-6; 13 – *Palmatolepis linguiloba* Dzik, coll. no. 434/26-16, sample GER2-6; 14 – *Mehlina lindstroemi* Matveeva, Zhuravlev et Eremenko, coll. no. 434/26-9, sample GER2-38; 15, 16 – *Polygnathus bertchogurensis* Gatovsky, coll. no. no. 434/26-31 and 434/26-32, sample GER2-9; 17 – *Polygnathus glaber glaber* Ulrich et Bassler, coll. no. 434-26-43a, sample GER2-36; 18 – *Palmatolepis perlobata schindewolfi* Müller, coll. no. 434/26-39, sample GER2-36; 19 – *Palmatolepis glabra distorta* Branson et Mehl, coll. no. 434/27-41, sample GER2-63; 20 – *Palmatolepis minuta minuta* Branson et Mehl, coll. no. 434/26-25, sample GER2-6; 21 – *Palmatolepis granulosa* Dreesen, coll. no. 434/27-31, sample GER2-38; 22 – *Palmatolepis marginifera utahensis* Ziegler et Sandberg, coll. no. 434/27-33, sample GER2-43a; 23 – *Palmatolepis marginifera utahensis* Ziegler et Sandberg, coll. no. 512/16-11, sample GER2-48; 24 – *Palmatolepis marginifera marginifera* Helms, coll. no. 434/27-42, sample GER2-63; 25 – *Hindeodus kielcensis* (Dzik), coll. no. 512/16-12, sample GER2-48. Length of the scale bar 0.2 mm.

существенное снижение: коэффициент детерминации R^2 для прошедшего скрининг массива данных составил 0.04 против $R^2 = 0.28$ для исходной совокупности образцов. Низкое значение R^2 в отфильтрованной выборке указывает на нивелирование вторичных изотопно-связанных изменений (Marshall, 1992), что часто соответствует ожиданиям для первичных морских карбонатов. Дополнительным аргументом в пользу репрезентативности данных является отсутствие зависимости изотопного состава углерода от типа породы. Средние значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ для групп вакстоунов (0.83‰), пакстоунов (0.59‰) и грейнстоунов (0.65‰) варьируют в пределах десятых долей промилле. Различия средних значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ для типов пород не являются статистически значимыми ($p = 0.69$), что позволяет рассматривать изотопный сигнал как консистентный для всей исследуемой толщи.

На рис. 2 и 6 представлены две сглаженные методом LOESS кривые, отражающие распределение значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$. Красная кривая включает все полученные данные, тогда как синяя построена только для значений, прошедших скрининг-тестирование. Разброс значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ в пробах, которые прошли скрининг-тест, составляет 3.8‰ (от –2.0‰ в пробе GER2-31 до 1.8‰ в пробе GER2-54b).

В нижней части разреза, соответствующей интервалу конодонтовых зон Lower crepida–Upper rhomboidea, отмечается выраженная тенденция к снижению значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$, с минимальными значениями, приуроченными к границе с зоной Lower marginifera. В зоне Lower marginifera и нижней части Upper marginifera (интервал образцов GER2-35–GER2-49) наблюдается обратный тренд – увеличение значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ с последующей стабилизацией на уровне 1.2–1.8‰ (интервал GER2-49a–GER2-63b). В пределах указанных интервалов фиксируются отдельные точки существенных отклонений от тренда (например, 0.3‰ в образце GER2-62). Таким образом, самые низы (нижняя часть интервала зон Lower crepida–Upper rhomboidea) и верхняя часть (зона Upper marginifera) разреза характеризуются относительно стабильными величинами изотопов углерода, а минимальные значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ в районе нижней границы зоны Lower marginifera рассматриваются в настоящей работе в качестве среднефаменской отрицательной аномалии.

На кривой, отражающей обобщенные данные по вариациям значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ в фаменских разрезах Центральной и Западной Европы (Buggisch, Joachimski, 2006) (см. рис. 6), наиболее выраженной является не отрицательная аномалия,

Таблица 1. Изотопный состав углерода и кислорода, процентное содержание органического углерода и данные по литологии карбонатных пород среднефаменинской части разреза на р. Изъяель**Table 1.** Isotopic composition of carbon and oxygen, TOC and lithology data of carbonates from the middle Famennian of the Iz'yayol River section

№ пробы	$\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ PDB	$\delta^{18}\text{O}_{\text{карб}}$ SMOW	$\text{C}_{\text{орг}}$	Литология
GER2-1	0.42	25.19	—	Мадстоун, частично перекристаллизованный
GER2-2	0.76	25.50	—	Перекристаллизованный известняк
GER2-3	0.49	25.20	—	Перекристаллизованный известняк
GER2-4	1.30	25.63	—	Пак-вакстоун до грейнстоуна
GER2-5	1.14	25.8	—	Грейнстоун
GER2-6	0.60	25.37	—	Грейнстоун
GER2-8	1.11	25.04	—	Пакстоун
GER2-9	1.55	26.45	0.28	Перекристаллизованный известняк
GER2-10	0.20	24.77	—	Вакстоун до вак-пакстоуна
GER2-11	0.26	24.44	—	Пак-вакстоун
GER2-12	1.61	26.11	—	Грейнстоун
GER2-13	1.43	25.58	0.19	Флоатстоун
GER2-14	0.43	24.96	—	Пак-вакстоун
GER2-17	−0.42	24.83	0.20	н/а
GER2-18	−0.42	25.57	0.39	Мад-вакстоун переслаивается с грейнстоуном
GER2-19	−1.24	25.11	0.87	Вакстоун
GER2-20	−0.44	24.70	0.05	Грейнстоун
GER2-21	−0.67	24.91	0.30	Вак-пакстоун до грейнстоуна
GER2-22	−0.07	26.17	0.11	Мадстоун до мад-вакстоуна
GER2-23	−0.40	25.73	0.27	Вакстоун
GER2-24	0.35	26.58	0.22	Мад-вакстоун
GER2-25	0.42	26.32	0.10	Грейнстоун
GER2-26	0.52	26.54	0.08	Мад-вакстоун
GER2-27	−2.85	21.57	0.91	Вакстоун
GER2-27a	−0.99	25.64	0.61	Вакстоун
GER2-28	−4.06	24.73	0.15	Мад-вакстоун
GER2-29	−1.35	25.72	0.81	Вакстоун
GER2-31	−1.96	26.04	—	Вак-пакстоун до грейнстоуна
GER2-32	−1.97	25.61	0.38	Вак-пакстоун до грейнстоуна
GER2-33	−2.19	25.45	0.16	Мад-вакстоун
GER2-34	−2.76	24.23	0.16	Мад-вакстоун, вакстоун
GER2-35	−1.66	26.06	0.55	Вакстоун
GER2-35b	−0.87	26.55	—	Грейнстоун
GER2-36	−0.86	26.21	—	Грейнстоун
GER2-37	−0.51	25.75	0.41	Грейнстоун
GER2-38	0.38	27.58	—	Грейнстоун
GER2-40	0.42	26.18	0.76	Грейнстоун
GER2-41	−0.09	26.23	—	Пакстоун до грейнстоуна
GER2-43	0.53	27.37	—	Вак-пакстоун до грейнстоуна
GER2-43a	0.78	25.14	—	Грейнстоун
GER2-44	−0.51	24.73	—	Пакстоун до грейнстоуна
GER2-44a	0.76	26.29	—	Пакстоун
GER2-45			0.34	
GER2-46	0.21	25.45	—	Вак-пакстоун
GER2-48	0.59	25.88	—	Вакстоун
GER2-49	0.95	25.49	—	Пак-вакстоун

Таблица 1. Окончание

Table 1. Ending

№ пробы	$\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ PDB	$\delta^{18}\text{O}_{\text{карб}}$ SMOW	$\text{C}_{\text{орг}}$	Литология
GER2-49a	1.65	26.69	—	Вакстоун, частично перекристаллизованный
GER2-50	1.22	25.56	—	Грейнстоун до рудстоуна
GER2-50a	1.66	26.45	—	Вакстоун
GER2-51	1.18	26.41	0.24	Грейнстоун
GER2-51a	1.39	25.51	—	Грейнстоун
GER2-52	1.42	26.19	—	Вакстоун, пак-вакстоун
GER2-52a	1.80	26.34	—	Пак-вакстоун
GER2-53	1.81	26.17	—	Грейнстоун
GER2-53a	1.51	26.15	—	Вакстоун
GER2-54	1.21	26.33	—	Вакстоун
GER2-54a	1.45	26.47	—	Вакстоун
GER2-54b	1.84	26.76	—	Пакстоун до грейнстоуна
GER2-55	1.39	26.54	—	Грейнстоун
GER2-56	1.38	27.50	—	Грейнстоун
GER2-57	1.33	25.14	—	Пакстоун до грейнстоуна
GER2-57-2	1.67	25.93	—	Грейнстоун
GER2-58	1.35	26.34	—	Вакстоун
GER2-59	1.75	26.44	—	Пак-вакстоун, участками грейнстоун
GER2-60	1.29	26.56	—	Пакстоун
GER2-61	1.09	25.44	—	Вакстоун, частично перекристаллизованный
GER2-61a	1.27	27.12	—	Вакстоун
GER2-62	0.26	25.44	—	Мад-вакстоун
GER2-63	1.49	26.78	—	Пакстоун до грейнстоуна
GER2-63b	1.65	27.12	—	Пакстоун

Примечание. Серым выделены номера образцов, которые не прошли скрининг-тестирование.

Note. The numbers of samples that failed screening testing are colored in gray.

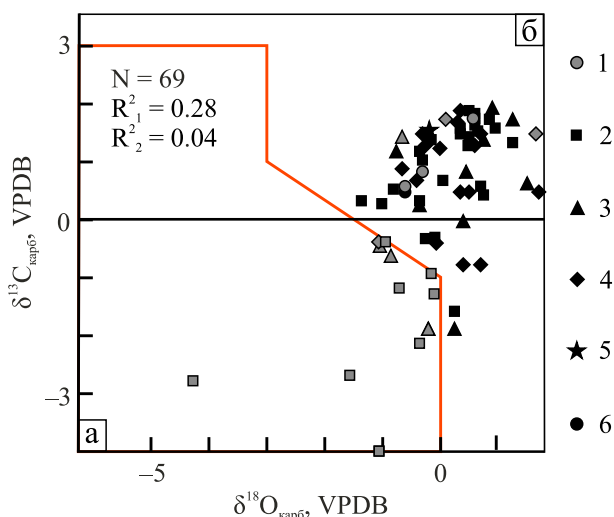


Рис. 5. Диаграмма соотношения изотопного состава $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ и $\delta^{18}\text{O}_{\text{карб}}$ (Zhuravlev et al., 2020) в 69 изученных образцах карбонатных пород из среднефаменской части разреза на р. Изъяель.

а – область вероятных вторичных изменений; б – область, соответствующая первичному изотопному сигналу; N – количество проб; R^2_1 – коэффициент детерминации между $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ и $\delta^{18}\text{O}_{\text{карб}}$ для всех образцов; R^2_2 – коэффициент детерминации между $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ и $\delta^{18}\text{O}_{\text{карб}}$ для образцов, прошедших скрининг тесты. 1 – перекристаллизованные известняки, 2 – вакстоуны, 3 – пакстоуны, 4 – грейнстоуны, 5 – флаутстоуны, 6 – мадстоуны. Серым закрашены образцы, не прошедшие скрининг-тесты.

Fig. 5. Cross-plot of $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ and $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ values (Zhuravlev et al., 2020) for 69 middle Famennian limestone samples from the of the Iz'yayol River section.

a – area of probable secondary changes; б – area corresponding to the primary isotope signal; N – number of samples; R^2_1 – coefficient of determination between $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ and $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ for all samples; R^2_2 – coefficient of determination between $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ and $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ for samples that passed screening tests. 1 – recrystallised limestones, 2 – wackestones, 3 – packstones, 4 – grainstones, 5 – floatstones, 6 – mudstones. Samples that failed the screening tests are shown in grey.

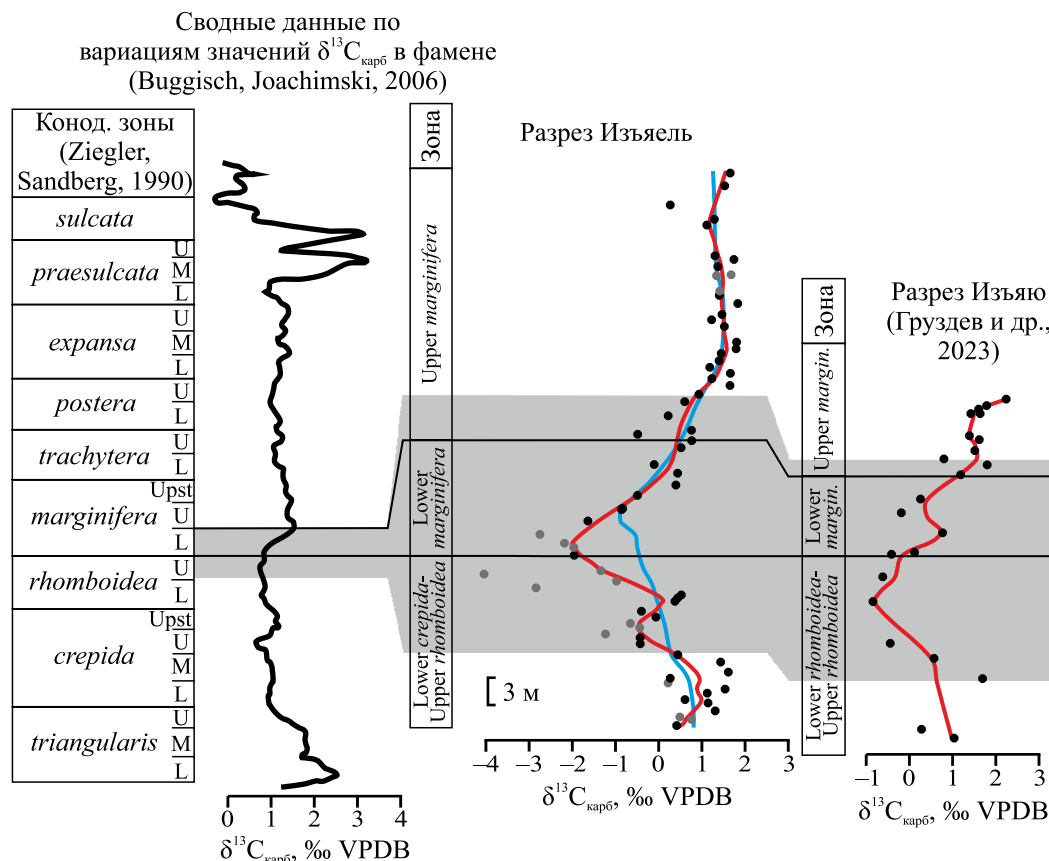


Рис. 6. Схема сопоставления кривых (LOESS-сглаживание) вариаций изотопного состава углерода в карбонатах разрезов южной части гряды Чернышева (разрезы Изъяель и Изъяю) со сводной кривой, полученной по данным из разрезов Западной и Центральной Европы (Buggisch, Joachimski, 2006).

L – Lower, M – Middle, U – Upper, Upst – Uppermost, margin. – marginifera.

Fig. 6. Carbonate carbon isotope excursions (LOESS smoothing) in the successions of the southern part of the Tchernyshev Ridge (Iz'yayol and Iz'yayu sections) and the western and central European successions summary data (Buggisch, Joachimski, 2006).

L – Lower, M – Middle, U – Upper, Upst – Uppermost, margin. – marginifera.

а положительный сдвиг ($\approx 1\%$), зафиксированный в пределах зоны Lower marginifera. Согласно работе (Saltzman, Thomas, 2012, см.: Devonian – Fig. 11.4), средняя часть фамена “Большого Бассейна” (запад Северной Америки) характеризуется более высокоамплитудным облегчением изотопов углерода ($\approx 2\%$) и, как следствие, более выраженным положительным сдвигом ($\approx 4\%$). Однако прямое сопоставление этих данных с нашими результатами затруднено из-за отсутствия детальной биостратиграфической привязки в указанной публикации (см.: Saltzman, Thomas, 2012 или первоисточник Saltzman, 2005).

В разрезах юга гряды Чернышева (разрезах Изъяель и Изъяю) наблюдается общий тренд изменений $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$, который выражается в облегчении изотопного состава вблизи нижней границы зоны Lower marginifera ($\approx 1.5\text{--}2.0\%$) и последую-

щем позитивном сдвиге с сопоставимой амплитудой приблизительно в 4% в пределах зоны Lower marginifera и нижней части зоны Upper marginifera (см. рис. 6). Незначительное несовпадение стратиграфического положения пиковых отрицательных значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ может контролироваться разницей в детальности и характере пробоотбора, тафономическими особенностями распределения конodontовых элементов в турбидитах и неточностью биостратиграфии в целом (данные о первой находке $\neq$ данные о первом появлении), особенностями сглаживания LOESS и, возможно, другими причинами.

В рамках скрининг-тестирования было сделано 24 анализа на $\text{C}_{\text{орг}}$ с уровня разреза с нестабильными значениями $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ для оценки влияния возможных диагенетических искажений на основе анализа распределения органического углерода, который

служит независимым и чувствительным индикатором постседиментационных преобразований органического вещества (Joachimski, Buggisch, 1993; Kump, Arthur, 1999). Содержания C_{org} в карбонатных и глинисто-карбонатных породах обнажения GER2 демонстрируют стабильные значения, колеблющиеся в пределах от 0.05% (образец GER2-20) до 0.91% (образец GER2-27). Пачка 3, на которую приходится незначительное (на 0.4–0.5%) (см. табл. 1) повышение концентраций C_{org} , характеризуется несколько большим содержанием глинистого вещества относительно такового подстилающих и перекрывающих отложений. В глинистых породах C_{org} обычно выше, так как глинистые осадки в целом способствуют сохранению органического вещества (Burdige, 2007). Это связано главным образом с высокой сорбционной способностью глин, низкой проницаемостью и, как следствие, существенно меньшим окислением органического вещества в этих породах.

Относительная стабильность содержания органического углерода (C_{org}) при одновременном отрицательном сдвиге $\delta^{13}C_{carb}$ свидетельствует о том, что изменения изотопного состава карбонатов, вероятно, не связаны с локальным снижением скорости захоронения органического углерода. В качестве возможных причин этого изотопного отклонения, как и полагалось раньше (Груздев и др., 2023), можно рассматривать как минимум локальное снижение первичной биопродуктивности или возможное наличие внешнего источника легкого углерода (активизация и/или интенсификация вулканической и гидротермальной деятельности, усиление терригенного стока с изотопно-легким углеродом с континента). Хотя диагенетические процессы (вторичное перераспределение углерода, окисление органического вещества, доломитизация и др.) могут влиять на локальные вариации изотопного состава, они вряд ли объясняют наблюдаемый изотопный сдвиг, поскольку последний имеет субглобальное или даже глобальное распространение. Однако эти процессы, наряду с другими региональными и/или локальными факторами, могут модифицировать глобальный сигнал и таким образом способствовать различиям в амплитуде изотопного отклонения в географически удаленных разрезах. В целом среднефаменское изотопное отклонение с различной амплитудой диагностируется в разрезах Центральной и Восточной Европы (Buggisch, Joachimski, 2006; Girard et al., 2017; Груздев и др., 2023; и настоящая работа), Восточной и Юго-Восточной Азии (Königshof et al., 2012; Zhang et al., 2019), Северной Америки (Saltzman, 2005) и Австралии (George et al., 2014). При этом амплитуда колеблется от <1% в Австралии (George et al., 2014) до 2.0–2.5% в Северной Америке (Saltzman, 2005) и на европейском северо-востоке России (Груздев и др., 2023; см. также ссылки в данной работе).

Таким образом, отрицательная изотопная аномалия по углероду вблизи нижней границы конодонтовой зоны Lower marginifera и последующий положительный сдвиг в пределах интервала зон Lower marginifera–Upper marginifera уверенно идентифицируются в разрезах южной части гряды Чернышева, что может быть полезно при проведении стратиграфических построений как в пределах региона, так, по-видимому, и за его пределами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В разрезах юга гряды Чернышева (северо-восток европейской части России) отчетливо идентифицируется отрицательная изотопная аномалия $\delta^{13}C_{carb}$ вблизи нижней границы зоны Lower marginifera (амплитуда отклонения ≈ 1.5 – 2.0%) и последующий положительный сдвиг в интервале зон Lower marginifera–Upper marginifera (амплитуда сдвига $\approx 4\%$). Эти вариации могут служить надежным геохимическим репером при проведении стратиграфических построений в пределах Тимано-Североуральского региона. При этом отрицательная аномалия, предположительно имеющая субглобальный/глобальный характер, обладает хорошим потенциалом для проведения межрегиональных корреляций. Сближенное расположение изотопного сдвига $\delta^{13}C_{carb}$ и нижней границы конодонтовой зоны Lower marginifera может служить основанием для рассмотрения этого уровня в качестве потенциального для подъярусного деления фаменского яруса Общей стратиграфической шкалы (ОСШ).

Благодарности

Авторы благодарят А.В. Журавлева за консультации в процессе написания статьи А.О. Иванова и С.В. Николаеву за диагностику рыбных остатков и аммоноидей, Д.А. Бушнев и В.А. Лобанова за консультации и аналитику в области органической геохимии, И.В. Смолеву за проведение изотопных анализов, Е.М. Тропникова за сопровождение работ на СЭМ, анонимных рецензентов за предложения, которые способствовали улучшению статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барсков И.С., Алексеев А.С., Кононова Л.И., Мигдисова А.В. (1987) Определитель конодонтов верхнего девона и карбона. М.: МГУ, 144 с.
- Бушнев Д.А., Плотицын А.Н., Груздев Д.А., Бурдельная Н.С. (2017) Органическое вещество фаменских отложений южной части гряды Чернышева (разрез на р. Изъяель). *Нефтегаз. геология. Теория и практика*, **12**(3). https://doi.org/10.17353/2070-5379/26_2017
- Гатовский Ю.А. (2010) Новые находки конодонтов рода Polygnathus из отложений нижнего фамена Мугоджар (Западный Казахстан). *Палеонтол. журн.*, (3), 74–78.
- Груздев Д.А., Журавлев А.В., Вевель Я.А., Ерофеевский А.В., Смолева И.В. (2023) Фаменский отрица-

- тельный экскурс изотопного состава углерода в разрезе на р. Изъяю (поднятие Чернышева, Предуральский краевой прогиб). *Литосфера*, **23**(2), 165-178. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-2-165-178>
- Никонов Н.И., Богацкий В.И., Мартынов А.В., Ларинова З.В., Ласкин В.М., Галкина Л.В., Довжикова Е.Г., Ермакова О.Л., Костыгова П.К., Куранова Т.И., Москаленко К.А., Панкратов Ю.А., Петренко Е.Л., Попова Е.В., Сурина А.И., Шабанова Г.А. (2000) Тимано-Печорский седиментационный бассейн. Атлас геологических карт (литолого-фациальных, структурных и палеогеологических). Ухта: Региональный дом печати, 64 л.
- Плотицын А.Н., Груздев Д.А. (2019) Уникальное местонахождение ранних представителей рода *Protognathodus* (конодонты) на гряде Чернышева. *Вестн. ИГ Коми НЦ УрО РАН*, (3), 14-23. <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2019-03-14-23>
- Плотицын А.Н., Журавлев А.В., Соболев Д.Б., Вевель Я.А., Груздев Д.А. (2018) Граница девона и карбона на Западном склоне севера Урала и Приуралья. *Тр. Палеонтол. о-ва*, вып. I. М.: ПИН РАН, 90-107.
- Тимонин Н.И. (1998) Печорская плита: история геологического развития в фанерозое. Екатеринбург: УрО РАН, 239 с.
- Юдин В.В. (1994) Орогенез севера Урала и Пай-Хоя. Екатеринбург: УИФ "Наука", 285 с.
- Becker R.T. (1993) Anoxia, eustatic changes, and Upper Devonian to lowermost Carboniferous global ammonoid diversity. *The Ammonoidea: Environment, Ecology and Evolutionary Change*. Oxford, Systematic Association, 115-163.
- Becker R.T., Ashouri A.R., Yazdi M. (2004) The Upper Devonian Annulata Event in the Shotori Range (Eastern Iran). *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen*, **231**(1), 119-143. <https://doi.org/10.1127/njgpa/231/2004/119>
- Bouma A.H. (1962) Sedimentology of some flysch deposits. Amsterdam: Elsevier, 168 p.
- Buggisch W., Joachimski M.M. (2006) Carbon isotope stratigraphy of the Devonian of Central and Western Europe. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **240**, 68-88. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2006.03.046>
- Burdige D.J. (2007) Preservation of Organic Matter in Marine Sediments: Controls, Mechanisms, and an Imbalance in Sediment Organic Carbon Budgets? *Chem. Rev.*, **107**, 467-485. <https://doi.org/10.1021/cr050347q>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2015.10.051>
- Cramer B., Saltzman M., Day J.E., Witzke B.J. (2008) Record of the Late Devonian Hangenberg global positive carbon-isotope excursion in an epeiric sea setting: carbonate production, organic-carbon burial and paleoceanography during the Late Famennian. *Dynamics of Epeiric Seas: Sedimentological, Paleontological and Geochemical Perspectives*. *Geol. Association Can. Spec. Publ.*, **48**, 103-118.
- Dzik J. (2006) The Famennian "Golden Age" of conodonts and ammonoids in the Polish part of the Variscan Sea. *Palaeontol. Polon.*, **63**, 1-360.
- George A.D., Chow N., Trinajstić K.M. (2014) Oxidic facies and the Late Devonian mass extinction, Canning Basin, Australia. *Geology*, **42**, 327-330. <https://doi.org/10.1130/G35249.1>
- Ginter M., Ivanov A. (1992) Devonian phoebodont shark teeth. *Acta Palaeontol. Polon.*, **37**(1), 55-75.
- Girard C., Cornée J.-J., Charruault A.-L., Corradini C., Weyer D., Bartsch K., Joachimski M., Feist R. (2017) Conodont biostratigraphy and palaeoenvironmental trends during the Famennian (Late Devonian) in the Thuringian Buschteich section (Germany). *Newslett. Stratigr.*, **50**(1), 71-89. <https://doi.org/10.1127/nos/2016/0318>
- Harris A.G., Sweet W.C. (1989) Mechanical and chemical techniques for separating microfossils from rock. Sediment and residue matrix. *Paleotechniques. Paleontol. Soc. Spec. Publ.*, **4**, 70-86.
- Huck S., Wohlwend 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). *Deposit. 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>
- Joachimski M.M., Buggisch W. (1993) Anoxic events in the late Frasnian – causes of the Frasnian-Famennian faunal crisis? *Geology*, **21**(8), 675-678. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1993\)021<0675:AEITLF>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1993)021<0675:AEITLF>2.3.CO;2)
- Kaiser S.I., Steuber T., Becker R.T., Joachimski M.M. (2006) Geochemical evidence for major environmental change at the Devonian–Carboniferous boundary in the Carnic Alps and the Rhenish Massif. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **240**, 146-160. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2006.03.048>
- Königshof P., Savage N.M., Lutat P., Sardud A., Dopieralska J., Belka Z., Racki G. (2012) Late Devonian sedimentary record of the Paleotethys Ocean – The Mae Sariang section, northwestern Thailand. *J. Asian Earth Sci.*, **52**, 146-157. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2012.03.006>
- Kump L.R., Arthur M.A. (1999) Interpreting carbon-isotope excursions: carbonates and organic matter. *Chem. Geol.*, **161**(1-3), 181-198. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(99\)00086-8](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(99)00086-8)
- Kumpan T., Bábek O., Kalvoda J., Matys Grygar T., Frýda J. (2014) Sea-level and environmental changes around the Devonian–Carboniferous boundary in the Namur–Dinant Basin (S Belgium, NE France): A multi-proxy stratigraphic analysis of carbonate ramp archives and its use in regional and interregional correlations. *Sediment. Geol.*, **311**, 43-59. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2014.06.007>
- Lohmann K.C. (1988) Geochemical patterns of meteoric diagenetic systems and their application to studies of paleokarst. *Paleokarst*. Berlin: Springer, 58-80.
- Marshall J.D. (1992) Climatic and oceanographic isotopic signals from the carbonate rock record and their preservation. *Geol. Mag.*, **129**(2), 143-160. <https://doi.org/10.1017/S0016756800008244>

- Pisarzowska A., Racki G. (2020) Chapter 8. Comparative carbon isotope chemostratigraphy of major Late Devonian biotic crises. *Stratigraphy and Timescales. V. 5. Carbon Isotope Stratigraphy*. Cambridge: Academic Press, 387-466. <https://doi.org/10.1016/bs.sats.2020.08.001>
- Pisarzowska A., Rakociński M., Marynowski L., Szczerba M., Thoby M., Paszkowski M., Perri M.C., Spalletta C., Schönlaub H.-P., Kowalik N., Gereke M. (2020) Large environmental disturbances caused by magmatic activity during the Late Devonian Hangenberg Crisis. *Global Planet. Change*, **190**, 103155. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103155>
- Plotitsyn A.N., Zhuravlev A.V., Sobolev D.B., Gruzdev D.A., Vevel Y.A., Nikolaeva S.V. (2024) Devonian–Carboniferous transition in various facies of Northeast Laurussia (North Urals). *Palaeoworld*, **33**(5), 1281-1297. <https://doi.org/10.1016/j.palwor.2024.01.001>
- Qie W., Algeo T.J., Luo G., Herrmann A. (2019) Global events of the Late Paleozoic (Early Devonian to Middle Permian): A review. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **531**(A), 109259. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2019.109259>
- Qie W., Wang X.-D., Zhang X., Ji W., Grossman E.L., Huang X., Liu J., Luo G. (2016) Latest Devonian to earliest Carboniferous conodont and carbon isotope stratigraphy of a shallow-water sequence in South China. *Geol. J.*, **51**(6), 915-935. <https://doi.org/10.1002/gj.2710>
- 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>
- Racki G. (2020) Big 5 Mass Extinctions. *Encyclopedia of Geology. 2nd ed.* London; San Diego; Cambridge; Oxford: Academic Press, 603-616. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12028-7>
- Racki G., Rakociński M., Marynowski L., Wignall P.B. (2018) Mercury enrichments and the Frasnian-Famennian biotic crisis: A volcanic trigger proved? *Geology*, **46**(6), 543-646. <https://doi.org/10.1130/G40233.1>
- Saltzman M.R. (2005) Phosphorus, nitrogen, and the redox evolution of the Paleozoic oceans. *Geol. Soc. Amer.*, **33**(7), 573-576. <https://doi.org/10.1130/G21535.1>
- Saltzman M.R., Thomas E. (2012) Carbon isotope stratigraphy. *The Geologic Time Scale 2012*. Amsterdam: Elsevier, 207-232. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59425-9.00011-1>
- Spalletta C., Perri M.C., Over J., Corradini C. (2017) Famennian (Upper Devonian) conodont zonation: revised global standard. *Bull. Geosci.*, **92**, 31-57. <https://doi.org/10.3140/bull.geosci.1623>
- Stow D., Smillie Z. (2020) Distinguishing between deep-water sediment facies: turbidites, contourites and hemipelagites. *Geosci.*, **10**(2), 68. <https://doi.org/10.3390/geosciences10020068>
- Walliser O.H. (1996) Global events in the Devonian and Carboniferous. *Global Events and Event Stratigraphy in the Phanerozoic*. Berlin: Springer, 225-250.
- Zhang X., Joachimski M.M., Over D.J., Ma K., Huang C., Gong Y. (2019) Late Devonian carbon isotope chemostratigraphy: A new record from the offshore facies of South China. *Global Planet. Change*, **182**, 103024. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.103024>
- Zhuravlev A.V., Plotitsyn A.N., Gruzdev D.A., Smoleva I.V. (2020) Carbon isotope stratigraphy of the Tournaisian (Lower Mississippian) successions of NE Europe. *Stratigraphy and Timescales. V. 5. Carbon Isotope Stratigraphy*. Cambridge: Academic Press, 467-528. <https://doi.org/10.1016/bs.sats.2020.08.007>
- Ziegler W., Sandberg C.A. (1990) The late Devonian standard conodont zonation. *Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg*, **121**, 1-115.

REFERENCES

- Barskov I.S., Alekseev A.S., Kononova L.I., Migdisova A.V. (1987) Atlas of Upper Devonian and Carboniferous conodonts. Moscow, MGU, 144 p. (In Russ.)
- Becker R.T. (1993) Anoxia, eustatic changes, and Upper Devonian to lowermost Carboniferous global ammonoid diversity. *The Ammonoidea: Environment, Ecology and Evolutionary Change*. Oxford, Systematic Association, 115-163.
- Becker R.T., Ashouri A.R., Yazdi M. (2004) The Upper Devonian Annulata Event in the Shotori Range (Eastern Iran). *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen*, **231**(1), 119-143. <https://doi.org/10.1127/njgpa/231/2004/119>
- Bouma A.H. (1962) Sedimentology of some flysch deposits. Amsterdam, Elsevier, 168 p.
- Buggisch W., Joachimski M.M. (2006) Carbon isotope stratigraphy of the Devonian of Central and Western Europe. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **240**, 68-88. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2006.03.046>
- Burdige D.J. (2007) Preservation of Organic Matter in Marine Sediments: Controls, Mechanisms, and an Imbalance in Sediment Organic Carbon Budgets? *Chem. Rev.*, **107**, 467-485. <https://doi.org/10.1021/cr050347q>
- Bushnev D.A., Plotitsyn A.N., Gruzdev D.A., Burdel'naya N.S. Famennian organic matter of the Southern part of the Chernyshev Ridge (Iz'yayol River section). *Neftegaz. Geol. Teor. Prakt.*, **12**(3). (In Russ.). https://doi.org/10.17353/2070-5379/26_2017
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2015.10.051>
- Cramer B., Saltzman M., Day J.E., Witzke B.J. (2008) Record of the Late Devonian Hangenberg global positive carbon-isotope excursion in an epeiric sea setting: carbonate production, organic-carbon burial and paleoceanography during the Late Famennian. *Dynamics of Epeiric Seas: Sedimentological, Paleontological and Geochemical Perspectives*. Geol. Association Can. Spec. Publ., **48**, 103-118.
- Dzik J. (2006) The Famennian "Golden Age" of conodonts and ammonoids in the Polish part of the Variscan Sea. *Palaeontol. Polon.*, **63**, 1-360.
- Gatovsky Yu.A. (2010) New records of the conodont genus *Polygnathus* from the lower Famennian of Mugodzhary, Western Kazakhstan. *Paleontol. Zhurn.*, (3), 74-78. (In Russ.)
- George A.D., Chow N., Trinajstić K.M. (2014) Oxidic facies and the Late Devonian mass extinction, Canning Basin, Australia. *Geology*, **42**, 327-330. <https://doi.org/10.1130/G35249.1>

- Ginter M., Ivanov A. (1992) Devonian phoebeodont shark teeth. *Acta Palaeontol. Polon.*, **37**(1), 55-75.
- Girard C., Cornée J.-J., Charruault A.-L., Corradini C., Weyer D., Bartsch K., Joachimski M., Feist R. (2017) Conodont biostratigraphy and palaeoenvironmental trends during the Famennian (Late Devonian) in the Thuringian Buschteich section (Germany). *Newslett. Stratigr.*, **50**(1), 71-89. <https://doi.org/10.1127/nos/2016/0318>
- Gruzdev D.A., Zhuravlev A.V., Vevel Ya.A., Erofeevsky A.V., Smoleva I.V. Famennian negative carbon isotope excursion in the Izyayu River section (Tchernyshev Uplift, Cis-Uralian Foredeep). *Lithosphere (Russia)*, **23**(2), 165-178. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-2-165-178>
- Harris A.G., Sweet W.C. (1989) Mechanical and chemical techniques for separating microfossils from rock. Sediment and residue matrix. Paleotechniques. *Paleontol. Soc. Spec. Publ.*, **4**, 70-86.
- Huck S., Wohlwend 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). *Deposit. 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>
- Joachimski M.M., Buggisch W. (1993) Anoxic events in the late Frasnian – causes of the Frasnian-Famennian faunal crisis? *Geology*, **21**(8), 675-678. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1993\)021<0675:AEITLF>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1993)021<0675:AEITLF>2.3.CO;2)
- Kaiser S.I., Steuber T., Becker R.T., Joachimski M.M. (2006) Geochemical evidence for major environmental change at the Devonian–Carboniferous boundary in the Carnic Alps and the Rhenish Massif. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **240**, 146-160. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2006.03.048>
- Königshof P., Savage N.M., Lutat P., Sardisud A., Dopieralska J., Belka Z., Racki G. (2012) Late Devonian sedimentary record of the Paleotethys Ocean – The Mae Sariang section, northwestern Thailand. *J. Asian Earth Sci.*, **52**, 146-157. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2012.03.006>
- Kump L.R., Arthur M.A. (1999) Interpreting carbon-isotope excursions: carbonates and organic matter. *Chem. Geol.*, **161**(1-3), 181-198. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(99\)00086-8](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(99)00086-8)
- Kump T., Bábek O., Kalvoda J., Matys Grygar T., Frýda J. (2014) Sea-level and environmental changes around the Devonian–Carboniferous boundary in the Namur–Dinant Basin (S Belgium, NE France): A multi-proxy stratigraphic analysis of carbonate ramp archives and its use in regional and interregional correlations. *Sediment. Geol.*, **311**, 43-59. <https://doi.org/10.1016/j.sed-geo.2014.06.007>
- Lohmann K.C. (1988) Geochemical patterns of meteoric diagenetic systems and their application to studies of paleokarst. *Paleokarst*. Berlin, Springer, 58-80.
- Marshall J.D. (1992) Climatic and oceanographic isotopic signals from the carbonate rock record and their preservation. *Geol. Mag.*, **129**(2), 143-160. <https://doi.org/10.1017/S0016756800008244>
- Nikonov N.I., Bogackij V.I., Martynov A.V., Larinova Z.V., Laskin V.M., Galkina L.V., Dovzhikova E.G., Ermakova O.L., Kostygova P.K., Kuranova T.I., Moskalenko K.A., Pankratov YU.A., Petrenko E.L., Popova E.V., Surina A.I., Shabanova G.A. (2000) Timan-Pechora sedimentary basin. Atlas of geological maps (lithofacies, structural and paleogeological). Ukhta, Regional'nyi dom pechati Publ., 64 p. (In Russ.)
- Pisarszowska A., Racki G. (2020) Chapter 8. Comparative carbon isotope chemostratigraphy of major Late Devonian biotic crises. *Stratigraphy and Timescales. V. 5. Carbon Isotope Stratigraphy*. Cambridge: Academic Press, 387-466. <https://doi.org/10.1016/bs.sats.2020.08.001>
- Pisarszowska A., Rakociński M., Marynowski L., Szczerba M., Thoby M., Paszkowski M., Perri M.C., Spalletta C., Schönlaub H.-P., Kowalik N., Gereke M. (2020) Large environmental disturbances caused by magmatic activity during the Late Devonian Hangenberg Crisis. *Global Planet. Change*, **190**, 103155. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103155>
- Plotitsyn A.N., Gruzdev D.A. (2019) Unique location of early Protognathodus (conodonts) on the Chernyshev Swell. *Vestn. IG Komi NTs UrO RAN*, (3), 14-23. (In Russ.) <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2019-03-14-23>
- Plotitsyn A.N., Zhuravlev A.V., Sobolev D.B., Gruzdev D.A., Vevel Ya.A., Nikolaeva S.V. (2024) Devonian–Carboniferous transition in various facies of Northeast Laurussia (North Urals). *Palaeoworld*, **33**(5), 1281-1297. <https://doi.org/10.1016/j.palwor.2024.01.001>
- Plotitsyn A.N., Zhuravlev A.V., Sobolev D.B., Vevel Ya.A., Gruzdev D.A. (2018) The Devonian–Carboniferous boundary in the western slope of the North Urals and Cis-Urals. *Tr. Paleontol. o-va*, vyp. I. Moscow, PIN RAN, 90-107. (In Russ.)
- Qie W., Algeo T.J., Luo G., Herrmann A. (2019) Global events of the Late Paleozoic (Early Devonian to Middle Permian): A review. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **531**(A), 109259. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2019.109259>
- Qie W., Wang X.-D., Zhang X., Ji W., Grossman E.L., Huang X., Liu J., Luo G. (2016) Latest Devonian to earliest Carboniferous conodont and carbon isotope stratigraphy of a shallow-water sequence in South China. *Geol. J.*, **51**(6), 915-935. <https://doi.org/10.1002/gj.2710>
- 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>
- Racki G. (2020) Big 5 Mass Extinctions. *Encyclopedia of Geology. 2nd ed.* London; San Diego; Cambridge; Oxford, Academic Press, 603-616. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12028-7>
- Racki G., Rakocinski M., Marynowski L., Wignall P.B. (2018) Mercury enrichments and the Frasnian-Famennian biotic crisis: A volcanic trigger proved? *Geology*, **46**(6), 543-646. <https://doi.org/10.1130/G40233.1>
- Saltzman M.R. (2005) Phosphorus, nitrogen, and the redox evolution of the Paleozoic oceans. *Geol. Soc. Amer.*, **33**(7), 573-576. <https://doi.org/10.1130/G21535.1>
- Saltzman M.R., Thomas E. (2012) Carbon isotope stratigraphy. *The Geological Time Scale 2012*. Amsterdam, Elsevi-

- er, 207-232. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59425-9.00011-1>
- Spalletta C., Perri M.C., Over J., Corradini C. (2017) Famennian (Upper Devonian) conodont zonation: revised global standard. *Bull. Geosci.*, **92**, 31-57. <https://doi.org/10.3140/bull.geosci.1623>
- Stow D., Smillie Z. (2020) Distinguishing between deep-water sediment facies: turbidites, contourites and hemipelagites. *Geosci.*, **10**(2), 68. <https://doi.org/10.3390/geosciences10020068>
- Timonin N.I. (1998) Pechora Plate: history of geological development in the Phanerozoic. Ekaterinburg, UrO RAN, 239 p. (In Russ.)
- Walliser O.H. (1996) Global events in the Devonian and Carboniferous. *Global Events and Event Stratigraphy in the Phanerozoic*. Berlin, Springer, 225-250.
- Yudin V.V. (1994) Orogenesis of the North Urals and Pay-Khoy. Ekaterinburg, Nauka Publ., 283 p. (In Russ.)
- Zhang X., Joachimski M.M., Over D.J., Ma K., Huang C., Gong Y. (2019) Late Devonian carbon isotope chemostratigraphy: A new record from the offshore facies of South China. *Global Planet. Change*, **182**, 103024. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.103024>
- Zhuravlev A.V., Plotitsyn A.N., Gruzdev D.A., Smoleva I.V. (2020) Carbon isotope stratigraphy of the Tournaisian (Lower Mississippian) successions of NE Europe. *Stratigraphy and Timescales. V. 5. Carbon Isotope Stratigraphy*. Cambridge, Academic Press, 467-528. <https://doi.org/10.1016/bs.sats.2020.08.007>
- Ziegler W., Sandberg C.A. (1990) The late Devonian standard conodont zonation. *Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg*, **121**, 1-115.