

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Поступила в редакцию 09.12.2024 г.

Принята к публикации 11.02.2025 г.

EDN: LZGD XD

УДК 551.735.1(470.13)

Журавлев А.В., Вевель Я.А., Груздев Д.А.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии им. акад. Н.П. Юшкина ФИЦ Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (ФГБУН ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН), Сыктывкар, Россия, micropalaeontology@gmail.com

СЕРПУХОВСКАЯ ИЗОТОПНАЯ АНОМАЛИЯ ПО НЕОРГАНИЧЕСКОМУ УГЛЕРОДУ – ВЕРОЯТНЫЕ ПРИЧИНЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СТРАТИГРАФИИ ТИМАНО-ПЕЧОРСКОЙ НЕФТЕГАЗОНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ

Глобальная серпуховская положительная изотопная аномалия по неорганическому углероду ограничена двумя узкими отрицательными экскурсами. Отрицательные экскурсы, скорее всего, обусловлены увеличением выветривания органического углерода во время регрессий, а положительная аномалия могла быть связана с повышением содержания углекислоты в атмосфере и сопутствующим увеличением фиксации углерода первичными продуцентами. Стратиграфический объем изотопной аномалии соответствует зоне ziegleri по конодонтам, что примерно отвечает тарускому, стешевскому и нижней части протвинского горизонта региональной стратиграфической схемы. На территории Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции серпуховская изотопная аномалия идентифицирована в серии опорных разрезов и в керне скважин Падимейской площади. Выявление этой аномалии в скважинах Падимейская 6 и 4 позволило уточнить их стратиграфическое расчленение в верхневизейско-нижнесерпуховской части разреза и определить положение подошвы серпуховского яруса.

Ключевые слова: *изотопная аномалия, серпуховский ярус, Падимейская площадь, Тимано-Печорская нефтегазоносная провинция.*

Для цитирования: Журавлев А.В., Вевель Я.А., Груздев Д.А. Серпуховская изотопная аномалия по неорганическому углероду - вероятные причины и перспективы использования в стратиграфии Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции // Нефтегазовая геология. Теория и практика. - 2025. - Т.20. - №1. - https://www.ngtp.ru/rub/2025/6_2025.html EDN: LZGD XD

Поздневизейско-серпуховский интервал в истории Земли отмечен началом длительного позднепалеозойского ледникового периода, обусловившего существенные изменения в биосфере и углеродном цикле [Fielding, Frank, Isbell, 2008; Goddéris et al., 2017; Valdez Buso et al., 2020; Yao et al., 2022]. Перестройки углеродного цикла отразились в серии аномалий в изотопном составе углерода карбонатов [Batt et al., 2007]. С. Лиу с соавторами выявили широкую, но различимую положительную изотопную аномалию по неорганическому углероду вблизи границы визейского и серпуховского ярусов [Liu et al., 2022]. Эта положительная аномалия ограничена двумя узкими отрицательными экскурсами с амплитудой около 1-2‰. Указанная последовательность изменений изотопного состава неорганического углерода прослеживается в южнокитайских, североамериканских и

североуральских разрезах и биостратиграфически хорошо датирована [Bat et al., 2007; Chen et al., 2016; Liu et al., 2022; Zhuravlev et al., 2023]. Начало аномалии отвечает пограничному визейско-серпуховскому интервалу (самая верхняя часть конодонтовой зоны *podosa* и самая нижняя часть конодонтовой зоны *ziegleri*), а ее завершение приходится на верхнюю часть конодонтовой зоны *ziegleri* нижнего серпухова.

Цель данной работы состоит в реконструкции причин серпуховской изотопной аномалии и оценке возможности ее стратиграфического применения в скважинах с поинтервальным отбором керна на территории Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции (ТП НГП).

На территории ТП НГП серпуховская изотопная аномалия детально изучена в разрезах юга гряды Чернышева и на Западном склоне Приполярного Урала [Zhuravlev et al., 2023]. Полностью интервал, отвечающий аномалии, вскрыт в опорных разрезах на р. Изьяю, в бассейне р. Кожва и в карьере на р. Миссиссиппка (рис. 1). Верхняя часть этого интервала охарактеризована также в разрезе на р. Большая Надота. В указанной серии разрезов серпуховская изотопная аномалия датирована по конодонтам, фораминиферам и остракодам. Нижняя граница аномалии, отмеченная кратковременным отрицательным экскурсом (SN1), примерно совпадает с первыми находками фораминифер *Monotaxinoides*, конодонтов *Lochriea ziegleri* Nemirovskaya, Perret et Meischner и остракод *Bairdia serpuhovensis* Samoilova et Smirnova и *Kellettina bituberculata* (M'Coу), которые маркируют подошву серпуховского яруса [Zhuravlev et al., 2023]. Следует отметить, что маркер нижней границы серпуховского яруса в Международной стратиграфической шкале к настоящему времени еще не утвержден, а в качестве наиболее перспективного кандидата рассматривается первое появление конодонтов *Lochriea ziegleri* [Richards, 2013]. Верхняя граница серпуховской изотопной аномалии не совпадает с биостратиграфическими границами и располагается в верхней части зоны *ziegleri*. Этому уровню отвечает незначительный отрицательный изотопный экскурс по неорганическому углероду (SN2), который, однако, прослеживается глобально [Zhuravlev et al., 2023]. Таким образом, стратиграфический объем изотопной аномалии соответствует большей части зоны *ziegleri* по конодонтам и примерно отвечает тарускому, стешевскому и, возможно, нижней части протвинского горизонта региональной стратиграфической схемы. Амплитуда аномалии (превышение значений над окружающими ее минимумами) в изученных опорных разрезах составляет от 1‰ (разрезы на рр. Миссиссиппка и Большая Надота) до почти 4‰ (разрезы бассейна р. Кожвы). При этом амплитуда закономерно снижается по направлению к открытому морю. Структура аномалии сохраняется во всех фациях: она представляет собой широкое плато, ограниченное двумя отрицательными экскурсами [Liu et al., 2022; Zhuravlev et al., 2023].

В качестве возможной причины, вызвавшей формирование этой изотопной аномалии, рассматриваются климатические изменения и связанные с ними эвстатические колебания уровня моря. По имеющимся данным [Yao et al., 2022], серия изотопных экскурсов неорганического углерода в пограничном визейско-серпуховском интервале совпадает с началом основной фазы позднепалеозойского ледникового периода. Тем не менее, совпадение не означает наличие причинно-следственных связей. Отрицательные экскурсы, скорее всего, обусловлены увеличением выветривания изотопно-легкого органического углерода во время регрессивных эпизодов и его поступлением в воды морских бассейнов. Экскурсу SN1 соответствует масштабная регрессия в веневское время (конец визейского века). Экскурс SN2 сопоставляется с незначительной регрессией в начале позднего серпухова (начало протвинского времени). Обе упомянутые регрессии фиксируются в бассейне Московской синеклизы [Махлина и др., 2001] и в Печорском бассейне. При этом в Печорском бассейне хорошо проявлена только веневская регрессия [Журавлев, 2023; Вевель и др., 2023]. Согласно имеющимся данным [Ross, Ross, 1987; Naq, Schutter, 2008] этим регрессиям отвечают эвстатические падения уровня мирового океана, возможно связанные с развитием покровного оледенения в Гондване [Valdez Buso et al., 2020]. Относительно длительная малоамплитудная положительная аномалия примерно отвечает началу межледникового эпизода [Valdez Buso et al., 2020; Zhuravlev et al., 2023], который, вероятно, обусловлен временным повышением содержания углекислоты в атмосфере. Рост содержания CO₂ способствовал не только повышению глобальных температур за счет парникового эффекта, но и повышению фиксации изотопно-легкого углерода первичными продуцентами (наземными растениями, водорослями и фитопланктоном). Последнее привело к утяжелению изотопного состава растворенного в морской воде бикарбоната и, соответственно, морских карбонатов [Zhuravlev et al., 2023]. Последующее снижение значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ в конце раннего серпухова может быть обусловлено временным сокращением первичной биопродуктивности и темпов захоронения органического вещества из-за уменьшения доступных для фитопланктона питательных веществ (углекислоты, азота и фосфора). Например, некоторое снижение эффективной скорости роста фитопланктона, примерно совпадающее с изотопным экскурсом SN2, реконструируется на материале из разреза на р. Изьяю. Реконструкция проведена на основе данных об изотопном составе конодонтовых элементов и вмещающих карбонатов с помощью компьютерной модели C-model [Журавлев, 2022]. По аналогии с четвертичными межледниковьями, основным лимитирующим фактором для развития фитопланктона мог выступать дефицит доступного азота [Galbraith, Kienast, 2013]. В региональном плане снижению значений $\delta^{13}\text{C}$ в конце раннего – начале позднего серпухова могла также способствовать активизация подводных гидротерм («белых курильщиков») с

выносом изотопно-легкого углерода в батинальной области. Следы таких гидротерм установлены в серпуховской части карской свиты на Пай-Хое [Беляев, Семенов, 1988; Журавлев, Герасимова, 2016]. В карбонатных телах гидротермальных построек, вскрывающихся на р. Пэтарка (северный Пай-Хой), среднее значение $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ составляет -5,5‰, а минимальное значение достигает -15,6‰. Однако вклад гидротермальной деятельности в общую динамику изотопного состава растворенного неорганического углерода в морском бассейне, скорее всего, незначителен.

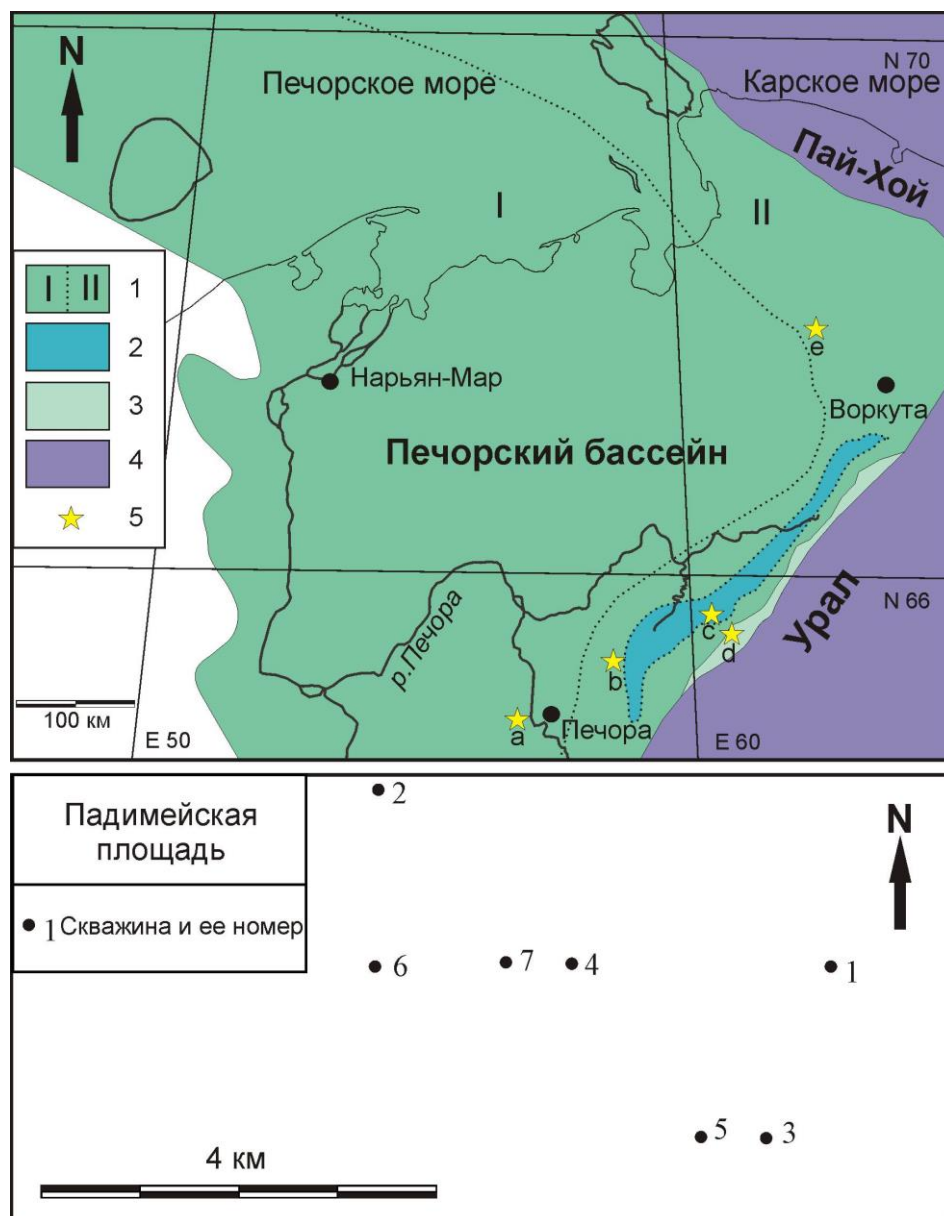


Рис. 1. Схема расположения разрезов, где установлена серпуховская изотопная аномалия
 1 - фашии карбонатного шельфа (I - внутреннего; II - внешнего); 2 - фашии внутршельфовой впадины; 3 - фашии отмели и органогенных построек края шельфа; 4 - батинальные фашии; 5 - положение разрезов (a - бассейн р. Кожва; b - р. Изъяю; c - р. Миссисиппка; d - р. Большая Надота; e - Падимейская площадь). Палеогеографическая схема составлена с использованием материалов авторов и данных из [Костыгова, 2004]. Схема расположения скважин на Падимейской площади дана по [Журавлев, Вевель, 2022] с упрощениями.

По структуре серпуховская аномалия сходна с таковой, диагностируемой в ранне-среднефранском интервале позднего девона [Pisarzowska, Racki, 2012; Pisarzowska et al., 2020]. Отрицательный экскурс SN1 выступает аналогом изотопного события II в конце раннего франа (номенклатура франских изотопных событий дана по [Pisarzowska, Racki, 2012]). Последующее увеличение значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ и плато в нижнем серпухове аналогично изотопному событию III в зоне punctata среднего франа, а отрицательный экскурс SN2 – событию IV вблизи кровли зоны punctata. При этом ранне-среднефранская изотопная аномалия формировалась при преобладании парникового климата и характеризовалась гораздо большей амплитудой (до 6-8‰) [Pisarzowska et al., 2020]. Значительная амплитуда ранне-среднефранской аномалии могла быть обусловлена развитием бескислородных условий в нижней части водного столба, что способствовало более эффективному захоронению органического вещества и фиксации изотопно-легкого углерода [Pisarzowska et al., 2020]. Серпуховская изотопная аномалия не сопровождалась бескислородными условиями на значительных акваториях, поэтому масштабы фиксации изотопно-легкого углерода в океане и на шельфах и, соответственно, амплитуда аномалии были меньше.

Глобальные причины, вызвавшие серпуховскую изотопную аномалию, обусловили ее синхронное проявление в различных морских бассейнах и фациальных поясах. По этой причине данная аномалия имеет высокий потенциал для изотопной стратиграфии [Zhuravlev et al., 2023].

Для оценки прослеживаемости и возможности стратиграфического применения серпуховской изотопной аномалии на закрытых территориях ТП НГП изучен керн скважин Падимейской площади (Падимейская 4 и Падимейская 6) (рис. 1). Эта площадь расположена в пределах Падимейской ступени Воркутинского поперечного поднятия Предуральяского прогиба. На ней располагается Падимейское нефтегазоконденсатное месторождение [Данилов, 1992], и многочисленными скважинами вскрыт разрез от силура до перми. Биостратиграфически обоснованная мощность визейско-серпуховского интервала нижнего карбона на Падимейской площади составляет около 700 м, а серпуховского яруса – около 90 м. Средняя охарактеризованность этого интервала керном в скважинах 4 и 6 – около 6-7%. Серпуховский ярус биостратиграфически подтвержден по фораминиферам и конодонтам в интервалах глубин 1515-1581 м в скв. Падимейская 6, а верхнесерпуховский подъярус – в интервале глубин 1736,4-1765,7 м в скв. Падимейская 4 [Дуркина, 2002; Костыгова, 2004; Журавлев, Вевель, 2022].

Из керна скважин Падимейская 6 и 4 отобрано 9 образцов карбонатных пород для изотопных исследований. Образцы характеризуют верхневизейско-серпуховский стратиграфический интервал и представлены в различной степени перекристаллизованными

вак- и пакстоунами (табл. 1, рис. 2). Для приблизительной оценки степени перекристаллизации карбонатов использован средний размер кристаллитов первично микритового матрикса вак- и пакстоунов (см. табл. 1). Чем этот размер больше, тем степень перекристаллизации выше [Flügel, 2010, стр. 362]. Данный параметр определялся оптическими методами в шлифах с точностью 1 мкм.

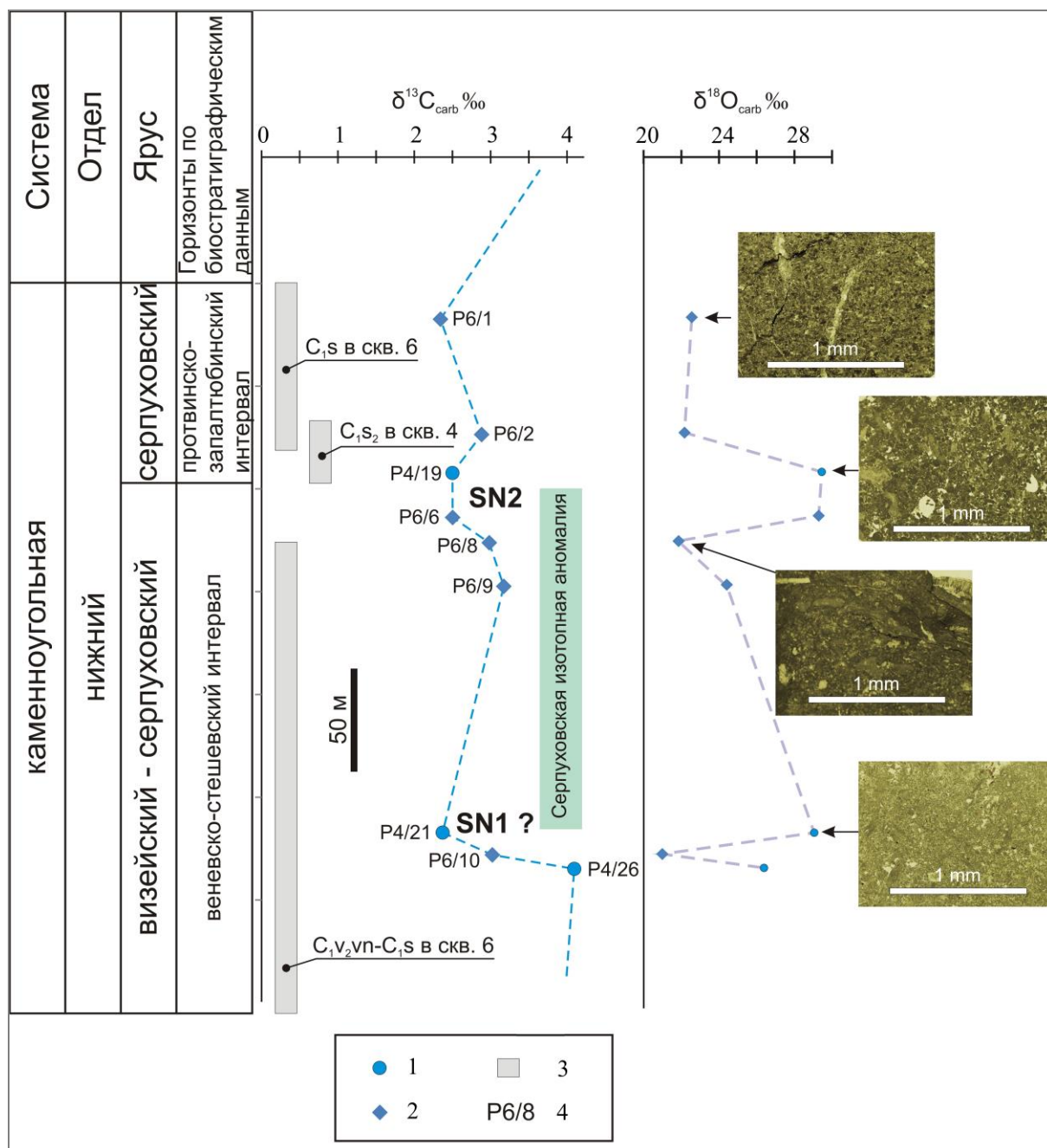


Рис. 2. Динамика изотопного состава углерода и кислорода карбонатов в верхневизейско-серпуховском интервале Падимейской площади

1 - данные из скв. Падимейская 4; 2 - данные из скв. Падимейская 6; 3 - биостратиграфически датированные интервалы; 4 - номера образцов.

Использованы данные по скважинам 4 и 6. Биостратиграфически датированные интервалы даны по [Журавлев, Вевель, 2022] с дополнениями. Для некоторых образцов приведены микрофотографии шлифов.

Таблица 1

Результаты изотопных анализов и литологическая характеристика карбонатов из скважин Падимейская 4 и 6

Скважина	Глубина (м)	Образец	$\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ ‰, PDB	$\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ ‰, SMOW	Стратиграфическая привязка	Литологическая характеристика	Размер кристаллитов (мкм)	Интервал изотопной аномалии
Падимейская 6	1517,50	P6/1	2,3	22,6	C ₁ s ₂	пакстоун перекристаллизованный	81	
Падимейская 6	1573,60	P6/2	2,9	22,2	C ₁ s			
Падимейская 6	1613,90	P6/6	2,5	29,3	C ₁ v ₂ -s	вакстоун сильно перекристаллизованный	92	
Падимейская 6	1626,20	P6/8	3,0	21,9	C ₁ v ₂ -s	пакстоун	75	
Падимейская 6	1647,40	P6/9	3,2	24,4	C ₁ v ₂ -s	вакстоун сильно перекристаллизованный	77	
Падимейская 6	1778,20	P6/10	3,0	21,0	C ₁ v ₂ -s	пак-вакстоун перекристаллизованный	65	
Падимейская 4	1759,50	P4/19	2,5	29,5	C ₁ s ₂	пакстоун перекристаллизованный	69	
Падимейская 4	1940,70	P4/21	2,4	29,2	C ₁ v-s	вакстоун сильно перекристаллизованный	97	
Падимейская 4	1954,00	P4/26	4,1	26,3	C ₁ v-s			

Изучение изотопного состава углерода и кислорода проводилось на масс-спектрометре DELTA V Advantage с пробоподготовкой на линии Gas Bench II по стандартной методике. Значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ определялись относительно стандарта PDB (Pee Dee Belemnite), а $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ - относительно стандарта SMOW (Standard Mean Ocean Water). Точность определения $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ составляет $\pm 0,04\%$, а $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ - $\pm 0,06\%$. При калибровке использованы международные стандарты МАГАТЭ NBS18 (calcite) и NBS19 (TS-limestone). Изотопный анализ выполнен в ЦКП «Геонаука» Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (Сыктывкар), аналитик И.В. Смолева.

Распределение полученных изотопных данных по разрезу скважин показано на рис. 2. Следует отметить, что шаг отбора образцов из-за поинтервального отбора керна очень большой - варьирует от 12 м до почти 180 м. Представительность такого опробования вызывает серьезные сомнения. Однако следует учитывать большую мощность поздневизейско-серпуховских отложений, вскрытых в Падимейских скважинах. На фоне больших мощностей даже увеличенный шаг опробования позволяет приблизительно опознать отрицательные изотопные экскурсы по углероду SN1 и SN2 (см. рис. 2). Необходимо отметить, что эти экскурсы не связаны напрямую с литологическим составом и степенью перекристаллизации карбонатов (см. табл. 1).

Экскурс SN1 расположен в интервале, охарактеризованном веневско-серпуховским комплексом фораминифер с *Biseriella parva* (N. Tchernysheva) (скв. Падимейская 6, интервал глубин 1626-1863 м). Положение SN2 подтверждается биостратиграфически – несколько выше этого экскурса в скв. Падимейская 4 определены позднесерпуховские фораминиферы (глубина 1759,5 м), а в скв. Падимейская 6 – серпуховские конодонты (глубина 1573.6 м) (см. рис. 2). Исходя из полученных данных, серпуховской изотопной аномалии на Падимейской площади соответствует интервал мощностью около 160 м. В скв. Падимейская 6 - это интервал глубин от 1600 до 1760 м. Амплитуда аномалии составляет не менее 2‰, что ожидаемо для фаций удаленного от берега карбонатного шельфа (см. рис. 1). Вариации изотопного состава кислорода в этом интервале демонстрируют большую амплитуду (около 8‰) и, скорее всего, преимущественно характеризуют неоднородные вторичные изменения карбонатов (см. рис. 2). Отсутствие корреляции значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ и $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ ($R^2=0,044$) позволяет предполагать слабую искаженность изотопного состава углерода вторичными процессами, которые воздействовали на изотопный состав кислорода.

По структуре серпуховская изотопная аномалия на Падимейской площади сходна с таковой, идентифицированной в опорных разрезах Приуралья (разрез на р. Изъяю, юг поднятия Чернышева и разрез в бассейне р. Кожва, Лыжско-Кыртаельский вал) (рис. 3). Благодаря значительному стратиграфическому интервалу, который охватывает эта изотопная

аномалия, вероятность ее идентификации в керне скважин довольно высокая, даже при поинтервальном отборе керна. При этом для достоверной идентификации необходим минимальный набор биостратиграфических данных. На Падимейской площади в качестве таких данных выступают отдельные датированные уровни и интервалы по конодонтам и фораминиферам [Журавлев, Вевель, 2022] (см. рис. 2).

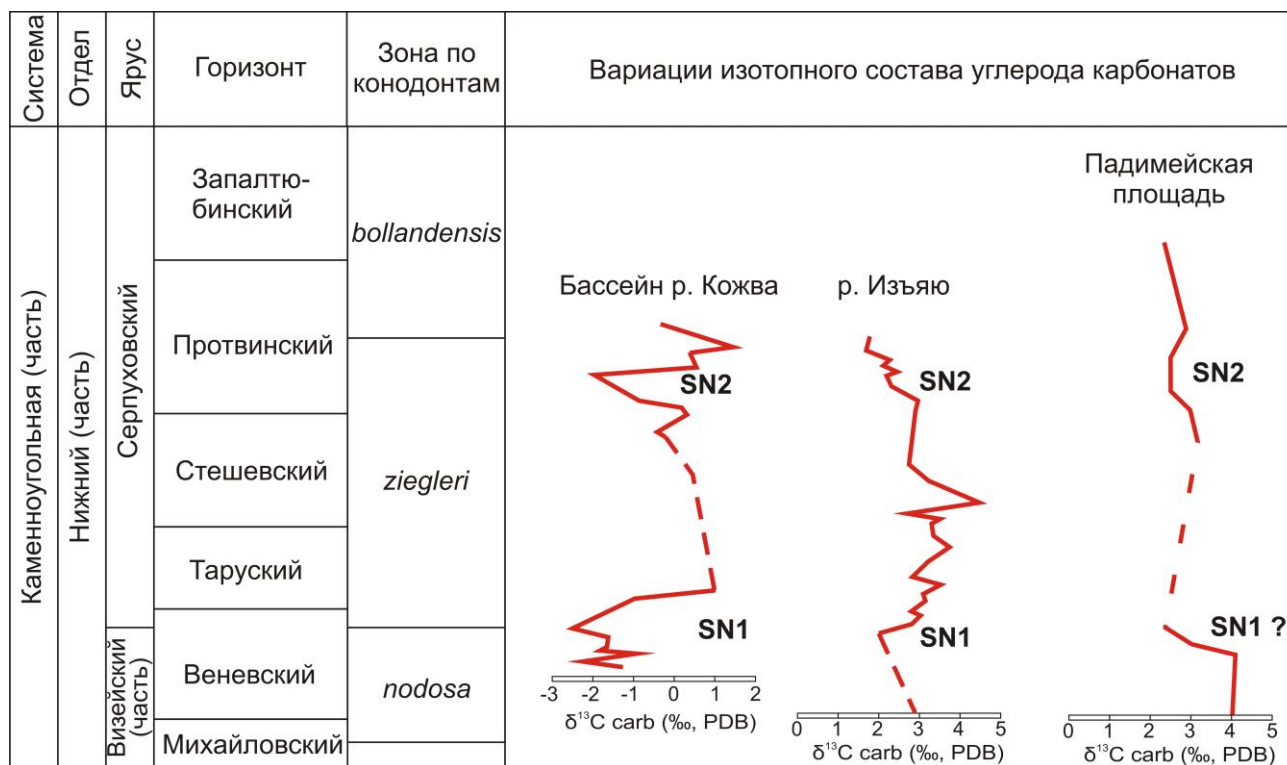


Рис. 3. Сопоставление вариаций изотопного состава углерода карбонатов в верхневизейско-серпуховском интервале в разрезах на территории Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции

Графики даны вне масштаба. Информация по разрезам в бассейне р. Кожва и на р. Изъяю приведена по [Zhuravlev et al., 2023].

Выявление серпуховской изотопной аномалии в скважинах Падимейская 6 и 4 позволяет уточнить стратиграфическое расчленение в бедной диагностическими органическими остатками верхневизейско-нижнесерпуховской части разреза. Интервал глубин от 1600 до 1760 м в скв. Падимейская 6 может быть сопоставлен с тарусским, стешевским и низами протвинского горизонтов (серпуховский ярус). Этому же стратиграфическому диапазону, вероятно, соответствует интервал глубин 1760-1941 м в скв. Падимейская 4. Подошва серпуховского яруса, примерно совпадающая с экскурсом SN1, проводится на глубине 1760 м в скв. Падимейская 6 и на глубине 1941 м в скв. Падимейская 4. Указанный вариант стратиграфического расчленения не противоречит имеющимся биостратиграфическим данным. Следует отметить, что нижняя граница серпуховского яруса по находкам органических остатков в рассмотренных скважинах не

устанавливается. В пограничном интервале найден лишь комплекс фораминифер с *Biseriella parva* (N. Tchernysheva), характерный для верхневизейско-серпуховского интервала, а заведомо серпуховские формы (например, фораминиферы *Monotaxinoides* и конодонты *Lochriea senckenbergica* Nemirovskaya, Perret et Meischner) обнаружены гораздо выше по разрезу [Журавлев, Вевель, 2022].

Таким образом, на примере скважин Падимейской площади показана эффективность изотопно-стратиграфического метода для диагностики границы визейского и серпуховского ярусов на закрытых территориях ТП НГП. Изотопная стратиграфия по неорганическому углероду представляется перспективной при ревизии керн опорных скважин, когда применение других методов нежелательно или невозможно из-за дефицита и уникальности кернового материала. Биостратиграфические методы сильно зависимы от объема каменного материала, который при их использовании разрушается (изготавливаются шлифы на фораминиферы, происходит химическая дезинтеграция породы на остракоды и конодонты). Изотопно-стратиграфический метод требует отбора крайне незначительных объемов каменного материала (менее 1 г) и его применение не ведет к разрушению или утрате керн. Недостатками метода являются относительно высокая стоимость и трудоемкость изотопных анализов, а также возможные искажения изотопного сигнала в сильно вторично преобразованных породах.

Финансирование. Исследования выполнены в рамках госзаданий по темам 1220406000010-8, 1220406000008-5.

Литература

Беляев А.А., Семенов Г.Ф. Генетические особенности серпуховских карбонатных отложений сланцевой зоны Пай-Хоя // Литология карбонатных пород севера Урала, Пай-Хоя и Тимана. - 1988. - Тр. ИГ КомиНЦ УРО АН СССР. - Вып. 67. - С. 51-61.

Вевель Я.А., Иванова Р.М., Груздев Д.А., Журавлёв А.В. Водоросли пограничных отложений визейского и серпуховского ярусов в разрезе на р. Изъяю (юг поднятия Чернышева) // Нефтегазовая геология. Теория и практика. - 2023. - Т.18. - №2. - http://www.ngtp.ru/rub/2023/24_2023.html EDN: ZSZTYM

Данилов В.Н. Перспективы нефтегазоносности верхнедевонских отложений северной части Косью-Роговской впадины // Геология нефти и газа. - 1992. - № 8. - <http://geolib.narod.ru/Journals/OilGasGeo/1992/08/Stat/01/stat01.html>

Дуркина А.В. Фораминиферы серпуховского яруса Тимано-Печорской провинции. - СПб: Изд-во Санкт-Петербургской картографической фабрики ВСЕГЕИ, 2002. - 198 с.

Журавлев А.В. Численное моделирование первичной биопродуктивности пелагических экосистем палеозоя // Вестник геонаук. - 2022. - №8. - С. 37-42. DOI: [10.19110/geov.2022.8.4](https://doi.org/10.19110/geov.2022.8.4)

Журавлев А.В. Местная стратиграфическая схема верхнего девона - нижнего карбона юго-запада Лыжско-Кыртаельского вала (восток Печорской плиты) // Нефтегазовая геология. Теория и практика. - 2023. - Т.18. - №1. - http://www.ngtp.ru/rub/2023/8_2023.html EDN: XNYUAF

Журавлев А.В., Вевель Я.А. Биостратиграфия верхнего девона – нижней перми Падимейской площади (северо-восток Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции) по конодонтам и фораминиферам // Нефтегазовая геология. Теория и практика. - 2022. - Т.17. - №2. - http://www.ngtp.ru/rub/2022/13_2022.html DOI: [10.17353/2070-5379/13_2022](https://doi.org/10.17353/2070-5379/13_2022)

Журавлев А.В., Герасимова А.И. Строение разреза и конодонты карской свиты (нижний карбон) Амдерминского района северного Пай-Хоя // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. - 2016. - №1. - С. 3-10. DOI: [10.19110/2221-1381-2016-1-3-10](https://doi.org/10.19110/2221-1381-2016-1-3-10)

Костыгова П.К. Печорский палеобассейн в визейском и серпуховском веках и фораминиферы нижнего визе. - СПб: Изд-во Санкт-Петербургской картографической фабрики ВСЕГЕИ, 2004. - 204 с.

Махлина М.Х., Алексеев А.С., Горева Н.В., Исакова Т.Н. Ритмо- и биостратиграфия карбона Московской синеклизы // Известия ВУЗов. Геология и разведка. - 2001. - №5. - С. 42-58.

Batt L.S., Montañez I.P., Isaacson P., Pope M.C., Butts S.H., Abplanalp J. Multi-carbonate component reconstruction of mid-Carboniferous (Chesterian) seawater $\delta^{13}\text{C}$ // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. - 2007. - Vol. 256. - P. 298-318. DOI: [10.1016/j.palaeo.2007.02.049](https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.02.049)

Chen J., Montañez I.P., Qi Y., Wang X., Wang Q., Lin W. 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 // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. - 2016. - Vol. 448. - P. 162-178.

Fielding C.R., Frank T.D., Isbell J.L. The late Paleozoic ice age - A review of current understanding and synthesis of global climate patterns // Resolving the Late Paleozoic Ice Age in Time and Space: Geological Society of America Special Publ. - 2008. - Vol. 441. - P. 343-354. DOI: [10.1130/2008.2441\(24\)](https://doi.org/10.1130/2008.2441(24))

Flügel E. Microfacies of Carbonate Rocks. Analysis, Interpretation and Application. - Heidelberg-Dordrecht-London-New York: Springer, 2010. - 984 p.

Galbraith E.D., Kienast M. The acceleration of oceanic denitrification during deglacial warming // Nature Geoscience. - 2013. - Vol. 7. - P. 579-584. DOI: [10.1038/ngeo1832](https://doi.org/10.1038/ngeo1832)

Goddéris Y., Donnadiou Y., Carretier S., Aretz M., Dera G., Macouin M., Regard V. Onset and ending of the late Palaeozoic ice age triggered by tectonically paced rock weathering // Nature Geoscience. - 2017. - Vol. 10. - P. 382-386. DOI: [10.1038/NGEO2931](https://doi.org/10.1038/NGEO2931)

Haq B.U., Schutter S.R. A chronology of Paleozoic sea-level changes // Science. - 2008. - Vol. 3. - No. 322. - P. 64-68.

Liu C., Vachard D., Du Y., Munnecke A., Liang T. Foraminiferal Zonation and Carbon Isotope Stratigraphy through the Viséan-Serpukhovian Boundary Interval - New Data from Three Inner-Platform Successions of South China // Available at SSRN. - 2022. DOI: [10.2139/ssrn.4063138](https://doi.org/10.2139/ssrn.4063138)

Pisarzowska A., Becker R.T., Aboussalam Z.S., Szczerba M., Sobieñ K., Kremer B., Owocki K., Racki G. Middlesex/punctata event in the Rhenish Basin (Padberg section, Sauerland, Germany) - Geochemical clues to the early-middle Frasnian perturbation of global carbon cycle // Global and Planetary Change. - 2020. - Vol. 191. - P. 1-14.

Pisarzowska A., Racki G. Isotopic geochemistry across the Early-Middle Frasnian transition (Late Devonian) on the South Polish carbonate shelf: a reference for the global punctata Event // Chem. Geol. - 2012. - No. 334. - P. 199-220.

Richards B.C. Current status of the International Carboniferous Time Scale // New Mexico Museum of Natural History and Science Bulletin. - 2013. - No. 60. - P. 348-353.

Ross C.A., Ross J.R.P. Late Paleozoic Sea Levels and Depositional Sequences. Cushman Foundation for Foraminiferal Research, Special Publication 24. - 1987. - P. 137-149.

Valdez Buso V., Milana J.P., di Pasquo M., Paim P.S.G., Philipp R.P., Aquino C.D., Cagliari J., Chemale Junior F., Kneller B. Timing of the Late Palaeozoic glaciation in western Gondwana: New ages and correlations from Paganzo and Paran'á basins // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. - 2020. - Vol. 544. - P. 109624.

DOI: [10.1016/j.palaeo.2020.109624](https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2020.109624)

Yao L., Jiang G., Mii H.-S., Lin Y., Aretz M., Chen J., Qi Y., Lin W., Wang Q., Wang X. Global cooling initiated the Middle-Late Mississippian biodiversity crisis // *Global and Planetary Change*. - 2022. - Vol. 215. - 103852. DOI: [10.1016/j.gloplacha.2022.103852](https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103852)

Zhuravlev A.V., Vevel Y.A., Gruzdev D.A., Erofeevsky A.V. Late Mississippian (early Serpukhovian) carbon isotope record of northern Laurussia: A proposal for the Viséan/Serpukhovian boundary // *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. - 2023. - Vol. 40. - No. 1. - P. 35-43. DOI: [10.22201/cgeo.20072902e.2023.1.1722](https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2023.1.1722)

This is an open access article under the CC BY 4.0 license

Received 09.12.2024

Published 11.02.2025

Zhuravlev A.V., Vevel Ya.A., Gruzdev D.A.

Institute of Geology FRC Komi Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Science (IG FRC Komi Scientific Center UB RAS), Syktyvkar, Russia, micropalaeontology@gmail.com

THE SERPUKHOVIAN ISOTOPE ANOMALY IN INORGANIC CARBON – POSSIBLE CAUSES AND PROSPECTS FOR ITS APPLICATION IN THE STRATIGRAPHY OF THE TIMAN-PECHORA PETROLEUM PROVINCE

The global Serpukhovian positive C-isotope anomaly is bounded by two narrow negative excursions. The negative excursions are most likely due to increased weathering of organic carbon during regressions, whereas the positive anomaly could be related to an increase in atmospheric carbon dioxide and the concomitant increase in carbon fixation by primary producers. The stratigraphic extent of the isotope anomaly corresponds to the ziegleri conodont zone, which roughly corresponds to the Tarusian, Steshevian and lower part of the Protvian of the regional stratigraphic scheme. On the territory of the Timan-Pechora petroleum province the Serpukhovian isotope anomaly was identified in a number of reference sections and in the core of wells drilled in the Padimey area. The identification of this anomaly in wells Padimey 6 and 4 allowed to clarify its stratigraphic subdivision in the Upper Viséan-Lower Serpukhovian part of the succession and to determine the position of the base of the Serpukhovian stage.

Keywords: C-isotope anomaly, Serpukhovian Stage, Padimey area, Timan-Pechora petroleum province.

For citation: Zhuravlev A.V., Vevel Ya.A., Gruzdev D.A. Serpukhovskaya izotopnaya anomalija po neorganicheskomu ugljerodu - veroyatnye prichiny i perspektivy ispol'zovaniya v stratigrafii Timano-Pechorskoy neftegazonosnoj provintsii [The Serpukhovian isotope anomaly in inorganic carbon – possible causes and prospects for its application in the stratigraphy of the Timan-Pechora petroleum province]. *Neftegazovaya Geologiya. Teoriya i Praktika*, 2025, vol. 20, no. 1, available at: https://www.ngtp.ru/rub/2025/6_2025.html EDN: LZGD XD

References

Batt L.S., Montañez I.P., Isaacson P., Pope M.C., Butts S.H., Abplanalp J. Multi-carbonate component reconstruction of mid-Carboniferous (Chesterian) seawater $\delta^{13}\text{C}$. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, vol. 256, p. 298-318. DOI: [10.1016/j.palaeo.2007.02.049](https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.02.049)

Belyaev A.A., Semenov G.F. Foraminifery serpukhovskogo yarusa Timano-Pechorskoy provintsii [Genetic features of the Serpukhovian carbonate strata of the Pai-Khoi shale zone]. *Litologiya karbonatnykh porod severa Urala, Pay-Khoya i Timana*, 1988, Tr. IG KomiNTs URO AN SSSR, issue 67, pp. 51-61. (In Russ.).

Chen J., Montañez I.P., Qi Y., Wang X., Wang Q., Lin W. 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. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, vol. 448, pp. 162-178.

Danilov V.N. Perspektivy neftegazonosnosti verkhnedevonskikh otlozheniy severnoy chasti Kos'yu-Rogovskoy vpadiny [Prospects for oil and gas potential of the Upper Devonian strata of the northern part of the Kosyu-Rogov depression]. *Geologiya nefi i gaza*, 1992, no. 8, available at: <http://geolib.narod.ru/Journals/OilGasGeo/1992/08/Stat/01/stat01.html> (In Russ.).

Durkina A.V. *Foraminifery serpukhovskogo yarusa Timano-Pechorskoy provintsii* [Foraminifera of the Serpukhovian stage of the Timan-Pechora province]. St. Petersburg: Izd-vo Sankt-Peterburgskoy kartograficheskoy fabriki VSEGEI, 2002, 198 p. (In Russ.).

Fielding C.R., Frank T.D., Isbell J.L. The late Paleozoic ice age - A review of current

understanding and synthesis of global climate patterns. *Resolving the Late Paleozoic Ice Age in Time and Space: Geological Society of America Special Publ.*, 2008, vol. 441, pp. 343-354. DOI: [10.1130/2008.2441\(24\)](https://doi.org/10.1130/2008.2441(24))

Flügel E. *Microfacies of Carbonate Rocks. Analysis, Interpretation and Application*. Heidelberg-Dordrecht-London-New York: Springer, 2010, 984 p.

Galbraith E.D., Kienast M. The acceleration of oceanic denitrification during deglacial warming. *Nature Geoscience*, 2013, vol. 7, pp. 579-584. DOI: [10.1038/ngeo1832](https://doi.org/10.1038/ngeo1832)

Goddéris Y., Donnadiou Y., Carretier S., Aretz M., Dera G., Macouin M., Regard V. Onset and ending of the late Palaeozoic ice age triggered by tectonically paced rock weathering. *Nature Geoscience*, 2017, vol. 10, pp. 382-386. DOI: [10.1038/NGEO2931](https://doi.org/10.1038/NGEO2931)

Haq B.U., Schutter S.R. A chronology of Paleozoic sea-level changes. *Science*, 2008, vol. 3, no. 322, pp. 64-68.

Kostygova P.K. *Pechorskiy paleobasseyn v vizeyskom i serpukhovskom vekakh i foraminifery nizhnego vize* [Pechora paleobasin in the Visean and Serpukhovian ages and foraminifera of the Lower Visean]. St. Petersburg: Izd-vo Sankt-Peterburgskoy kartograficheskoy fabriki VSEGEI, 2004, 204 p. (In Russ.).

Liu C., Vachard D., Du Y., Munnecke A., Liang T. *Foraminiferal Zonation and Carbon Isotope Stratigraphy through the Viséan-Serpukhovian Boundary Interval - New Data from Three Inner-Platform Successions of South China*. Available at SSRN, 2022. DOI: [10.2139/ssrn.4063138](https://doi.org/10.2139/ssrn.4063138)

Makhlina M.Kh., Alekseev A.S., Goreva N.V., Isakova T.N. Ritmo- i biostratigrafiya karbona Moskovskoy sineklizy [Rhythmo- and biostratigraphy of the Carboniferous of the Moscow syncline]. *Izvestiya VUZov. Geologiya i razvedka*, 2001, no. 5, pp. 42-58. (In Russ.).

Pisarzowska A., Becker R.T., Aboussalam Z.S., Szczerba M., Sobień K., Kremer B., Owocki K., Racki G. Middlesex/punctata event in the Rhenish Basin (Padberg section, Sauerland, Germany) - Geochemical clues to the early-middle Frasnian perturbation of global carbon cycle. *Global and Planetary Change*, 2020, vol. 191, pp. 1-14.

Pisarzowska A., Racki G. Isotopic geochemistry across the Early-Middle Frasnian transition (Late Devonian) on the South Polish carbonate shelf: a reference for the global punctata Event. *Chem. Geol.*, 2012, no. 334, pp. 199-220.

Richards B.C. *Current status of the International Carboniferous Time Scale*. New Mexico Museum of Natural History and Science Bulletin, 2013, no. 60, pp. 348-353.

Ross C.A., Ross J.R.P. Late Paleozoic Sea Levels and Depositional Sequences. *Cushman Foundation for Foraminiferal Research, Special Publication 24*, 1987, pp. 137-149.

Valdez Buso V., Milana J.P., di Pasquo M., Paim P.S.G., Philipp R.P., Aquino C.D., Cagliari J., Chemale Junior F., Kneller B. Timing of the Late Palaeozoic glaciation in western Gondwana: New ages and correlations from Paganzo and Paran'a basins. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2020, vol. 544, 109624. DOI: [10.1016/j.palaeo.2020.109624](https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2020.109624)

Vevel Ya.A., Ivanova R.M., Gruzdev D.A., Zhuravlev A.V. Vodrosli pogranichnykh otlozheniy vizeyskogo i serpukhovskogo yarusov v razreze na r. Iz'yayu (yug podnyatiya Chernysheva) [Calcareous algae of the Visean-Serpukhovian boundary beds in the Izyayu River section (south of the Chernyshev Uplift)]. *Neftegazovaya Geologiya. Teoriya I Praktika*, 2023, vol. 18, no. 2, available at: http://www.ngtp.ru/rub/2023/24_2023.html (In Russ.). EDN: ZSZTYM

Yao L., Jiang G., Mii H.-S., Lin Y., Aretz M., Chen J., Qi Y., Lin W., Wang Q., Wang X. Global cooling initiated the Middle-Late Mississippian biodiversity crisis. *Global and Planetary Change*, 2022, vol. 215, 103852. DOI: [10.1016/j.gloplacha.2022.103852](https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103852)

Zhuravlev A.V. Chislennoe modelirovanie pervichnoy bioproduktivnosti pelagicheskikh ekosistem paleozoya [Numerical modeling of primary bioproductivity of pelagic ecosystems of the Paleozoic]. *Vestnik geonauk*, 2022, no. 8, pp. 37-42. (In Russ.). DOI: [10.19110/geov.2022.8.4](https://doi.org/10.19110/geov.2022.8.4)

Zhuravlev A.V. Mestnaya stratigraficheskaya skhema verkhnego devona - nizhnego karbona yugo-zapada Lyzhsko-Kyrtael'skogo vala (vostok Pechorskoy plity) [Stratigraphy of the Upper Devonian - Lower Carboniferous of south-west of Lyzha-Kyrtael swell (Pechora Plate eastward)]. *Neftegazovaya Geologiya. Teoriya I Praktika*, 2023, vol. 18, no. 1, available at:

http://www.ngtp.ru/rub/2023/8_2023.html (In Russ.). EDN: XNYUAF

Zhuravlev A.V., Gerasimova A.I. Stroenie razreza i konodonty karskoy svity (nizhniy karbon) Amderminskogo rayona severnogo Pay-Khoya [The structure of the section and conodonts of the Kara Formation (Lower Carboniferous) of the Amderma region of northern Pai-Khoi]. *Vestnik IG Komi NTs UrO RAN*, 2016, no. 1, pp. 3-10. (In Russ.). DOI: [10.19110/2221-1381-2016-1-3-10](https://doi.org/10.19110/2221-1381-2016-1-3-10)

Zhuravlev A.V., Vevel Ya.A., Gruzdev D.A., Erofeevsky A.V. Late Mississippian (early Serpukhovian) carbon isotope record of northern Laurussia: A proposal for the Viséan/Serpukhovian boundary. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 2023, vol. 40, no. 1, pp. 35-43. DOI: [10.22201/cgeo.20072902e.2023.1.1722](https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2023.1.1722)

Zhuravlev A.V., Vevel Ya.A. Biostratigrafiya verkhnego devona - nizhney permi Padimeyskoy ploshchadi (severo-vostok Timano-Pechorskoy neftegazonosnoy provintsii) po konodontam i foraminiferam [Biostratigraphy of conodonts and foraminifera of Upper Devonian - Lower Permian of the Padimey Area (north-east of Timan-Pechora petroleum Province) - new data]. *Neftegazovaya Geologiya. Teoriya I Praktika*, 2022, vol. 17, no. 2, available at: http://www.ngtp.ru/rub/2022/13_2022.html (In Russ.). DOI: [10.17353/2070-5379/13_2022](https://doi.org/10.17353/2070-5379/13_2022)