



УДК 551.83:551.734.5:552.54 (470.111+470.13)

DOI: 10.19110/geov.2023.11.4

Изотопный состав и условия образования фаменских карбонатолитов Центрально-Хорейверского вала (Хорейверская впадина, Печорская плита)

Н. А. Матвеева

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар
nakaneva@geo.komisc.ru

Актуальность работы определяется необходимостью уточнения условий образования верхнедевонских рифогенных пород, являющихся коллекторами углеводородов в Тимано-Печорской провинции. С этой целью было проанализировано распределение изотопного состава углерода и кислорода (определение осуществлялось на масс-спектрометре Delta V Advantage) фаменских карбонатных пород по фаціальным зонам в пределах Центрально-Хорейверского вала. Показано, что образование нижнефаменских известняков отмельной зоны происходило в мелководном морском бассейне в условиях испарительного режима аридного климата. Вариации значений $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ в нижнефаменских известняках зоны микробиальных холмов отражают увеличение биопродуктивности и колебание солёности вод. Изменение изотопного состава углерода в известняках фаціальной зоны, переходной к депрессионной впадине, характерной для всего разреза фамена, указывает на усиление испарительных процессов при аридизации климата от раннего к среднему фамену и опреснение вод при гумидизации в позднем фамене. Образование верхнефаменских карбонатолитов фаціальной зоны склона карбонатной банки в сторону мелководного шельфа в целом происходило в мелководном морском бассейне с нормальной солёностью, но с незначительным усилением испарительного режима при аридизации климата. Полученные результаты показывают, что фаменский бассейн седиментации характеризовался колебаниями уровня моря, фацій, гидрохимии вод и климата.

Ключевые слова: Хорейверская впадина, карбонатная банка, фамен, фації, парагенетические ассоциации, изотопный состав углерода и кислорода.

Isotopic composition and conditions of formation of Famennian carbonatolites of the Central-Khoreyver arch (Khoreyver Depression, Pechora Plate)

N. A. Matveeva

Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar, Russia

The article presents results of the distribution of the isotopic composition of ^{13}C and ^{18}O (119 samples) across four facies zones to substantiate the conditions of Famennian carbonation accumulation. The Lower Famennian carbonates of the *shoal zone* showed values of $\delta^{13}\text{C}$ ($1.5 \pm 0.15\%$), $\delta^{18}\text{O}$ ($25.01 \pm 0.29\%$) reflecting evaporative processes in a shallow basin in a warm and dry climate. For the rocks of the *microbial mounds zone*, the values of $\delta^{13}\text{C}$ ($2.47 \pm 1.12\%$) and $\delta^{18}\text{O}$ ($23.51 \pm 1.12\%$) reflect an increase in bio-productivity and some fluctuation in water salinity. In the limestones of the *zone of transition to depression*, the variations of isotopic composition are more distinct in the section. Thus, the Early Famennian is characterized by the average values of $\delta^{13}\text{C}$ ($0.94 \pm 0.59\%$) and $\delta^{18}\text{O}$ ($23.73 \pm 2.18\%$) for marine carbonates. The transition to the Middle Famennian is accompanied by isotopic weighting of ^{13}C ($1.30 \pm 0.47\%$) and ^{18}O ($24.52 \pm 1.45\%$), which shows an increase in evaporation processes under aridization conditions. In the Late Famennian, the isotopic composition abruptly lightens by ^{13}C ($-1.05 \pm 0.66\%$), which is associated with desalination under conditions of climate humidification. At the same time, the value of $\delta^{18}\text{O}$ ($25.75 \pm 0.31\%$) corresponds to the average values for carbonates of the Devonian. The values of $\delta^{13}\text{C}$ ($1.04 \pm 0.89\%$) and $\delta^{18}\text{O}$ ($26.01 \pm 0.99\%$) in the carbonates of the *zone slope of the carbonate bank towards the shallow shelf* reflect the conditions of the normal sea basin with a slight increase in the evaporation regime during climate aridization. The obtained results indicate that the Famennian sedimentation basin characterized by fluctuations in sea level, facies, water hydrochemistry and climate.

Keywords: Khoreyver Depression, carbonate bank, Famennian, facies zones, paragenetic association carbonate rocks, carbon isotope, oxygen isotope.

Для цитирования: Матвеева Н. А. Изотопный состав и условия образования фаменских карбонатолитов Центрально-Хорейверского вала (Хорейверская впадина, Печорская плита) // Вестник геонаук. 2023. 11(347). С. 37–47. DOI: 10.19110/geov.2023.11.4

For citation: Matveeva N. A. Isotopic composition and conditions of formation of Famennian carbonatolites of the Central-Khoreyver arch (Khoreyver Depression, Pechora Plate). Vestnik of Geosciences, 2023, 11(347), pp. 37–47, doi: 10.19110/geov.2023.11.4

Введение

Позднедевонская эпоха характеризовалась значительными изменениями в морском и наземном биоценозах. Так, на границе франа и фамена в результате биотического события Кельвассер в морском палеоценозе происходила смена кораллово-строматопоровых сообществ на микробные, причины которого широко обсуждались (Соорег, 2002). По данным Joachimski et al. (2009), этому способствовало потепление климата в конце франа в сочетании с кратковременными импульсами похолодания, подтвержденными колебаниями изотопного состава кислорода в апатите конодонтов. В это время средняя температура поверхности моря достигала 30–32 °С (Joachimski et al., 2004, 2009), а на континентах появились высшие растения (Algeo, Scheckler, 1998).

В настоящее время получены новые данные по изотопному составу углерода и кислорода в карбонатах, брахиоподах и конодонтах верхнедевонских

разрезов в Китае, Америке, Европе, на Урале, в Сибири (Joachimski, Buggisch, 1993; Joachimski et al., 2009; van Geldern et al., 2006; Изох и др., 2009; Chen et al., 2013; Мизенс и др., 2012). В то же время фаменские карбонатные породы Хорейверской впадины еще не изучались с позиции распределения изотопных характеристик по фациям. Этот пробел могут заполнить полученные нами новые данные по изотопному составу углерода и кислорода в фаменских карбонатах Центрально-Хорейверского вала, которые дают дополнительную информацию для уточнения условий осадконакопления.

Геологическая позиция объектов исследования

Район исследований расположен в пределах Хорейверской впадины (рис. 1), которая по поверхности карбонатных отложений нижней перми представ-

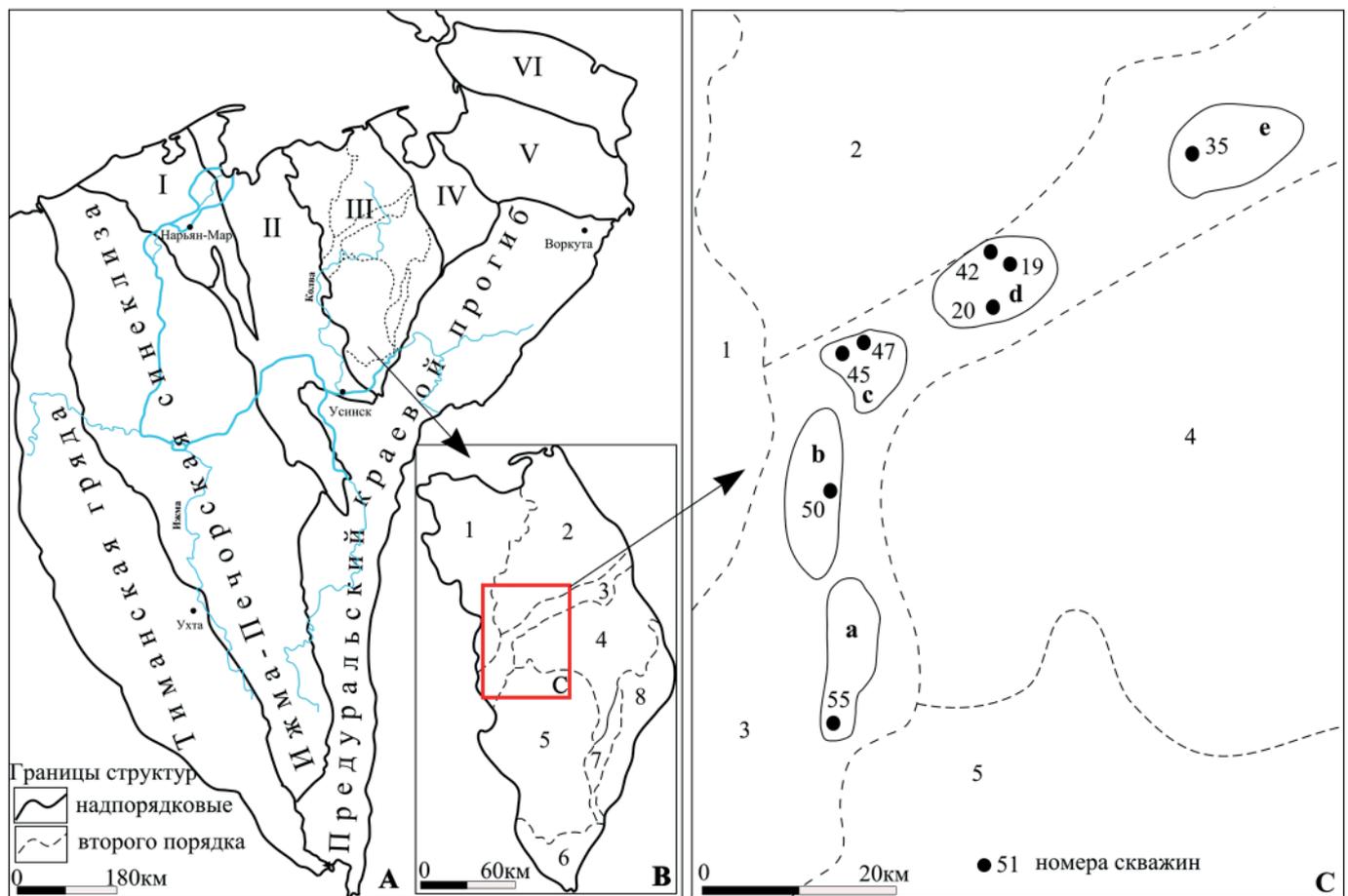


Рис. 1. Схема тектонического районирования Печорской плиты (А) и Хорейверской впадины (В, С) по: Прищепа и др., 2011). А: I — Малоземельско-Колгуевская моноклираль, II — Печоро-Колвинский авлакоген, III — Хорейверская впадина, IV — Варандей-Адзьвинская структурная зона, V — Коротаихинская впадина, VI — Пай-Хойско-Новоземельская складчатая система; В — тектоническое районирование Хорейверской впадины: 1 — Чернореченская ступень, 2 — Садагинская ступень, 3 — Центрально-Хорейверский вал (уступ); 4 — Колвависовская ступень, 5 — Сандивейское поднятие; 6 — Сынянырдская депрессия; 7 — Макариха-Салюкинская антиклинальная зона; 8 — Цильегорская депрессия; С — площади исследования в пределах Центрально-Хорейверского уступа: Дюсушевская (а), Восточно-Колвинская (б), Ардалинская (с), Ошкотынская (д) и Центрально-Хорейверская (е)

Fig. 1. Scheme of tectonic zoning of the Pechora plate (A) and the Khoreyver Depression (B, C) (after: (Prishchepa et al., 2011)): A: I — Malozemel-Kolguyev monocline, II — Pechora-Kolva aulakogen, III — Khoreyver Depression, IV — Varandey-Adzva structural zone, V — Korotaiha Depression, VI — Pai-Khoi-Novaya Zemlya fold system; B — tectonic zoning of the Khoreyver Depression: 1 — Chernorechen step, 2 — Sadayaga step, 3 — Central-Khoreyver arch; 4 — Kolvavis step, 5 — Sandivey uplift; 6 — Synyanird depression; 7 — Makarika-Salyuka anticlinal zone; 8 — Tsiliegor Depression; C — study areas within the Central-Khoreyver arch: Dyusushev (a), East Kolva (b), Ardalin (c), Oshkotyn (d) and Central-Khoreyver (e)



ляется в виде крупной пологой отрицательной структуры, окаймленной в основном по разломам резко выраженными положительными структурными формами — Колвинским мегавалом и Варандейским валом (Тимонин, 1998). Хорейверская впадина является наложенной отрицательной структурой и в современном структурном плане соответствует Большеземельскому своду фундамента (Структура..., 1982), ограниченному на западе Восточно-Колвинской, а на востоке Варандейской зонами разломов. Юго-восточная граница свода контролируется системой разрывных нарушений взбросового и взбросо-надвигового типов поднятия Чернышева (Белонин и др., 2004).

В пределах впадины выделяется ряд подчинённых тектонических элементов второго порядка: положительных — Сандивейское поднятие, Колвависовская и Садаггинская ступени, разделенные Центрально-Хорейверским валом; Макариха-Салюкинская антиклинальная зона; отрицательных — Сынянырдская, Цильегорская и Чернореченская депрессии (Прищеп и др., 2011). Изученные разрезы скважин в тектоническом плане располагаются в пределах Центрально-Хорейверского вала, имеющего северо-восточное простирание ~ 130 км и ширину 2–18 км (Белонин и др., 2004).

Материал и методы исследований

Материалом для исследования послужили образцы керн из разрезов фаменских отложений восьми скважин на Дюсушевской, Восточно-Колвинской, Ардалинской, Ошкотынской и Центрально-Хорейверской площадях. На изотопный состав углерода и кислорода было проанализировано более 100 проб карбонатолитов. В соответствии с мировой практикой (Joachimski et al., 2009; van Geldern et al., 2006; Изох и др., 2009 и др.), при изучении изотопного состава углерода и кислорода были использованы кальцит и биоапатит раковин брахиопод и конодонтов, а также микритовая часть карбонатолитов. В статье приводятся результаты анализа карбонатных пород, в образцах которых высверливался материал на наименее измененных участках. Определение изотопного состава осуществлялось на масс-спектрометре Delta V Advantage (аналитик И. В. Смолева). Значения $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ даны в ‰ относительно стандартов соответственно VPDB и SMOW. Ошибка определения $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ не превышает ± 0.1 ‰ (1σ). Анализы проводились в ЦКП «Геонаука» ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН.

Краткая литологическая характеристика фаменских карбонатолитов

Выделенные ранее литотипы известняков были объединены в четыре парагенетические ассоциации (ПА), отвечающие разным палеоландшафтам и отражающие фаціальную зональность: склон отмели на карбонатной банке в сторону мелководного шельфа; отмель; микробактериальные холмы на склоне отмели; склон карбонатной банки к депрессионной впадине (Матвеева, 2017). Однако имеющийся каменный материал позволил охарактеризовать изотопными данными только эти четыре парагенетические ассоциации (фаціальные зоны), описание которых приведено ниже.

Парагенетическая ассоциация биолитокластовых известняков (ПА-1) представлена неравномерно чередующимися полибиокластовыми, биолитокластовыми с онколитами и биолитокластово-комковатыми известняками. Плохая окатанность и несортированность структурных компонентов свидетельствуют о близком источнике сноса с отмели по склону в сторону мелководного шельфа в условиях спокойной гидродинамики, на что указывает присутствие наряду с биолитокластовым материалом пелитоморфного кальцита.

Парагенетическая ассоциация комковатых, биолитокластовых и онколитовых известняков (ПА-2). В нижней и верхней частях литологических разрезов рассматриваемая ассоциация сложена известняками ступково-комковатыми, комковатыми с окатанными и гранулированными обломками органических остатков. В средней части разрезов наблюдаются онколитовые известняки, иногда с трещинами усыхания. Такие особенности типичны для отмельных обстановок с периодическим выведением в зону заплесков. На активную или умеренно-высокую гидродинамику вблизи базиса волн указывают чистый спаритовый цемент и окатанность биокластового материала.

Парагенетическая ассоциация микробактериальных биогермных и строматолитовых известняков (ПА-3). В нижней части разрезов этот парагенез представлен биогермными и строматолитовыми известняками, образованными скоплениями цианобионтов/кальцимикробов. Верхнюю часть слагают биогермные и микробактериальные разности с биолитокластовой и комковатой структурами. Преобладание среди биогермостроителей цианобактерий, отсутствие слоистости и привносимый с более возвышенных областей литоблокловый материал, служивший в качестве заполнителя между микробактериальными микробиогермами, являются диагностическими признаками органогенных построек, расположенных на восточном склоне отмели в сторону депрессионной впадины. Отсутствие обломочного материала непосредственно на упомянутом склоне свидетельствует о слабой гидродинамике, в условиях которой разрушение органогенных построек не происходило.

Парагенетическая ассоциация биолитокластовых и пелитоморфных известняков (ПА-4). Преобладают пелитоморфные известняки с неравномерным чередованием известняков комковато-пелитоморфных, комковато-биолитокластовых с хемогенным кальцитом и пелитоморфных разностей с микробактериальными образованиями. Такие генетические особенности, как пелитоморфная основная масса, слоистость, обусловленная субпараллельным распределением биокластов, прожилками с глинистым материалом, тонкоскелетный органогенный материал, ходы илоедов и терригенная примесь, указывают на то, что образование ПА-4 происходило при выносе осадочного материала на участки со спокойным гидродинамическим режимом, что способствовало накоплению илового материала.

Рельеф палеобассейна в центральной части Хорейверской впадины в позднефранско-фаменское время представлял собой слабонаклоненный терригенно-карбонатный шельф (с запада на восток): мелководный шельф, поднятия (карбонатные банки) и депрессионная впадина (глубоководная шельфовая де-

прессия). В позднем фране происходит уменьшение размера глубоководного шельфа и отхождение ее границ на восток. Позднее это особенно заметно в фамене, когда уменьшение депрессии происходило и во время трансгрессивных фаз, так как не образовались барьерные рифы, вместо них накапливались карбонатные клиноформы (Menner, Shuvalova, 2000).

Распределение ПА фаменских пород по изученным разрезам и площадям указывает на существование разных обстановок осадконакопления в пределах карбонатных банок на территории Центрально-Хорейверского вала, обрамленных (в современных координатах) с северо-западной стороны мелководным шельфом, а с юго-восточной стороны — депрессионной впадиной (рис. 2) (Матвеева, 2017). Было установлено, что франско-фаменская регрессия (Кушнарера, 1977) способствовала широкому распространению в раннем фамене отмельных фаций с переходными склоновыми фациальными зонами и фаций с микробиальными холмами на склоне отмели. В среднем фамене в связи с обширной трансгрессией Тимано-Печорского бассейна (Беляева и др., 1998) на большей части территории преобладали обстановки шельфа с более высоким положением уровня моря, за исключением мелководных областей с повышенной гидродинамикой. В позднефаменское время для данной территории вновь были характерны обстановки мелководного шельфа в условиях карбонатной банки с обособлени-

ем участков более мелководных, с подвижной гидродинамикой и склоновых, с микробиальными холмами на юге (Матвеева, 2017).

Изотопный состав С и О в фаменских известняках

Известно, что фанерозойские карбонатные породы морского происхождения характеризуются узкими вариациями значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ в пределах -2 (-3) ... 2 (3) ‰ (Галимов, 1968; Фор, 1989; Кулешов, 2001) и широким колебанием значений $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ — от 20 до 30 ‰ (Фор, 1989). Указывалось также (Keith, Weber, 1964), что значения $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ морских пород уменьшаются с увеличением геологического возраста и, например, для девонских пород могут составлять в среднем 21–25 ‰, а для позднепротерозойских — 12–16 ‰. Изотопный состав кислорода контролируется рядом факторов, из которых наиболее важными являются соленость (прямая корреляция), температура и изотопный состав среды, в которой происходило карбонатобразование (Кулешов, Седаева, 2009; Силаев, Хазов, 2003; van Geldern et al., 2006; Jaffres et al., 2007; Kasting et al., 2006). Облегченным изотопным составом углерода и кислорода характеризуются карбонатолиты морских бассейнов с низкой соленостью. Связано это с поступлением в бассейн седиментации изотопно-легких пресных вод и наличием углекислоты биоген-

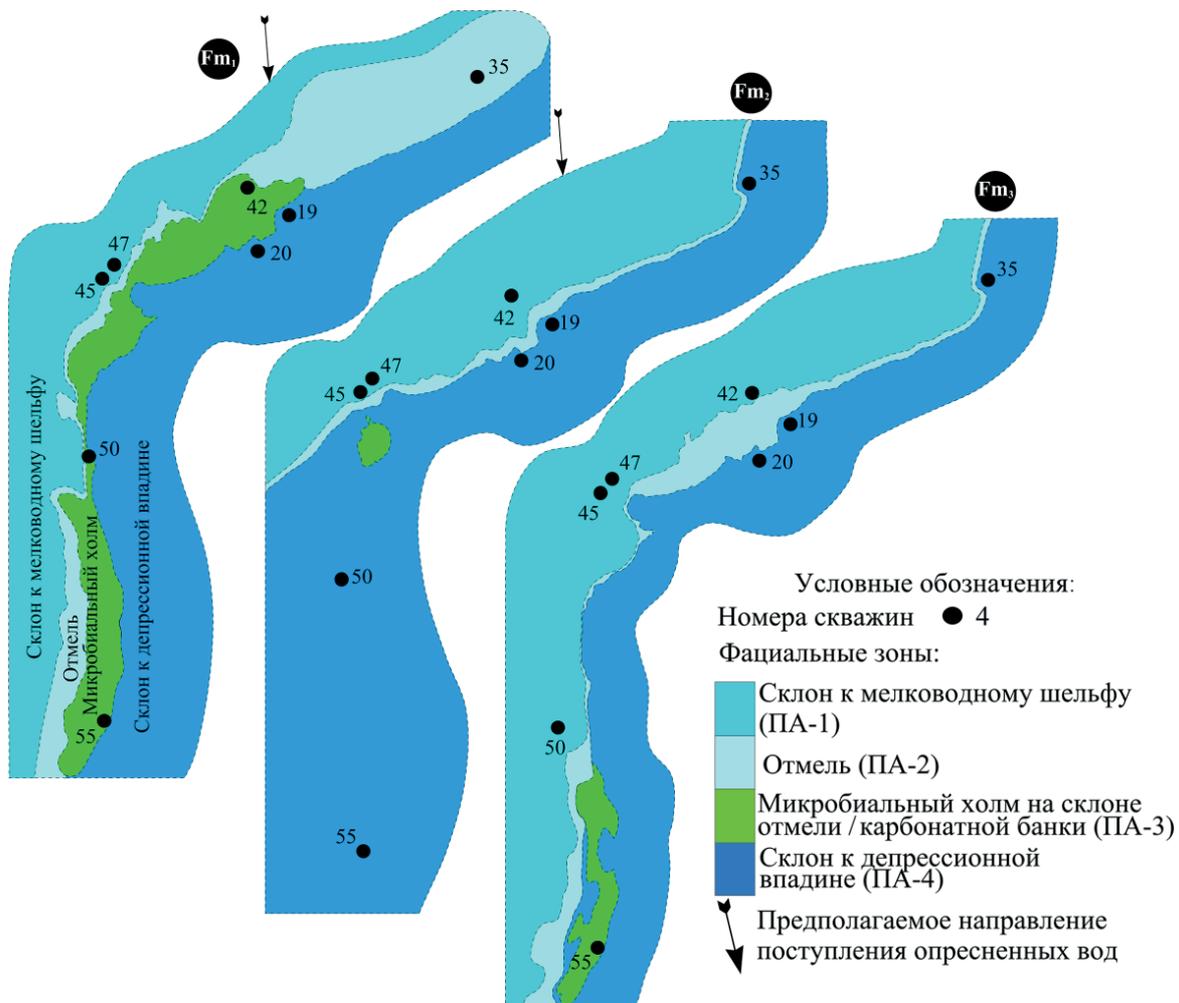


Рис. 2. Эволюция обстановок осадконакопления в фаменское время. Площади исследования указаны на рис. 1

Fig. 2. Evolution of sedimentary environments during the Famennian time. The study areas are shown in Fig. 1



ного происхождения (Галимов, 1968; Дегенс, 1971; Фор, 1989; Кулешов, 2001).

Полученные результаты изотопного анализа приведены в таблице и показаны на графиках (рис. 3).

Нижний фамен

Отмель (ПА-2). Изотопный состав карбонатного углерода в породах колеблется в пределах 1.2–1.7 ‰ (1.5 ± 0.15 ‰); карбонатного кислорода — в диапазоне 24.5–25.4 ‰ (25.01 ± 0.29 ‰). При этом выявляется очень сильная положительная корреляция изотопного состава кислорода и углерода ($r = 0.54$), свидетельствующая о согласованном в них изотопном утяжелении обоих элементов и сходстве условий их формирования (мелководье, теплый климат). Величины $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$

сдвинуты на фланг утяжеленных значений, что может свидетельствовать о влиянии испарительного фактора (Силаев, Хазов, 2003). По другим отделам фамена данных для ПА-2 нет.

Микробильные холмы (ПА-3). По величинам $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ и $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ выделяются две группы данных. В первую группу объединяются карбонатолиты с более тяжелым изотопным составом углерода (2.2–3.5 ‰) и кислорода (23.0–24.2 ‰). При этом обр. ВК 50/24 (пелитоморфный известняк) выбивается из этого кластера и имеет значения: $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} = 0.7$ ‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} = 26$ ‰ (табл. 1). Вторую группу образуют более изотопно-легкие значения как по углероду (0.6–1.1 ‰), так и кислороду (20.8–23.1 ‰). Статистические данные образуют широкое поле со средними значениями: $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} = (2.47 \pm 1.12)$ ‰; $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} = (23.51 \pm 1.12)$ ‰. Между углеродом и кислородом выявляется прямая, но более слабая корреляционная связь ($r = 0.27$). По другим отделам фамена данных по ПА-3 нет.

Одной из возможных причин изотопного утяжеления здесь карбонатного углерода может быть увеличение биопродуктивности водоема. В таких условиях на образование органического вещества расходуется легкий изотоп ^{12}C растворенного бикарбоната, а остающийся в растворе бикарбонат постепенно обогащается тяжелым изотопом ^{13}C , который переходит в осаждаемые карбонаты (Botz et al., 1988). Также причиной утяжеления изотопного состава углерода может быть образование карбонатов в прибрежной зоне с аридными и семиаридными условиями (Perryt, Magaritz, 1990), что может приводить к эвапоритизации и увеличению солености вод в бассейне. Облегчение изотопного состава кислорода может отражать опреснение водоема в результате привноса атмосферных вод и повышения температуры поверхностных вод (Кулешов, 2001). Опреснение вод подтверждается присутствием в нижнефаменных известняках остатков харовых и зеленых вольвоксовых водорослей (Матвеева, 2017). Как известно, современные харовиты растут в мелководных пресных водоемах и опресненных участках морей (Водоросли..., 1989). По данным J. Kaźmierczak (1975), наличие водорослей *Volvocales* также указывает на опреснение воды в палеобассейне. Пресные воды, возможно, поступали из размываемой области юга Садаягинской ступени, расположенной севернее Ошкотынской площади (Матвеева, 2017).

Склон к депрессионной впадине (ПА-4). Карбонатные образования подразделяются на два кластера — с относительно низкими (19.0–21.1 ‰) и более высокими (23.5–25.75 ‰) значениями изотопного состава по кислороду (табл. 1). Статистические оценки значений изотопных данных определяются как $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} = (0.94 \pm 0.59)$ ‰ и $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} = (23.73 \pm 2.18)$ ‰. Между значениями $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ и $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ обнаруживается сильная отрицательная корреляция ($r = -0.62$), свидетельствующая о противоположных тенденциях изменения изотопного состава углерода и кислорода.

Средний фамен

Выявлена только ПА-4 (склон от отмели к депрессии). Она охарактеризована следующими значениями (‰): $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} = 1.30 \pm 0.47$; $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} = 24.52 \pm 1.45$. Выявлена слабая отрицательная корреляция между значениями $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ и $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ ($r = -0.28$).

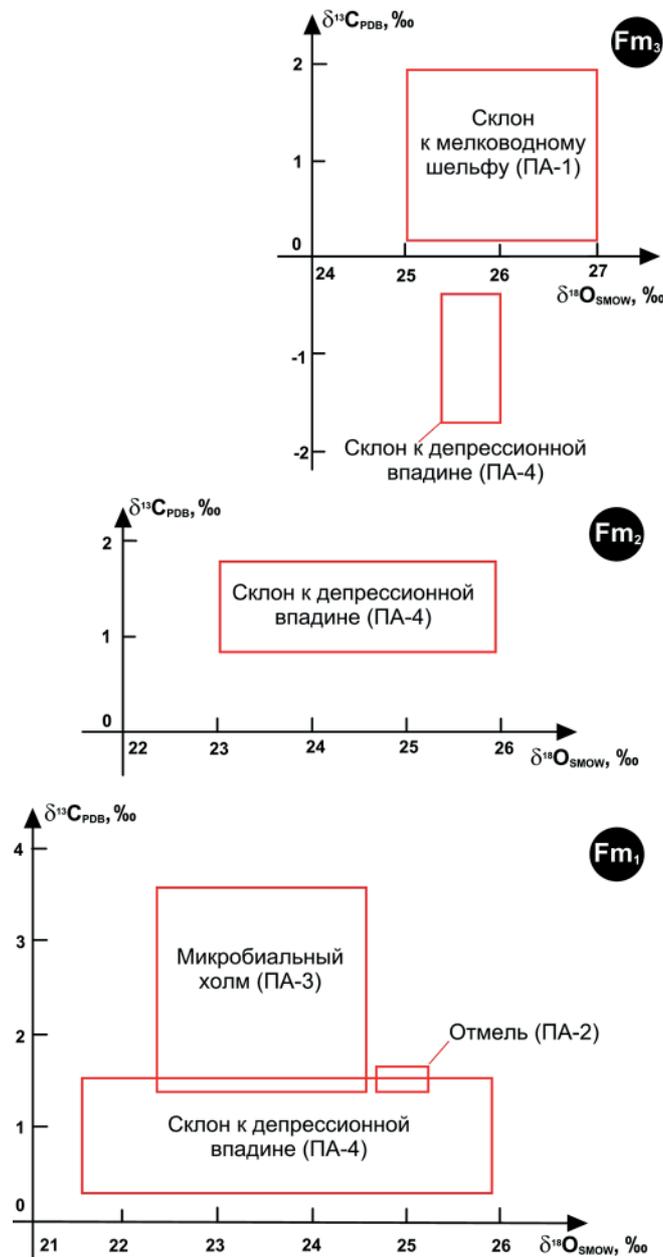


Рис. 3. Статистические поля изотопного состава углерода ($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$) и кислорода ($\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$) в фаменских карбонатах по фациальным зонам в пределах Центрально-Хорейверского вала

Fig. 3. Static fields of the isotopic composition of carbon ($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$) and oxygen ($\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$) in Famennian carbonates by facies zones within the Central Khoreyver Arch

Таблица 1. Изотопный состав углерода и кислорода в фаменских карбонатах

Table 1. Isotope content of carbon and oxygen in Famennian carbonates

Подъярус Substage	Палеоландшафтная позиция Paleolandscape position	Парагенетическая ассоциация (ПА) Paragenetic association (PA)	Основные литотипы известняков Main lithotypes of limestones	Номер образца Sample number	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ ‰	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ ‰
нижний фамен Lower Famennian	отмель shoal	ПА-2 комковатых, биолитокластовых и онколитовых известняков РА-2 lumpy, biolithoclastic and oncolite limestones	онколитовые, комковатые с биокластами, комковато- биолитокластовые с перекристаллизованным кальцитом, комковато- биолитокластовые со спаритовым цементом, сгустково-комковатые oncolytic, lumpy with bioclasts, lumpy-biolithoclastic with recrystallized calcite, lumpy- biolithoclastic with sparite cement, clotty-lumpy	ЦХВ 35/10 ЦХВ 35/11 ЦХВ 35/12 ЦХВ 35/13 ЦХВ 35/14 ЦХВ 35/15 ЦХВ 35/16 ЦХВ 35/17	1.2 1.5 1.6 1.7 1.5 1.6 1.4 1.5 $x = 1.5$ $S_x = 0.15$	24.8 24.5 25.3 25.4 25.1 24.9 24.9 25.2 $x = 25.01$ $S_x = 0.29$ $r = 0.54$
	микробные холмы microbial mounds	ПА-3 микробных биогермных и строматолитовых известняков РА-3 microbial biohermic and stromatolitic limestones	биогермные, микробные, биогермные с биоинтракластовой структурой, биогермные с комковатой структурой, интракластово- микробные, микробные строматолитовые bioherm microbial, bioherm with biointraclast structure, bioherm with a lumpy structure, intraclastic-microbial, microbial, stromatolitic	ВК 50/13 ВК 50/14 ВК 50/15 ВК 50/16 ВК 50/17 ВК 50/18 ВК 50/19 ВК 50/20 ВК 50/21 ВК 50/22 ВК 50/23 ВК 50/24 ОШ 42/1 ОШ 42/2 ОШ 42/3	2.2 3.5 3.3 3.1 3.5 3.2 3.4 2.6 3.2 3.1 2.9 0.7 1.1 0.6 0.7 $x = 2.47$ $S_x = 1.12$	23.8 23.7 23.7 23.0 23.6 24.2 23.9 23.3 23.9 23.9 23.8 26.0 22.0 23.1 20.8 $x = 23.51$ $S_x = 1.12$ $r = 0.27$
	переходные к депрессии transitional to depression	ПА-4 биолитокластовых и пелитоморфных известняков РА-4 biolithoclastic and pelitomorphic limestones	пелитоморфные, комковато- биолитокластовые с перекристаллизованным пелитоморфным кальцитом, пелитоморфные с микробными образованиями, комковато- пелитоморфные pelitomorphic, lumpy- biolithoclast with recrystallized pelitomorphic calcite, pelitomorphic with microbial formations, lumpy-pelitomorphic	ОШ 20/1 ОШ 20/2a ОШ 20/26 ОШ 20/4 ОШ 20/5 ОШ 20/6 ОШ 20/7a ОШ 20/8 ОШ 20/9 ОШ 20/10 ОШ 20/11 ОШ 20/12 ОШ 20/13 ОШ 20/14 ОШ 20/15 ОШ 20/16 ОШ 20/17 ОШ 20/19 ОШ 20/20 ОШ 20/21 ОШ 20/22 ОШ 20/23 ОШ 20/24 ОШ 20/25 ОШ 20/28	0.8 1.0 -0.1 -0.2 1.6 0.7 0.6 1.5 0.4 0.3 0.3 1.7 1.6 2.0 1.6 1.9 0.9 0.8 0.8 0.8 0.8 0.8 0.8 0.7 1.0 1.3 $x = 0.94$ $S_x = 0.59$	23.7 28.2 25.7 24.6 25.3 24.2 25.1 25.2 23.6 24.5 24.8 21.1 20.6 19.9 19.0 19.1 24.6 25.0 24.9 24.9 24.6 23.7 23.7 23.7 23.5 $x = 23.73$ $S_x = 2.18$ $r = -0.62$

Примечание. Статистические показатели: x — среднее, S_x — стандартное отклонение, r — коэффициент парной корреляции.

Note. Statistical indicators: x — average, S_x — standard deviation, r — pair correlation coefficient.



Продолжение таблицы 1 / Continuation of table 1

Подъярус Substage	Палеоландшафтная позиция Paleolandscape position	Парагенетическая ассоциация (ПА) Paragenetic association (PA)	Основные литотипы известняков Main lithotypes of limestones	Номер образца Sample number	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ ‰	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ ‰
средний фамен Middle Famennian	переходные к депрессии transitional to depression	ПА-4 биолитокластовых и пелитоморфных известняков РА-4 biolithoclast and pelitomorphic limestones	пелитоморфные, комковато- биолитокластовые с перекристаллизованным пелитоморфным кальцитом, пелитоморфные с микробными образованиями, комковато- пелитоморфные pelitomorphic, lumpy- biolithoclastic with recrystallized pelitomorphic calcite, pelitomorphic with microbial formations, lumpy-pelitomorphic	ЦХВ 35/5	1.2	25.2
				ЦХВ 35/6	0.6	25.1
				ЦХВ 35/8	0.2	25.5
				ЦХВ 35/9	1.0	25.0
				ВК 50/3	1.4	25.6
				ВК 50/4	1.4	25.6
				ВК 50/5	2.2	27.1
				ВК 50/6	1.6	25.1
				ВК 50/7	1.1	24.1
				ВК 50/8	1.1	24.0
				ВК 50/9	1.6	24.5
				ВК 50/10	1.3	24.6
				ВК 50/11	1.5	24.4
				ВК 50/12	1.6	24.0
				Дюс 55/1	1.1	25.2
				Дюс 55/2	0.8	24.3
				Дюс 55/3	0.9	24.3
				Дюс 55/4	1.2	25.3
				Дюс 55/5	1.4	25.6
				Дюс 55/6	0.9	24.8
				Дюс 55/7	0.6	26.8
				Дюс 55/8	0.3	25.8
				Дюс 55/9	0.2	25.8
				Дюс 55/10	1.0	27.8
				Дюс 55/11	0.3	26.3
				Дюс 55/12	1.0	27.4
				Дюс 55/13	1.9	25.5
				Дюс 55/14	2.2	25.5
				Дюс 55/15	1.0	26.0
				Дюс 55/16	2.2	25.7
				Дюс 55/17	1.4	25.3
				ОШ 19/1	1.8	24.3
				ОШ 19/2	1.7	24.3
				ОШ 19/3	1.6	24.3
				ОШ 19/4	1.8	24.5
				ОШ 19/5	1.7	21.9
				ОШ 19/6	1.7	22.7
				ОШ 19/7	1.6	22.6
				ОШ 19/8	1.4	24.0
				ОШ 19/9	1.5	23.3
ОШ 19/10	1.6	22.5				
ОШ 19/11	1.3	22.9				
ОШ 19/12	1.3	23.1				
ОШ 19/13	1.4	22.8				
ОШ 19/15	1.4	23.2				
ОШ 19/16	1.3	22.8				
ОШ 19/17	1.4	21.6				
ОШ 19/18	1.4	22.3				
ОШ 19/19	1.4	22.5				
ОШ 19/20	1.3	23.1				
	$x = 1.3$	$x = 24.52$				
	$S_x = 0.47$	$S_x = 1.45$				
	$r = -0.28$					

Верхний фамен

Склон к депрессионной впадине (ПА-4). Характеризуется следующими статистическими изотопными данными (‰): $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} = -1.05 \pm 0.66$; $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} = 25.75 \pm 0.31$. Отмечается умеренная прямая корреляция между значениями $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ и $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ ($r = 0.37$).

Склон к мелководному шельфу (ПА-1). Определены две группы контрастно различающихся изотопных данных $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ и $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ (‰): 1) $-0.02 \dots 1$ и $26.5-27.2$; 2) $0.7-2.8$ и $24.4-27.4$ соответственно. Статистические изотопные данные по всему множеству точек составля-

ют: $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} = (1.04 \pm 0.89)$ ‰; $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} = (26.01 \pm 0.99)$ ‰. Обнаружена слабая отрицательная корреляционная связь ($r = -0.35$) изотопного состава углерода и кислорода. Таким образом, величины $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ здесь сдвинуты на фланг утяжеленных значений, что может свидетельствовать о влиянии испарительного фактора (Силаев, Хазов, 2003). По другим отделам фамена данных по ПА-1 нет.

Как показали исследования, хронологически сквозной для фамена на рассматриваемой территории является только одна фаация, а именно отложения био-

Окончание таблицы 1 / End of table 1

Подъярус Substage	Палеоландшафтная позиция Paleolandscape position	Парагенетическая ассоциация (ПА) Paragenetic association (PA)	Основные литотипы известняков Main lithotypes of limestones	Номер образца Sample number	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ ‰	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ ‰
верхний фамен Upper Famennian	склон карбонатной банки в сторону мелководного шельфа slope of the carbonate bank towards the shallow shelf	ПА-1 биолитокластовых известняков PA-1 biolithoclastic limestones	полибиокластовые, биолитокластовые с онколитами, комковатые с биолитокластами polybioclastic, biolithoclastic with oncolites, lumpy with biolithoclasts	Ард 45/20 Ард 45/21 Ард 45/22 Ард 45/23 Ард 45/24 Ард 45/25 Ард 45/26 Ард 45/27 Ард 45/28 Ард 47/6 Ард 47/7 Ард 47/8 Ард 47/9 Ард 47/10 Ард 47/11 Ард 47/12 Ард 47/13	1.3 0.7 1.9 2.8 2.4 1.6 1.4 1.5 2.1 0.2 -0.02 0.2 0.4 0.3 0.4 0.3 0.2	25.0 24.8 25.3 27.4 25.8 24.9 24.4 24.7 25.8 26.6 26.6 26.8 26.9 26.5 27.2 27.0 26.5
	переходные к депрессии transitional to depression	ПА-4 биолитокластовых и пелитоморфных известняков PA-4 biolithoclastic and pelitomorphitic limestones	пелитоморфные, комковато- биолитокластовые с перекристаллизованным пелитоморфным кальцитом, пелитоморфные с микробными образованиями, комковато- пелитоморфные pelitomorphitic, lumpy- biolithoclastic with recrystallized pelitomorphitic calcite, pelitomorphitic with microbial formations, lumpy-pelitomorphitic	ЦХВ 35/1 ЦХВ 35/2 ЦХВ 35/3 ЦХВ 35/4	-0.6 -0.6 -2.0 -1.0	25.5 26.2 25.6 25.7
					$x = 1.04$ $S_x = 0.89$	$x = 26.01$ $S_x = 0.99$ $r = -0.35$
					$x = -1.05$ $S_x = 0.66$	$x = 25.75$ $S_x = 0.31$ $r = 0.37$

литокластовых и пелитоморфных известняков на склоне карбонатной банки в сторону депрессионной впадины (ПА-4). В последовательности от раннего к позднему фамену выявляется волнообразное изменение изотопного состава углерода от средних значений для морских карбонатов (0.94 ± 0.59) ‰ к более тяжелым (1.30 ± 0.47) ‰, а затем происходит скачок к более легким значениям (-1.05 ± 0.66) ‰. Утяжеление значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ к среднему фамену может отражать усиление воздействия испарительных процессов в условиях теплого сухого климата. Последующему облегчению значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ в позднем фамене есть несколько причин. По одной из них, легким изотопом ^{12}C обогащаются карбонаты пресноводных бассейнов вследствие привноса в них пресных вод с растворенной в них изотопно-легкой по углероду углекислотой (Кулешов, 2001; Силаев, Хазов, 2003). Другой причиной, повлиявшей на понижение значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$, может быть похолодание климата при увеличении атмосферного давления и росте притока атмосферных вод. Последнее было подтверждено данными по изотопному составу кислорода в биоапатите конодонтов, указавшими на понижение температуры воды к концу фамена в среднем до $26\text{ }^\circ\text{C}$ (Joachimski et al., 2004; 2009). При этом изотопный состав кислорода в исследуемых нами фаменских карбонатных породах испытывает лишь небольшие колебания, отвечая в целом нормаль-

ной солёности морской воды. Корреляция между значениями $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ и $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ по всему разрезу фамена изменяется от отрицательной в интервале нижне-среднего фамена ($-0.62 \dots -0.35$) до положительной в интервале позднего фамена (0.37), что свидетельствует о разнонаправленных изменениях изотопии углерода и кислорода.

Обсуждение и выводы

Согласно палеогеографическим реконструкциям позднедевонский бассейн на северо-востоке Европейской платформы располагался в приэкваториальных областях и характеризовался гумидным климатом (Беляева и др., 1998). Территория современного Центрально-Хорейверского вала в позднедевонское время представляла собой цепочку карбонатных банок, вытянутых в северо-восточном направлении. Особенности девонской седиментации во многом зависели от того, что рассматриваемый район располагался в пределах Большеземельского палеосвода, куда поступало сравнительно мало терригенного материала. Это обусловило небольшую глубину некомпенсированной впадины, образовавшейся здесь в доманиковое время, и значительную расчлененность ее акватории вследствие обилия отмелей. Невысокий темп привноса терригенного материала обеспечивал чисто



карбонатный состав осадков на банках, возможность развития органогенных построек, медленное заполнение впадин между банками, что содействовало более длительному существованию последних (Меннер и др., 1991, с. 61).

Полученные литологические и изотопно-геохимические данные позволяют детализировать картину образования фациальных зон.

В *отмельной* зоне карбонатной банки формировались окатанные породообразующие компоненты (онколиты, биокласты, литокласты, комки) в условиях активной гидродинамики, что способствовало выносу пелитоморфного материала. Изотопный состав $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ (1.2–1.7 ‰) и $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ (24.5–25.4 ‰) характеризуется здесь однообразностью и отражает испарительные процессы в мелководно-морских условиях с теплым и сухим климатом.

Микробальные холмы формировались в раннем фамене в спокойноводных обстановках ниже базиса действия волн, вследствие чего здесь не накапливался обломочный материал, характерный для рифовых комплексов Урала (Антошкина, 2003). В каркасе микробальных холмов распознаются биогермные структуры, сформированные цианобактериями и кальцимикробами. Они могли замещаться карбонатами и укреплять органогенные постройки. Изотопный состав углерода и кислорода колеблется соответственно от 0.6 до 3.5 ‰ и от 20.8 до 24.2 ‰. Между значениями $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ и $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ в этих породах имеется слабая положительная корреляционная связь. Вариации изотопного состава углерода и кислорода могут отражать увеличение биопродуктивности водоема и изменение солености вод от осолоненных до опресненных в мелководном бассейне раннего фамена. Согласно изотопным данным, полученным по биоапатиту в конодонтах, на франско-фаменский период приходится интервал с теплым и очень теплым климатом с кратковременными периодами похолодания и средней температурой поверхностной воды 30–32 °C (Joachimski et al., 2009).

В обстановке *склона карбонатной банки в сторону депрессионной впадины* осадки накапливались у подножия карбонатной банки и на её склоне при понижениях уровня моря. Седиментация в этих условиях происходила при поступлении с мелководных участков банок тонкого биокластового материала, который сильно разрушался в процессе переноса. Осадконакопление осуществлялось в спокойной гидродинамической обстановке, что способствовало накоплению пелитоморфного материала. В хронологической последовательности от раннего к позднему фамену в породах рассматриваемой обстановки происходило волнообразное изменение изотопного состава углерода и кислорода. В раннем фамене карбонатолиты образовывались со средними значениями углерода и кислорода: $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} = (0.94 \pm 0.59) \text{ ‰}$ и $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} = (23.73 \pm 2.18) \text{ ‰}$, что соответствует морским карбонатам. Переход к среднему фамену сопровождался изотопным утяжелением как углерода ($1.30 \pm 0.47 \text{ ‰}$), так и кислорода ($24.52 \pm 1.45 \text{ ‰}$). В позднем фамене изотопный состав резко облегчается по углероду ($-1.05 \pm 0.66 \text{ ‰}$), а по кислороду соответствует средним морским показателям для девонского периода ($25.75 \pm 0.31 \text{ ‰}$). Следовательно, выявленное волнообразное изменение изотопного состава углерода отражает, вероятно, усиление испари-

тельных процессов от раннего к среднему фамену в условиях аридного климата и опреснение с понижением температуры вод к позднему фамену. Последнее может быть связано с гумидизацией климата.

На *склоне карбонатной банки к мелководному шельфу* осадки накапливались в довольно спокойной гидродинамической обстановке, что позволяло осажаться и литифицироваться пелитоморфному карбонатному илу. Их формирование происходило на достаточно выровненном, полого наклоненном склоне к мелководному шельфу, куда и попадал био- и литокластовый материал с отмели. Изотопный состав углерода и кислорода в карбонатах показал, что здесь он характеризуется существенным варьированием величин в пределах соответственно $-0.02 \dots 2.4$ и $24.4 \dots 27.2 \text{ ‰}$. Это отражает существование в позднем фамене мелководно-морских условий с нормальной соленостью морских вод, но с некоторым усилением испарительного режима при аридизации климата.

Из приведенных выше результатов изотопного анализа можно сделать вывод, что в рассмотренных фациальных зонах значения $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ не демонстрируют значительных вариаций, сохраняясь в пределах колебаний данных для нормально-морских бассейнов. Значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$, напротив, даже в пределах одной фациальной зоны могут существенно меняться, что, скорее всего, объясняется изменением палеоэкологических условий во времени.

Автор благодарит рецензентов за полезные рекомендации и замечания при подготовке статьи к печати.

Исследования проводились в рамках государственного задания ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (ГР № 122040 600013-9).

Литература / References

- Антошкина А. И. Рифообразование в палеозое (на примере севера Урала и сопредельных территорий). Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 303 с.
- Antoshkina A. I. Reef formation in the Paleozoic (Northern Urals and adjacent areas). Yekaterinburg, UB RAS, 2003, 304 p. (in Russian)
- Белонин М. Д., Прищепина О. М., Теплов Е. Л. Тимано-Печорская провинция: геологическое строение, нефтегазоносность и перспективы освоения. СПб.: Недра, 2004. 396 с.
- Belonin M. D., Prishchepina O. M., Teplov E. L. Timan-Pechora province: geological structure, oil and gas potential and development prospects. St. Petersburg: Nedra, 2004, 396 p. (in Russian)
- Беляева Н. В., Корзун А. Л., Петрова Л. В. Модель седиментации франско-турнейских отложений на северо-востоке Европейской платформы. СПб.: Наука, 1998. 154 с.
- Belyaeva N. V., Korzun A. L., Petrova L. V. Model of sedimentation of fransian-tournaishian deposits in the northeast of the European Platform. St. Petersburg: Nauka, 1998, 154 p. (in Russian)
- Водоросли: Справочник / С. П. Вассер, Н. В. Кондратьева, Н. П. Масюк и др. Киев: Наук. думка, 1989. 608 с.
- Algae. Reference book / Vasser S. P., Kondrat'yeva N. V., Masyuk N. P. et al. Kiyev: Nauk. Dumka, 1989, 608 p. (in Russian)
- Галимов Э. М. Геохимия стабильных изотопов углерода. М.: Недра, 1968. 226 с.



- Galimov E.M. Geochemistry of stable isotopes of carbon. Moscow: Nedra, 1968, 226 p. (in Russian)
- Дегенс Э. Т. Распределение устойчивых изотопов в карбонатах // Карбонатные породы: физико-химическая характеристика и методы исследования. М.: Мир, 1971. Т. 2. С. 141–153.
- Degens E. T. Distribution of stable isotopes in carbonates. Carbonate rocks: physico-chemical characteristics and study methods. Moscow: Mir, 1971, V. 2, pp. 141–153. (in Russian)
- Изох О. П., Изох Н. Г., Пономарчук В. А., Семенова Д. В. Изотопы углерода и кислорода в отложениях фран-фаменского разреза Кузнецкого бассейна (юг Западной Сибири) // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 7. С. 786–795.
- Izokh O. P., Izokh N. G., Ponomarchuk V. A., Semenova D. V. Isotopes of carbon and oxygen in the sediments of the Fran-Famennian section of the Kuznetsk basin (south of Western Siberia). Geology and geophysics, 2009, V. 50, No. 7, pp. 786–795. (in Russian)
- Кулешов В. Н. Эволюция изотопных углекислотно-водных систем в литогенезе. Сообщение 1. Седиментогенез и диагенез // Литология и полезные ископаемые. 2001. № 5. С. 491–508.
- Kuleshov V. N. Evolution of isotope carbon dioxide-water systems in lithogenesis. Message 1. Sedimentogenesis and diagenesis. Lithology and mineral reserves, 2001, No. 5, pp. 491–508 (in Russian)
- Кулешов В. Н., Седяева К. М. Геохимия изотопов ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$) и условия образования верхнеказанских карбонатных отложений Волго-Вятского междуречья // Литология и полезные ископаемые. 2009. № 5. С. 508–526.
- Kuleshov V. N., Sedaeva K. M. Geochemistry of isotopes ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$) and the formation conditions of the Upper Kazan carbonate deposits of the Volga-Vyatka interfluvium. Lithology and mineral reserves, 2009, No. 5, pp. 508–526. (in Russian)
- Кушнарева Т. И. Фаменский ярус Тимано-Печорской провинции / Министерство геологии РСФСР. Ухтинское территориальное геологическое управление. М.: Недра, 1977. 135 с.
- Kushnareva T. I. Famennian stage of the Timan-Pechora province (Ministry of Geology of the RSFSR. Ukhta Territorial Geological Department). Moscow: Nedra, 1977, 135 p. (in Russian)
- Матвеева Н. А. Условия образования фаменских рифогенных отложений Центрально-Хорейверского вала Тимано-Печорской провинции // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2017. Т. 12. № 2. DOI: https://doi.org/10.17353/2070-5379/16_2017
- Matveeva N. A. Formation conditions of the Famennian reef deposits of the Central Khoreyver swell of the Timan-Pechora province. Petroleum geology. Theory and practice, V. 12, No. 2, 2017. https://doi.org/10.17353/2070-5379/16_2017 (in Russian)
- Меннер В. В., Саяпина Л. С., Баранова А. В., Шувалова Г. А. Региональные особенности размещения рифогенных образований и новая модель литофациальной зональности во франских и нижнефаменских толщах Хорейверской впадины // Рифогенные зоны и их нефтегазоносность: Сб. науч. тр. М.: ИГиРГИ, 1991. С. 56–72.
- Menner V. V., Sayapina L. S., Baranova A. V., Shuvalova G. A. Regional features of the placement of riphogenic formations and a new model of lithofacial zonality in the Frasnian and Lower Famennian strata of the Khoreyver Depression. Riphogenic zones and their oil and gas potential. Collection of scientific articles, Moscow: IGI RGI, 1991, pp. 56–72. (in Russian)
- Мизенс Г. А., Кулешов В. Н., Степанова Т. И., Кучева Н. А. Изотопный состав и условия образования верхнедевонско-нижнекаменноугольных отложений восточного склона Среднего Урала // Ленинградская школа литологии: Материалы Всерос. литолог. совещ. СПб.: СПбГУ, 2012. Т. 2. С. 60–62.
- Mizens G. A., Kuleshov V. N., Stepanova T. I., Kucheva N. A. Isotopic composition and conditions of formation of Upper Devonian-Lower carboniferous deposits of the eastern slope of the Middle Urals. Leningrad lithological school: proceedings. V. 2, St. Petersburg: SpbSU, 2012, pp. 53–76.
- Прищепина О. М., Богацкий В. И., Макаревич В. Н., Чумакова О. В., Никонов Н. И., Куранов А. В., Богданов М. М. Новые представления о тектоническом и нефтегазогеологическом районировании Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2011. Т. 6. № 4. URL: http://www.ngtp.ru/rub/4/40_2011.pdf
- Prishchepina O. M., Bogatskiy V. I., Makarevich V. N., Chumakova O. V., Nikonov N. I., Kuranov A. V., Bogdanov M. M. New ideas about the tectonic and oil and gas geological zoning of the Timan-Pechora oil and gas province. Petroleum geology. Theory and practice, 2011, V. 6, No. 4, http://www.ngtp.ru/rub/4/40_2011.pdf (in Russian)
- Прищепина О. М., Богатский В. И., Макаревич В. Н., Чумакова О. В., Никонов Н. И., Куранов А. В., Богданов М. М. Новые представления о тектоническом и нефтегазогеологическом районировании Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2011. Т. 6. № 4. URL: http://www.ngtp.ru/rub/4/40_2011.pdf
- Prishchepina O. M., Bogatskiy V. I., Makarevich V. N., Chumakova O. V., Nikonov N. I., Kuranov A. V., Bogdanov M. M. New ideas about the tectonic and oil and gas geological zoning of the Timan-Pechora oil and gas province. Petroleum geology. Theory and practice, 2011, V. 6, No. 4, http://www.ngtp.ru/rub/4/40_2011.pdf (in Russian)
- Силаев В. И., Хазов А. Ф. Изотопное диспропорционирование карбонатного углерода в процессах гипергенно-экзогенной перегруппировки вещества земной коры. Сыктывкар: Геопринт, 2003. 41 с. (Программы фундаментальных исследований РАН. Отчетная серия, № 3).
- Silaev V. I., Khazov A. F. Isotope disproportionation of carbonate carbon in the processes of hypergenic-exogenous rearrangement of the crustal matter). Syktyvkar: Geoprint, 2003, 41 p. (in Russian)
- Структура платформенного чехла Европейского Севера СССР / В. А. Дедеев, В. Г. Гецен, И. В. Запорожцева и др. Л.: Наука, 1982. 200 с. (Коми филиал АН СССР, Ин-т геологии).
- The structure of the platform cover of the European North of the USSR. Dedeev V. A., Getsen V. G., Zaporozhtseva I. V. et al. Leningrad: Nauka, 1982, 200 p. (in Russian)
- Тимонин Н. И. Печорская плита: история геологического развития в фанерозое. Екатеринбург: УрО РАН, 1998. 240 с.
- Timonin N. I. Pechora plate: history of geological development in the Phanerozoic. Yekaterinburg: UB RAS, 1998, 240 p. (in Russian)
- Фор Г. Основы изотопной геологии: пер. с англ. М.: Мир, 1989. 590 с.
- For G. Basics of Isotope Geology. Moscow: Mir, 1989, 590 p. (in Russian)
- Algeo T. J., Scheckler S. E. Terrestrial-marine teleconnections in the Devonian: links between the evolution of land plants, weathering processes, and marine anoxic events. Philos. Trans. R. Soc. Lond., B Biol. Sci. 353, 1998. P. 113–130.
- Botz R., Stoffer S.P., Faber E., Tietz K. Isotope geochemistry of carbonate sediments from Lake Kivu (Easten-Central Afrika) // Chem.Geol.1988. V.69. P. 299–308.



- Van Geldern R., Joachimsk M. M. i., Day J., Jansen U. Carbon, oxygen and strontium isotope records of Devonian brachiopod shell calcite // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2006. V. 240. P. 47–67.
- Chen D. Z., Wang J. G., Racki G., Li, H., Wang C. Y., Ma X. P., Whalen M. T. Large sulphur isotopic perturbations and oceanic changes during the Frasnian–Famennian transition of the Late Devonian. *J. Geol. Soc. Lond.* 170, 2013. P. 465–476
- Cooper P. Reef development at the Frasnian/Famennian mass extinction boundary. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 181, 2002. P. 27–65.
- Jaffres J. B. D., Shields G. A., Wallmann K. The oxygen isotope evolution of sea water: A critical review of a long-standing controversy and an improved geological water cycle model for the past 3.4 billion years: *Earth-Science Reviews*. 2007. V. 83. P. 83–122.
- Joachimski M., Buggisch W. Anoxic events in the Late Frasnian—causes of the Frasnian-Famennian faunal crisis? *Geology* 21, 1993. P. 75–678
- Joachimski M. M., Breisig S., Buggisch W., Talent J.A., Mawson R., Gereke M., Morrow J. R., Day J., Weddige K. Devonian climate and reef evolution: Insights from oxygen isotopes in apatite // *Earth and Planetary Science Letters* 284, 2009. P. 599–609
- Joachimski M. M., van Geldern R., Breisig S., Day J., Buggisch W. Oxygen isotope evolution of biogenic calcite and apatite during the Middle and Upper Devonian // *J. Earth Sci.* 93, 2004. P. 542–553
- Kasting J. F., Howard M. T., Wallmann K., Veizer J., Shields G., Jaffrés J. Paleoclimates, ocean depth, and the oxygen isotopic composition of seawater. *Earth and Planetary Science Letters*. 2006. V. 252. P. 82–93.
- Kaufman A. J., Knoll A. H. Neoproterozoic variations in the C-isotopic composition of seawater: stratigraphic and biogeochemical implications // *Prec. Res.* 1995. No. 73. P. 27–49. doi: 10.1016/0301-9268(94)00070-8
- Kaźmierczak J. Colonial Volvocales (Chlorophyta) from the Upper Devonian of Poland and their paleoenvironmental significance // *Acta Palaeontologica Polonica*. 1975. V. 20 (1). P. 73–89.
- Keith M. L., Weber J. N. Carbon and oxygen isotopic composition of selected limestones and fossils // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1964. V. 28. P. 1787–1816.
- Menner V. V., Shuvalova G. A. The history of Late Devonian starved depressions on the shelves of the Timan-Pechora basin // *Pan-Arctic Palaeozoic Tectonics, Evolution of Basins and Faunas. Ichthyolith Issues Special Publication*. 2000. V. 6. P. 73–76.
- Perryt T. M., Magaritz M. Genesis of evaporate-associated platform dolomites: case study of the Main Dolomite (Zechstein, Upper Permian), Leba elevation, northern Poland // *Sedimentol.* 1990. V. 37. № 4. P. 745–761.

Поступила в редакцию / Received 22.09.2023