

Граница нижнего и среднего карбона в разрезах восточного склона Южного и Среднего Урала: изотопный состав углерода и кислорода в известняках

С. А. Дуб¹, Г. А. Мизенс¹, В. Н. Кулешов², Т. И. Степанова¹, Н. А. Кучева¹, С. В. Николаева³⁻⁵,
О. Ю. Мельничук¹, Е. И. Кулагина⁶, О. Л. Петров²

¹Институт геологии и геохимии им. УрО РАН, 620016, г. Екатеринбург, ул. Акад. Вонсовского, 15, e-mail: sapurin@igg.uran.ru

²Геологический институт РАН, 119017, Москва, Пыжевский пер., 7

³Natural History Museum, London, UK

⁴Палеонтологический институт РАН, 117647, Москва, Профсоюзная ул., 123

⁵Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Казань, Кремлевская ул., 18

⁶Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН, 450077, г. Уфа, ул. К. Маркса, 16/2

Поступила в редакцию 22.07.2019 г., принята к печати 14.08.2019 г.

Объектами исследования являлись известняки пограничного ниже-среднекаменноугольного интервала на восточном склоне Урала (разрезы “Худолаз”, “Худолаз-лог” и “Большой Кизил” на Южном Урале, “Исетский карьер” и “Луговая” – на Среднем). Методика. Проанализирован изотопный состав углерода и кислорода валовых проб известняков. Результаты. Получены первые результаты изучения изотопного состава углерода и кислорода карбонатных отложений серпуховско-башкирского интервала в разрезах восточного склона Южного и Среднего Урала. Показано, что величина $\delta^{13}\text{C}$ в наиболее полных разрезах колеблется в пределах от 1.5 до 3.8‰, а $\delta^{18}\text{O}$ – от 23.1 до 30.7‰. Выводы. Вариации изотопного состава углерода и кислорода в целом обусловлены как глобальными, так и местными событиями. В Восточно-Уральских бассейнах (северная периферия Палеотетиса) тренд к утяжелению изотопного состава углерода в карбонатных осадках проявился уже в позднесерпуховское время. В ряде случаев с этим трендом ассоциирует и положительный экскурс величины $\delta^{18}\text{O}$, который, вероятнее всего, связан с глобальным кратковременным похолоданием (оледенением).

Ключевые слова: восточный склон Урала, нижний и средний карбон, граница $\text{C}_1\text{-C}_2$, биостратиграфия, изотопы углерода и кислорода, перерыв в осадконакоплении

Источник финансирования

Исследования выполнены в рамках темы № АААА-А18-118053090044-1 госзадания ИГГ УрО РАН, при поддержке программы УрО РАН № АААА-А18-118052590031-9 (18-5-5-11), госзадания № 0135-2016-0017 и частично при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-05-01958), а также в соответствии с планом НИР Геологического института РАН. Исследования С.В. Николаевой выполнены в рамках государственной программы повышения конкурентоспособности Казанского (Приволжского) федерального университета среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

The Mid-Carboniferous boundary in the eastern slope of the Southern and Middle Urals: carbon and oxygen isotopic composition in limestones

Semen A. Dub¹, Gunar A. Mizens¹, Vladimir N. Kuleshov², Tatiana I. Stepanova¹, Nadezhda A. Kucheva¹,
Svetlana V. Nikolaeva³⁻⁵, Oleg Yu. Melnichuk¹, Elena I. Kulagina⁶, Oleg L. Petrov²

Для цитирования: Дуб С.А., Мизенс Г.А., Кулешов В.Н., Степанова Т.И., Кучева Н.А., Николаева С.В., Мельничук О.Ю., Кулагина Е.И., Петров О.Л. (2020) Граница нижнего и среднего карбона в разрезах восточного склона Южного и Среднего Урала: изотопный состав углерода и кислорода в известняках. *Литосфера*, 20(3), 305–327. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-3-305-327

For citation: Dub S.A., Mizens G.A., Kuleshov V.N., Stepanova T.I., Kucheva N.A., Nikolaeva S.V., Melnichuk O.Yu., Kulagina E.I., Petrov O.L. (2020) The Mid-Carboniferous boundary in the eastern slope of the Southern and Middle Urals: carbon and oxygen isotopic composition in limestones. *Litosfera*, 20(3), 305–327. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-3-305-327

© С.А. Дуб, Г.А. Мизенс, В.Н. Кулешов, Т.И. Степанова, Н.А. Кучева, С.В. Николаева, О.Ю. Мельничук, Е.И. Кулагина, О.Л. Петров, 2020

¹A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry Ural Branch of RAS, 15 Akad. Vonsovsky st., Ekaterinburg 620016, Russia, e-mail: sapurin@igg.uran.ru

²Geological Institute of RAS, 7 Pyzhevskii lane, Moscow 119017, Russia

³Natural History Museum, London, UK

⁴Borissiak Paleontological Institute RAS, 123 Profsoyuznaya st., Moscow 117647, Russia

⁵Kazan Federal University, 19 Kremlevskaya st., Kazan 420008, Russia

⁶Institute of Geology UFGC RAS, 16/2 K. Marx st., Ufa 450077, Russia

Received 22.07.2019, accepted 14.08.2019

Research subject. Limestones of the Mid-Carboniferous boundary interval of the Urals eastern slope (“Khudo-laz”, “Khudolaz-gully” and “Bolshoy Kizil” sections at the Southern Urals, as well as “Iset quarry” and “Lugovaya” sections in the Middle Urals) are considered. **Methods.** Carbon and oxygen isotopic composition in bulk samples was analyzed. **Results.** The carbon and oxygen isotopic composition in carbonate deposits of the Serpukhovian-Bashkirian boundary interval in the sections of the Southern and Middle Urals eastern slope was studied. It is shown that the value of $\delta^{13}\text{C}$ in the most complete sections varies from 1.5 to 3.8‰, while $\delta^{18}\text{O}$ – from 23.1 to 30.7‰. **Conclusions.** Variations in the carbon and oxygen isotopic composition are associated with both global and local events. In the East Uralian basins (northern periphery of Paleotethys), the shift in carbon isotopic composition of carbonate sediments appeared in the Late Serpukhovian. In some cases, this trend correlates with the positive excursion of $\delta^{18}\text{O}$, which is most likely associated with the global short-term cooling (glaciation).

Keywords: eastern slope of the Urals, the Lower and Middle Carboniferous sub-systems, the Mid-Carboniferous boundary, biostratigraphy, carbon and oxygen isotopes, unconformity (hiatus)

Funding information

The studies were carried out in accordance with the State Contract No. AAAA A18-118053090044-1 and the program of UB RAS No. AAAA A18-118052590031-9 (18-5-5-11), the state assignment No. 0135-2016-0017, partially with the financial support of RFBR (grant No. 15-05-01958), and in accordance with the research plan of the Geological Institute of RAS. S.V. Nikolaeva's research was carried out within the framework of the state program for improving the competitiveness of Kazan (Volga) Federal University among the world's leading research and educational centers.

Acknowledgements

The authors express their deep gratitude to M.T. Krupenin and D.V. Grazhdankin for productive discussion of the stable isotope geochemistry, as well as to V.V. Chernykh for consultations on stratigraphy general issues and geological correlation problems.

ВВЕДЕНИЕ

В известняках пограничного ниже-средне-каменноугольного интервала в разрезах удаленных друг от друга районов мира наблюдаются существенные различия в изотопном составе углерода. Так, по данным М. Зальцмана (Saltzman, 2003), вблизи границы миссисипия и пенсильвания (320 млн лет) разница между величинами $\delta^{13}\text{C}$ в отложениях на восточном побережье Панталассы (разрез Arrow Canyon Range, Северная Америка) и в карбонатах, сформировавшихся на западной окраине Палеотетиса (Донбасс, разрезы Восточной Европы и Южного Урала), составляет порядка 2‰ (значения 4 и 6‰ соответственно). Такую ситуацию указанный автор связывает с закрытием пролива между Евразией (Лавруссией) и Гондваной, вызвавшим изменение направле-

ний морских течений в обрамлении Палеотетиса, что повлекло за собой уменьшение поступающего в его западные бассейны растворенного органического вещества. В связи с этим снизилось и количество изотопно-легкой углекислоты, образующейся при окислении органических соединений и участвующей в образовании карбоната.

Сравнение комплексов фораминифер бассейнов Мидконтинента–Аппалачей и западного Палеотетиса в диапазоне от визейского до московского ярусов, выполненное В.И. Давыдовым и П. Козаром (Davydov, Cózar, 2019), показало, что на видовом уровне сходство между этими комплексами утрачивается в башкирском веке (хотя на уровне родов в целом оно сохраняется). Этот факт свидетельствует о потере прямой связи между эпиконтинентальным бассейном на территории современной Северной Америки и бассейнами Палеотетиса,

т. е. о закрытии пролива (моря) Реик. Первые признаки проявления “провинциализма” на этом рубеже отмечаются также для брахиопод, мшанок и кораллов (Rodríguez, 1984; Ross, Ross, 1985; Raymond et al., 1989). Перестройка конфигурации материков спровоцировала рост ледяного покрова в Южном полушарии, падение уровня моря и, как следствие, массовое вымирание организмов, известное как серпуховско-башкирское (среднекаменноугольное, или срединнокаменноугольное) малое массовое вымирание (Алексеев, 2000, 2006).

После столкновения Лавруссии и Гондваны наиболее коротким путем для миграции биоты между бассейнами служил Франклинианский морской пролив (Davydov, Cózar, 2019). Он сообщался с реликтовыми морями Палеоуральского океана. Известно, что начиная с поздневизейского времени на территории этих морей доминировал карбонатный тип осадконакопления. К концу раннего карбона здесь сформировались мощные протянувшиеся с юга на север (в современных координатах) карбонатные платформы (Чувашов, 2000; Горожанина и др., 2009; Мизенс и др., 2012).

Целью настоящей работы являлась оценка степени влияния глобальных гидрохимических и климатических событий на характер осадконакопления в восточных зонах Урала на рубеже миссисипия и пенсильвания в условиях постепенного закрытия океанического бассейна.

Нами изучены пограничные ниже-среднекаменноугольные известняки восточных зон Южного (разрезы “Худолаз”, “Худолаз-лог” и “Большой Кизил”) и Среднего (“Исетский карьер” и “Луговая”) Урала (рис. 1). Полученные результаты сопоставлены с данными В.Н. Кулешова с соавторами (2018) по разрезу “Аскын” на западном склоне Южного Урала. Корреляция разрезов выполнена на основании биостратиграфических и изотопных данных.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Разложение изученных проб известняков, как и стандартов КН-2, С-О-1 и NBS-19, проводилось в ортофосфорной кислоте (H_3PO_4) при $50^\circ C$. Определения изотопного состава углерода и кислорода выполнялись в лаборатории геохимии изотопов и геохронологии ГИН РАН с помощью комплекса аппаратуры корпорации Thermoelectron, включающего в себя масс-спектрометр Delta V Advantage и установку Gas-Bench-II. Значения $\delta^{13}C$ приводятся в промилле относительно стандарта V-PDB, значения $\delta^{18}O$ – в промилле относительно стандарта V-SMOW. Воспроизводимость определений $\delta^{18}O$ и $\delta^{13}C$ находится в пределах ± 0.2 и $\pm 0.1\text{‰}$ соответственно. Измерения содержаний порообразующих и малых элементов проводились в ЦКП “Геоаналитик” ИГГ УрО РАН (аналитики Н.П. Горбунова, Л.А. Татарина, Н.В. Чередниченко, Л.К. Де-

рюгина и Д.В. Киселёва) по стандартным аттестованным методикам (Вотьяков и др., 2006; Горбунова, Татарина, 2015).

В данной работе анализировался изотопный состав углерода и кислорода валовых проб известняков. Таким образом, полученные нами показатели $\delta^{13}C$ и $\delta^{18}O$ представляют собой усредненные значения этих величин во всех составляющих породы: седиментогенных (форменных элементов, матрикса и морского цемента) и вторичных карбонатных фазах (различных прожилков, поздних цементов, метасоматических кристаллов доломита). Очевидно, что в таком случае при хемотратиграфических построениях каждый отдельный образец (как и разрез) требует индивидуального подхода. По этой причине для сопоставления удаленных друг от друга разрезов на основании изотопных данных была проведена работа по выявлению зависимости изотопных характеристик от литотипов (микрофаций) известняков и от степени их вторичных преобразований.

При интерпретации значений $\delta^{13}C$ принимались в расчет формальные геохимические критерии сохранности первичных изотопных характеристик: $Mn/Sr \leq 4$, $Fe/Sr \leq 10$, $\delta^{18}O$ (PDB) $> -10\text{‰}$ (Семихатов и др., 2004). Последний критерий соответствует $\delta^{18}O$ (SMOW) $> 20.55\text{‰}$. Рядом исследователей применяются и другие величины указанных индикаторов. Так, по мнению Л. Дерри с соавторами (Derry et al., 1992), только отношение $Mn/Sr < 1.0$ может свидетельствовать о сохранности первичного изотопного состава известняков (в отношении как углерода и кислорода, так и стронция). А. Кауфман с соавторами среди прочих критериев использовали значения $Mn/Sr < 1.5$ (Kaufman et al., 1993) (также для обеих C- и Sr-изотопных систем), а Э. Нолл с коллегами для оценки сохранности первичного изотопного состава углерода и кислорода в карбонатах Оленёкского поднятия Сибири ориентировались на значения $Mn/Sr < 8$, $\delta^{18}O$ (PDB) $> -8\text{‰}$ (Knoll et al., 1995). Так или иначе, считается (Kaufman et al., 1993), что образцы с неизменным изотопным составом должны удовлетворять одновременно всем выбранным критериям.

Использование отмеченных индикаторов основано на общем принципе обогащения марганцем и железом вторичных карбонатных фаз и выносе стронция при постседиментационных преобразованиях пород (Brand, Veizer, 1980; Banner, Hanson, 1990; Кузнецов, 2013). Тем не менее, поскольку содержания стронция в породах в значительной степени определяются первичным минеральным составом осадков и изменением его содержания в морской воде при чередовании “кальцитовых” и “арагонитовых” морей (Steuber, Veizer, 2002), а не

¹ $\delta^{18}O$ (SMOW) = $1.03086 \delta^{18}O$ (PDB) + 30.86 (Friedman, O’Neil, 1977).

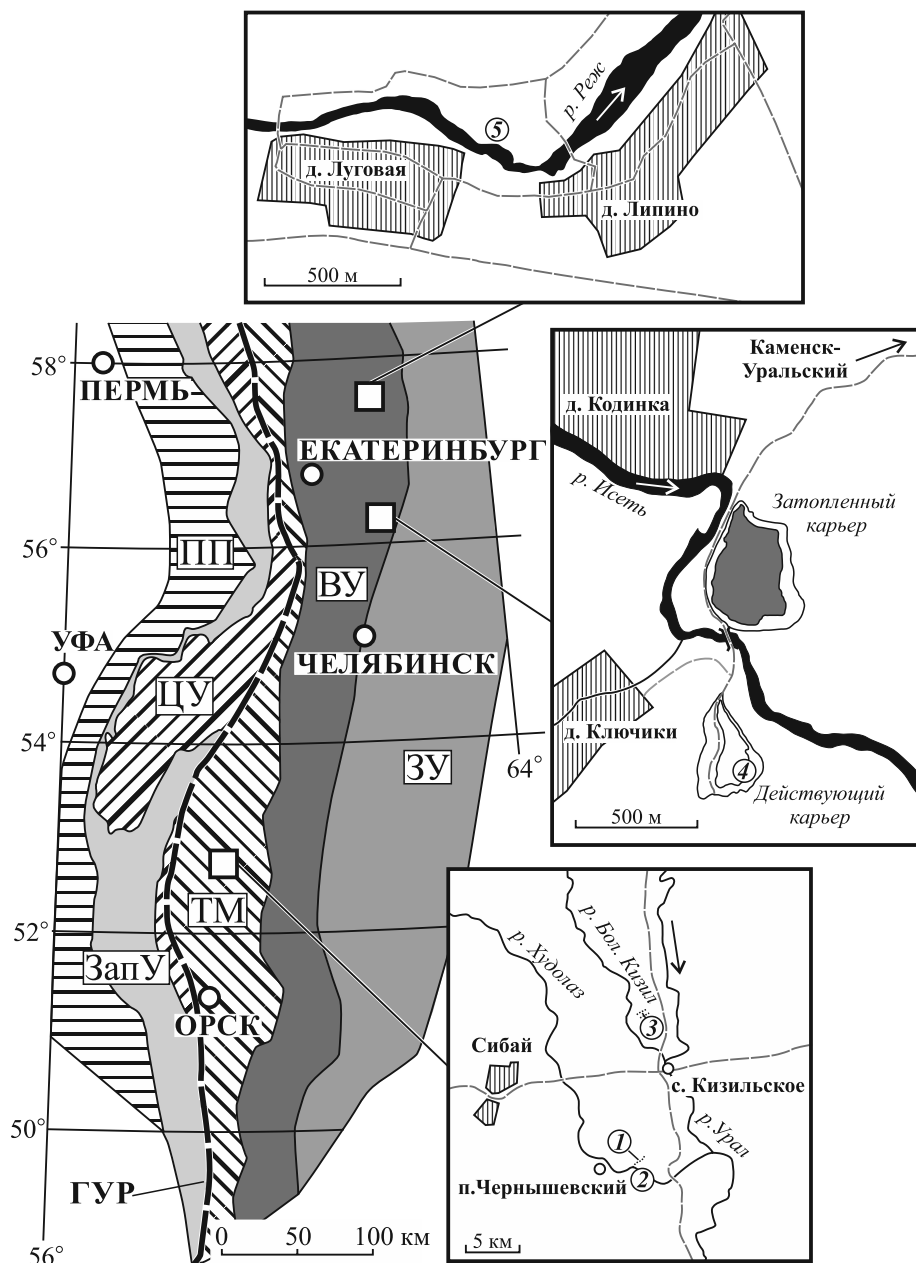


Рис. 1. Разрезы пограничного нижне-среднекаменноугольного интервала и их положение в современной структуре Урала.

Восточный склон Южного Урала: 1 – “Худолаз” (3160), 2 – “Худолаз-лог” (3159), 3 – “Большой Кизил” (3157 и 3158); восточный склон Среднего Урала: 4 – карьер на правом берегу р. Исеть (3162 и 3185), 5 – “Луговая” (3176). В скобках указаны номера разрезов, использованные при маркировке образцов.

Мегазоны (Пучков, 2010): ЗУ – Зауральская, ВУ – Восточно-Уральская, ЦУ – Центрально-Уральская, ЗапУ – Западно-Уральская, ТМ – Тагило-Магнитогорская, ПП – Предуральский прогиб, ГУР – Главный Уральский разлом.

Fig. 1. Sections of the Mid-Carboniferous boundary interval and their location at the modern Urals structure.

Eastern slope of the Southern Urals: 1 – “Khudolaz” (3160), 2 – “Khudolaz-gully” (3159), 3 – “Bolshoy Kizil” (3157 and 3158); eastern slope of the Middle Urals: 4 – quarry on the right bank of the Iset river (3162 and 3185), 5 – “Lugovaya” (3176). Section numbers, used for samples marking, are indicated in parentheses.

Megazones by (Puchkov, 2010): ЗУ – Transuralian, ВУ – East Uralian, ЦУ – Central Uralian, ЗапУ – West Uralian, ТМ – Tagil-Magnitogorskian, ПП – Cisuralian foredeep, ГУР – Main Uralian fault.

только интенсивностью гипергенных процессов, указанные параметры применялись с осторожностью. В частности, образцы, не соответствующие геохимическим критериям, в некоторых случаях тоже учитывались при обработке данных – если величина $\delta^{13}\text{C}$ в них идентична таковой у валидных смежных образцов и их исключение не меняет общей картины. И наоборот, заведомо предполагалось, что образцы, подходящие под формальные геохимические критерии, но с отчетливыми признаками вторичных преобразований (например, выветрелые), скорее всего, не могут быть использованы при оценке влияния глобальных геологических событий на изотопный состав углерода в отложениях.

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ УГЛЕРОДА И КИСЛОРОДА В ИЗВЕСТНЯКАХ ВОСТОЧНОГО СКЛОНА ЮЖНОГО УРАЛА

В общей стратиграфической шкале (ОСШ) России нижняя граница среднего карбона соответствует границе фораминиферовых зон *Monotaxinoides transitorius* и *Plectostaffella bogdanovkensis*, по конodontам – границе зон *Gnathodus bilineatus bollandensis* и *Declinognathodus noduliferus* (Алексеев, 2008). Однако в наиболее полных и непрерывных разрезах пограничного интервала на Южном Урале основание зоны *D. noduliferus* приблизительно отвечает подошве фораминиферовой зоны *Plectostaffella varvariensis* (Пазухин и др., 2012). На восточном склоне Южного Урала, в пределах Магнитогорско-Богдановского грабена, эта граница проводится в литологически относительно однородных известняках кизильской свиты, для которой в серпуховско-башкирском интервале не характерны отчетливо выраженные размывы и переывы в осадконакоплении.

Разрезы “Худолаз” и “Худолаз-лог”

В долине р. Худолаз вскрываются карбонатные образования верхнего визе, серпуховского и низов башкирского яруса. Наиболее полный разрез верхов серпухова – низов башкира: “Худолаз-лог” (обнажение 3159) расположен в правом борту левого притока (лога) р. Худолаз, ниже пос. Чернышевский. Соответствующий стратиграфический интервал обнажается также на левом берегу реки (3160), в 300 м ниже по течению от обнажения 3159 (см. рис. 1). Он является фрагментом разреза “Худолаз”, описанного в работах Т.И. Степановой и Н.А. Кучевой (2006, 2009б). В указанном интервале этого разреза (слои 56–58) обособляется пачка известняков, сложенных преимущественно проблематичными водорослями рода *Fasciella*, содержащая два прослоя строматолитов. В фораминиферовом комплексе преобладают переходные

серпуховско-башкирские виды архедисцид и эостателлид, в единичных пробах определены конodontы зоны *Gnathodus bollandensis* в ассоциации с *Declinognathodus* (?) sp. Такие же “фасциелловые” известняки, чередующиеся со строматолитами, прослежены и в разрезе “Худолаз-лог”.

В породах этих двух разрезов в верхней части серпуховского яруса значения $\delta^{13}\text{C}$ составляют 2 (в измененных – 1.5)–3.4‰, а в нижней части башкирского – от 3.4 до 3.8‰. Вариации величин $\delta^{18}\text{O}$ в пограничном интервале наблюдаются в широком диапазоне и составляют от 23.1 до 30.5‰ (табл. 1, рис. 2).

Оценка сохранности первичных изотопных соотношений показала, что во многих пробах известняков изотопный состав углерода может быть преобразован: отношение Fe/Sr в них составляет 12.36–15.84, Mn/Sr – 0.18–0.63. Относительно низкие значения $\delta^{18}\text{O}$ (23.1–23.4‰) в некоторых образцах (3159-2-2, 3159-2-6 и 3159-4-2), скорее всего, тоже указывают на искажение первичных изотопных параметров. Тем не менее изотопный состав углерода в условно неизмененных породах, формально подходящих для исследований, нередко сопоставим с таковым у предположительно преобразованных разностей. Таким образом, есть основания полагать, что величина $\delta^{13}\text{C}$ в этих известняках в целом определялась первичными факторами среды осадконакопления.

В разрезе “Худолаз-лог” граница нижнего и среднего карбона по фораминиферам и брахиоподам в настоящее время не определена однозначно. Первоначально она проводилась в кровле нижнего строматолитового пласта (Иванова и др., 1972), который в нашей работе представлен образцами 3159-3-2 и 3159-3-3. Непосредственно выше него в известняках определены *Asteroarchaediscus ovoides* (Rauscher-Chernousova), *Neoarchaediscus postrugosus* (Reitlinger), *Eolasiiodiscus donbassicus* Reitlinger, *Endothyranopsis sphaerica* (Rauscher-Chernousova et Reitlinger), *Janischewskina* sp., *Bradyina* sp., *Ikensieformis mirifica* (Brazhnikova), *Plectostaffella varvariensis* (Brazhnikova et Potievskaya). Здесь же встречаются раковины гигантоидных продуктид в прижизненном положении (обр. 84/1 и 84/2, сборы 1990 г.). Позднее рассматривался вариант проведения границы в кровле верхнего пласта строматолитов (ему соответствуют обр. 3159-5-1 и 3159-5-2), что и принято в данной работе. В фасциелловых пакстоунах, залегающих стратиграфически выше микробалитов, встречены редкие *Asteroarchaediscus ovoides*, *Neoarchaediscus regularis* (Suleimanov), *Eolasiiodiscus donbassicus*, *Ikensieformis ex gr. mirifica*, *Eostaffella ex gr. postmosquensis* Kireeva. Здесь также отмечаются разрозненные раковины гигантоидных продуктид. Таким образом, для точного определения положения среднекаменноугольной границы в этом разрезе требуются дополнительные исследования (прежде всего опреде-

Табл. 1. Величины $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ в изученных известнякахTable 1. $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in studied limestones

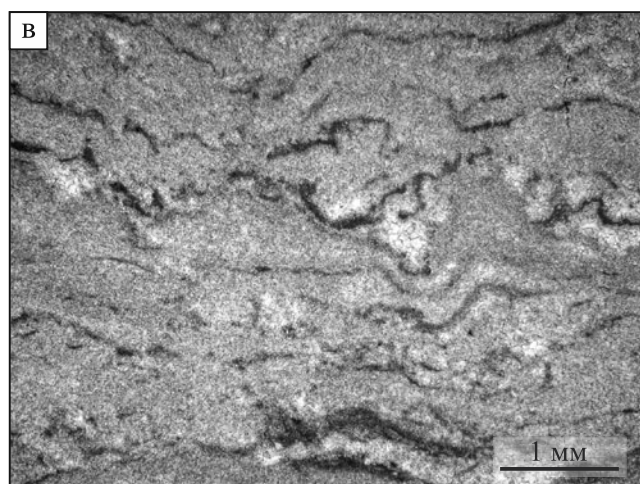
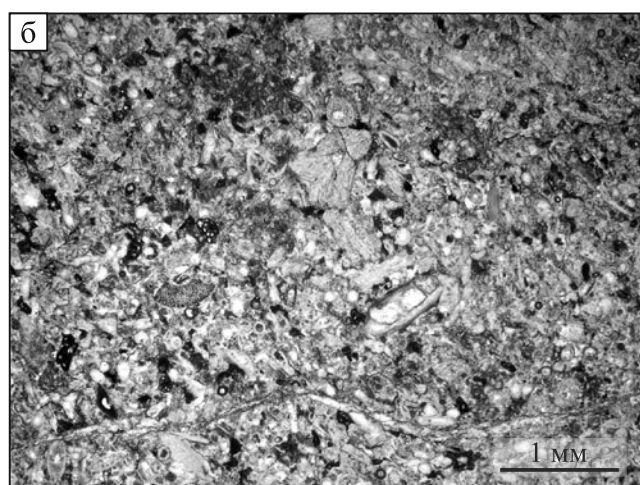
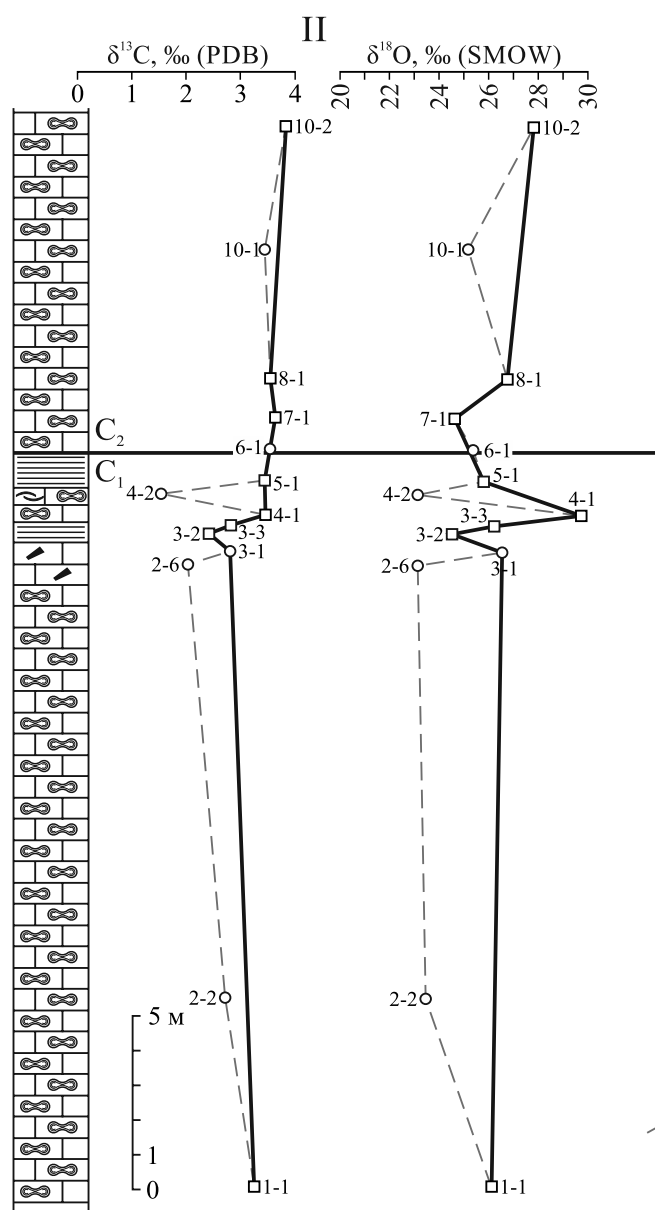
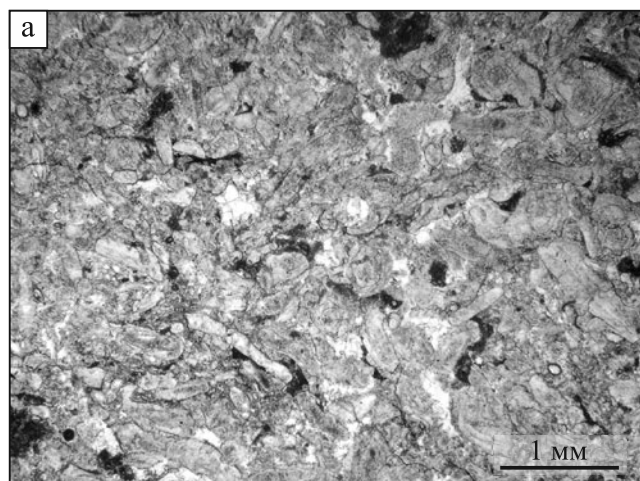
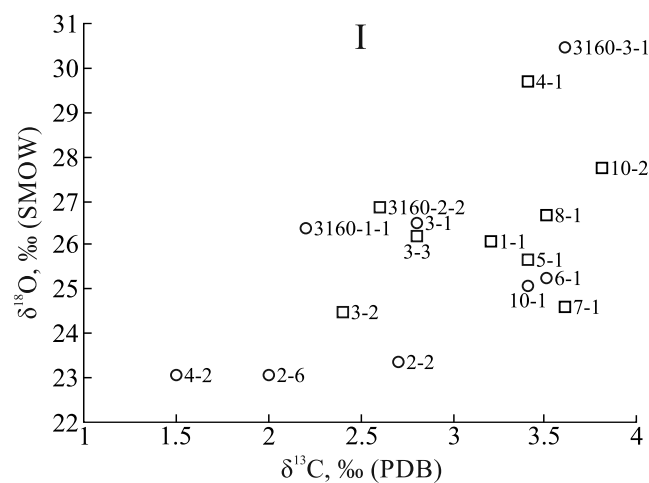
Разрез	№ обр.	Известняки	$\delta^{13}\text{C}$, ‰ (V-PDB)	$\delta^{18}\text{O}$, ‰ (V-SMOW)
Восточный склон Южного Урала				
р. Худолаз	“Худолаз-лог”, 3159	1-1	3.2	26.1
		2-2	2.7	23.4
		2-6	2.0	23.1
		3-1	2.8	26.5
		3-2	2.4	24.5
		3-3	2.8	26.2
		4-1	3.4	29.7
		4-2	1.5	23.1
		5-1	3.4	25.7
		6-1	3.5	25.3
		7-1	3.6	24.6
		8-1	3.5	26.7
		10-1	3.4	25.1
		10-2	3.8	27.8
р. Большой Кизил	“Худолаз”, 3160	1-1	2.2	26.4
		2-2	2.6	26.9
		3-1	3.6	30.5
	Юж. лог, 3157	1-1а	2.4	26.4
		2-2	1.9	25.0
		2-3	2.4	25.4
		2-4	2	25.3
		2-5	2.2	25.2
		2-6	1.9	25.0
		2-7	2.6	26.2
	Сев. лог, 3158	1-1	1.8	25.7
		1-4	0.5	25.8
		1-5	-0.5	24.7

Разрез	№ обр.	Известняки	$\delta^{13}\text{C}$, ‰ (V-PDB)	$\delta^{18}\text{O}$, ‰ (V-SMOW)	
Восточный склон Среднего Урала					
Исетский карьер	3162	2	Доломитсодержащие	3.3	30.4
		3	Биокластовые	2.9	27.2
		4	Доломитсодержащие	3.2	28.2
		5	Биокластовые	3.2	28.4
		6	Перекристаллизованные микробиа-литы	2.9	24.3
		8		3.0	27.7
	3185	1	Доломитсодержащие	2.8	29.7
		2		3.3	30.5
		3		3.4	30.7
р. Реж	“Луговая”, 3176	1-2	Биоморфные и с обломками различного генезиса	2.3	25.1
		1-3		2.3	24.8
		1-4		1.5	26.6
		1-5		2.2	24.0
		1-6		2.1	25.6
		1-7	Перекристаллизованные микробиа-литы	2.0	26.0
		1-8	Биоморфные и с обломками различного генезиса	1.7	25.0
		1-9		1.6	24.9
		2-1		1.7	25.0
2-2		Полибиокластовые	1.7	26.6	

ление фораминифер и конодонтов из прослая между строматолитами).

Большая часть зернистых известняков в разрезе “Худолаз-лог” сложена остатками *Fasciella*, в меньшем количестве биокластами кальцимикробов, комками цианобактериальной слизи и прочими элементами (“фасциелловые” известняки). Они являются преимущественно пакстоунами с несколько меняющимся соотношением цемента и матрикса. На некоторых уровнях встречаются полибиокластовые разности (обр. 3159-2-6 и 3159-3-1). Форменные элементы в последних представлены фораминиферами, фрагментами известковых зеленых и красных водорослей, обломками мша-

нок, раковин брахиопод, реже кальцимикробами и члениками криноидей. Переходы между литотипами “фасциелловых” и полибиокластовых известняков часто постепенные. Микробиа-литы в основном микрослоистые (строматолиты) микро- и криптозернистые, иногда неоднородные пятнистые с неравномерно распределенными газовыми пузырями, выполненными яснокристаллическим кальцитом. В целом в изученных известняках практически отсутствует терригенная примесь, содержание доломита незначительно (до 3.7%). В микробиа-литах $\delta^{13}\text{C}$ (PDB) = 2.4–3.4‰, $\delta^{18}\text{O}$ (SMOW) = 24.5–26.2‰; в “фасциелловых” известняках $\delta^{13}\text{C}$ = 2.7–3.8‰, $\delta^{18}\text{O}$ = 23.4–29.7‰;



—○— Образцы, в которых первичный изотопный состав углерода и кислорода предположительно изменен
—□— Наименее преобразованные образцы (на основе соответствия формальным геохимическим критериям)

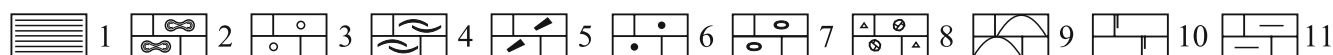


Рис. 2. Изотопный состав углерода и кислорода в известняках пограничного серпуховско-башкирского интервала в разрезах “Худолаз” и “Худолаз-лог”.

Образцы без номера обнажения принадлежат разрезу 3159. I – распределение точек в координатах $\delta^{18}\text{O}$ (SMOW)– $\delta^{13}\text{C}$ (PDB) и литотипы, II – вариации изотопного состава углерода и кислорода в разрезе “Худолаз-лог” и литологическая колонка. Известняки на микрофото (все микрофото (рис. 2–5) сделаны без анализатора): а – “фасциелловые” (обр. 3159-6-1), б – полибиокластовые (обр. 3159-3-1), в – микробилиты (обр. 3159-3-3). Здесь и далее на литологических колонках: 1–11 – известняки: 1 – микробильные (строматолиты и онколиты), 2 – “фасциелловые”, 3 – с кальцитархами, 4 – с брахиоподами, 5 – полибиокластовые, 6 – пеллоидные, 7 – с литокластами, 8 – брекчиевидные, 9 – биоморфные (органогенные постройки), 10 – доломитизированные; 11 – с глинистыми прослоями.

Fig. 2. Carbon and oxygen isotopic composition in limestones of the Mid-Carboniferous boundary interval in “Khudolaz” and “Khudolaz-gully” sections.

Samples with short number belong to section 3159. I – distribution of points in $\delta^{18}\text{O}$ (SMOW)– $\delta^{13}\text{C}$ (PDB) coordinates and limestone lithotypes, II – variations in carbon and oxygen isotopic composition in “Khudolaz-gully” section and lithological column. Photo captions: limestones: a – *Fasciella*-bearing (sample 3159-6-1), б – bioclastic (sample 3159-3-1), в – microbialites (sample 3159-3-3). Legend to lithological columns: 1–11 – limestones: 1 – microbial (stromatolites and oncolites), 2 – *Fasciella*-bearing, 3 – with *Calcitarcha*, 4 – with brachiopods, 5 – bioclastic, 6 – peloidal, 7 – with lithoclasts, 8 – breccias-like, 9 – boundstones (organic buildups), 10 – dolomitized; 11 – with clay interbeds.

в полибиокластовых разностях $\delta^{13}\text{C} = 2.0\text{--}2.8\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = 23.1\text{--}26.5\text{‰}$ (см. табл. 1, рис. 2).

Отложения нижней части башкирского яруса в разрезе “Худолаз” (слой 58) охарактеризованы фораминиферами: *Asteroarchaediscus rugosus* (Rauser-Chernousova), *A. baschkiricus* (Krestovnikov et Theodorovich), *Neoarchaediscus regularis* (Suleimanov), *N. postrugosus*, *Eosigmoilina* sp., *Eolasiodiscus donbassicus*, *Biseriella* ex gr. *parva* (N. Tchernysheva), *Globivalvulina eogranulosa* Reitlinger, *Eostaffella parastruvei* Rauser-Chernousova, *E. pseudostruvei angusta* Kireeva, *E. postmosquensis acutiformis* Kireeva, *E. acuta* Grozdilova et Lebedeva, *Eostaffellina* cf. *vischerensis* (Grozdilova et Lebedeva), *Plectostaffella* cf. *varvariensisformis tenuissima* Brazhnikova et Vdovenko, *Pl. reitlingerae* Groves, *Pl. ex gr. varvariensis*, *Pl. cf. asymmetrica* Brazhnikova et Vdovenko, *Plectomillerella* aff. *extensa* Brazhnikova et Vdovenko; а также конодонтами (проба 80/5): *Gnathodus bilineatus bollandensis* Higgins et Bouckaert, *Declinognathodus noduliferus inaequalis* Higgins (Степанова, Кучева, 2009б). В этом разрезе (3160) для изотопных исследований и корреляции с охарактеризованным ранее обнажением было отобрано три образца только из серпуховской части (основание башкирского яруса в настоящее время обнажено плохо). Стратиграфически наиболее низкий из них (3160-1-1 – на уровне т. 80 Б маркировки 2009 г.) характеризуется значениями $\delta^{13}\text{C} = 2.2\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = 26.4\text{‰}$. Он представлен полибиокластовым известняком, аналогичным 3159-2-6 и 3159-3-1 в разрезе “Худолаз-лог”, со значениями $\delta^{13}\text{C} = 2.0\text{--}2.8\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = 23.1\text{--}26.5\text{‰}$. Образец разделяющего зернистые известняки пласта строматолита (3160-2-2, вблизи т. 80 В) имеет изотопные параметры $\delta^{13}\text{C} = 2.6\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = 26.9\text{‰}$, сопоставимые с таковыми из интервала 3159-3-2–3159-3-3 (нижний строматолитовый пласт: $\delta^{13}\text{C} = 2.4\text{--}2.8\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = 24.5\text{--}26.2\text{‰}$). В перекрывающем строматолиты “фасциелловом” известняке (3160-3-1, т. 80 Г)

$\delta^{13}\text{C} = 3.6\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = 30.5\text{‰}$, что примерно соответствует изотопному составу пробы 3159-4-1, где $\delta^{13}\text{C} = 3.4\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = 29.7\text{‰}$ (см. табл. 1, рис. 2).

Таким образом, в обоих разрезах изменения в изотопном составе углерода и кислорода согласуются со сменой литотипов известняков, что с высокой степенью вероятности свидетельствует о сохранности первичных изотопных параметров отложений. В то же время на графике в координатах $\delta^{13}\text{C}$ – $\delta^{18}\text{O}$ (см. рис. 2) в сочетании с данными из таблицы, можно видеть, что изотопный состав известняков слабо зависит от микрофаций, поскольку точки, характеризующие разные литотипы, не образуют обособленных полей. Однако “фасциелловые” известняки в целом отличаются более тяжелым изотопным составом углерода, что может объясняться фракционированием изотопов при биоминерализации (более легкие изотопы при фотосинтезе связываются в органическом веществе, а оставшийся углерод в составе карбоната идет на формирование таллитов). Однако, вероятнее всего, такое распределение связано не с микрофациями, а с гидрохимическими изменениями среды осадконакопления, поскольку для “фасциелловых” разностей (которые в пограничном интервале в принципе преобладают) характерны широкий диапазон значений $\delta^{13}\text{C}$ и закономерное увеличение последних снизу вверх по разрезу.

Действительно, в известняках непосредственно выше границы C_1 – C_2 изотопный состав углерода наиболее тяжелый: $\delta^{13}\text{C}$ составляет 3.4–3.8‰. Таким образом, тенденция к постепенному возрастанию этой величины на рубеже веков хорошо проявлена, причем этот рост начался уже в позднесерпуховское время.

Значения $\delta^{18}\text{O}$ в карбонатах нижебашкирского интервала разреза меняются в более широких пределах – 24.6–27.8‰, что может быть связано как с колебаниями температуры бассейна, так и с периодическим поступлением метеорных вод. Тренд к

утяжелению изотопного состава кислорода в верхах серпуховского яруса в обоих разрезах хорошо выражен, здесь фиксируются отчетливые экскурсы кривых $\delta^{18}\text{O}$ до значений 29.7 и 30.5‰. Такие вариации могут объясняться похолоданием и соответствующим падением температуры вод (в случае если параметр $\delta^{18}\text{O}$ воды оставался неизменным) или увеличением $\delta^{18}\text{O}$ воды в связи с процессами образования ледников, либо возрастания солености бассейна при потере им связи с океаном (вследствие уменьшения притока метеорных вод или усиления процессов испарения). Нельзя исключать, что отмеченные факторы действовали совместно.

Разрез “Большой Кизил”

Пограничный серпуховско-башкирский интервал обнажается в бортах двух небольших логов, впадающих в долину р. Бол. Кизил с востока (левые притоки) в 4.5 км выше с. Кизильское (см. рис. 1): южного (3157) и северного (3158). По мнению В.Н. Пазухина с соавторами (2012), этот разрез является одним из наиболее полных и непрерывных на Южном Урале. Здесь в составе карбонатной толщи отмечаются биогермы преимущественно водорослевой природы.

В северном логу Е.И. Кулагина с соавторами (Kulagina et al., 2009) проводят границу в основании слоя 3, что соответствует точке 3158-1-5 в настоящей работе. Этот слой сложен пелоидным вакстоуном с редкими обломками брахиопод и иглокожих, с фораминиферами *Rectoendothyra donbassica* (Brazhnikova), *Plectostaffella varvariensis*, *Plecto-mediocris* sp. и конодонтами *Declinognathodus noduliferus inaequalis* (Kulagina et al., 2009).

В южном логу серпуховские неотчетливо-слоистые биокластовые и цельнораковинные брахиоподовые известняки (3157-1-1 и 3157-1-1a), представляющие собой фрагмент банки, состоящей из особей родов *Gigantoproductus*, *Striatifera*, *Actinoconchus*, *Martinia*, постепенно сменяются слоистыми нерасчлененными серпуховско-башкирскими отложениями (Kulagina et al., 2009), ранее относимыми к серпуховскому ярусу (Кулагина и др., 2001). Последние представлены серыми тонко- и микрозернистыми известняками, в которых практически отсутствуют крупные органические остатки, за исключением единичных обломков рогов в самой нижней части интервала и редких рассеянных створок раковин брахиопод *Striatifera*. Породы характеризуются обилием однокамерных субсферических и пузыревидных форм с микритовой стенкой, большинство из которых относятся к роду фораминифер *Archaeosphaera* и к проблематичным *Pachysphaerina*. Здесь же встречаются и многокамерные фораминиферы *Howchinia gibba* (Moeller), *Eolasiiodiscus donbassicus*, *Planoendothyra* cf. *alju-*

tovica Reitlinger, *Biseriella minima* (Reitlinger), *Eostaffellina paraprotvae* (Rausser-Chernousova) (Кулагина и др., 2001). В известняках, иногда в больших количествах, распространены мелкие пузыри, заполненные светлым кальцитом (узорчатая текстура). Вверх по разрезу эти литотипы постепенно сменяются брахиоподовыми разностями (выше точки 3157-2-7), а затем – биокластовыми брахиоподово-водорослевыми (в том числе с обломками *Fasciella* и *Ungdarella*) породами. В целом комплекс отмеченных признаков свидетельствует о лагунных обстановках осадконакопления. В частности, обилие пахисферин и им подобных форм (*Calcitarcha*) указывает на условия ограниченной циркуляции вод и, вероятно, аномальную соленость бассейна. Такие фации сверху и снизу граничат с известняками, отвечающими открытой, близкой к нормально-морской среде, благоприятной для развития брахиопод, известковых водорослей и фораминифер.

В брахиоподовых разностях (обр. 3157-1-1a) $\delta^{13}\text{C} = 2.4\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = 26.4\text{‰}$; в “сферово-узурчатых” (3157-2-2–3157-2-7) известняках $\delta^{13}\text{C}$ варьирует от 1.9 до 2.6‰, а $\delta^{18}\text{O}$ – в пределах 25.0–26.2‰ (см. табл. 1, рис. 3). При этом критериям пригодности соответствуют только брахиоподовые известняки ($\text{Mn/Sr} = 0.05$, $\text{Fe/Sr} = 5.69$), а в остальных породах исходные изотопные характеристики, возможно, изменены ($\text{Mn/Sr} = 0.08\text{--}0.16$, $\text{Fe/Sr} = 10.84\text{--}14.79$). На графике, отражающем вариации изотопного состава C и O в известняках, видно, что формы кривых по углероду и кислороду сходны, что, в случае сохранности первичных отношений, может указывать на периодическое опреснение бассейна.

Залегающие в северном логу (обр. 3158) известняки в значительной степени выветрелые, содержат скопления брахиопод (полибиокластово-брахиоподовые), а также редкие пятна окремнения, характеризуются относительно низкими величинами $\delta^{13}\text{C}$ (снизу вверх 1.8, 0.5 и -0.5‰). Такие значения могут быть связаны с влиянием гипергенных процессов (как современных, так и древних). В то же время нельзя исключать и возможность сохранения первичного изотопного сигнала, так как образцы 3158-1-1, 3158-1-4 и 3158-1-5 (в отличие от большинства образцов известняков соседнего лога) отвечают геохимическим критериям сохранности изотопных параметров: $\text{Mn/Sr} = 0.05\text{--}0.08$, $\text{Fe/Sr} = 3.97\text{--}8.73$, но такая вероятность низка, поскольку породы выветрелые.

Так или иначе, отложения соседних логов плохо коррелируют друг с другом, что подтверждается и результатами геохимических исследований (Мизенс, Дуб, 2018). Разрез в северном логу, скорее всего, соответствует более высокому стратиграфическому уровню по сравнению с южным.

На данном этапе окончательно ответить на вопрос, являются ли полученные изотопные данные по разрезу “Большой Кизил” близкими к первич-

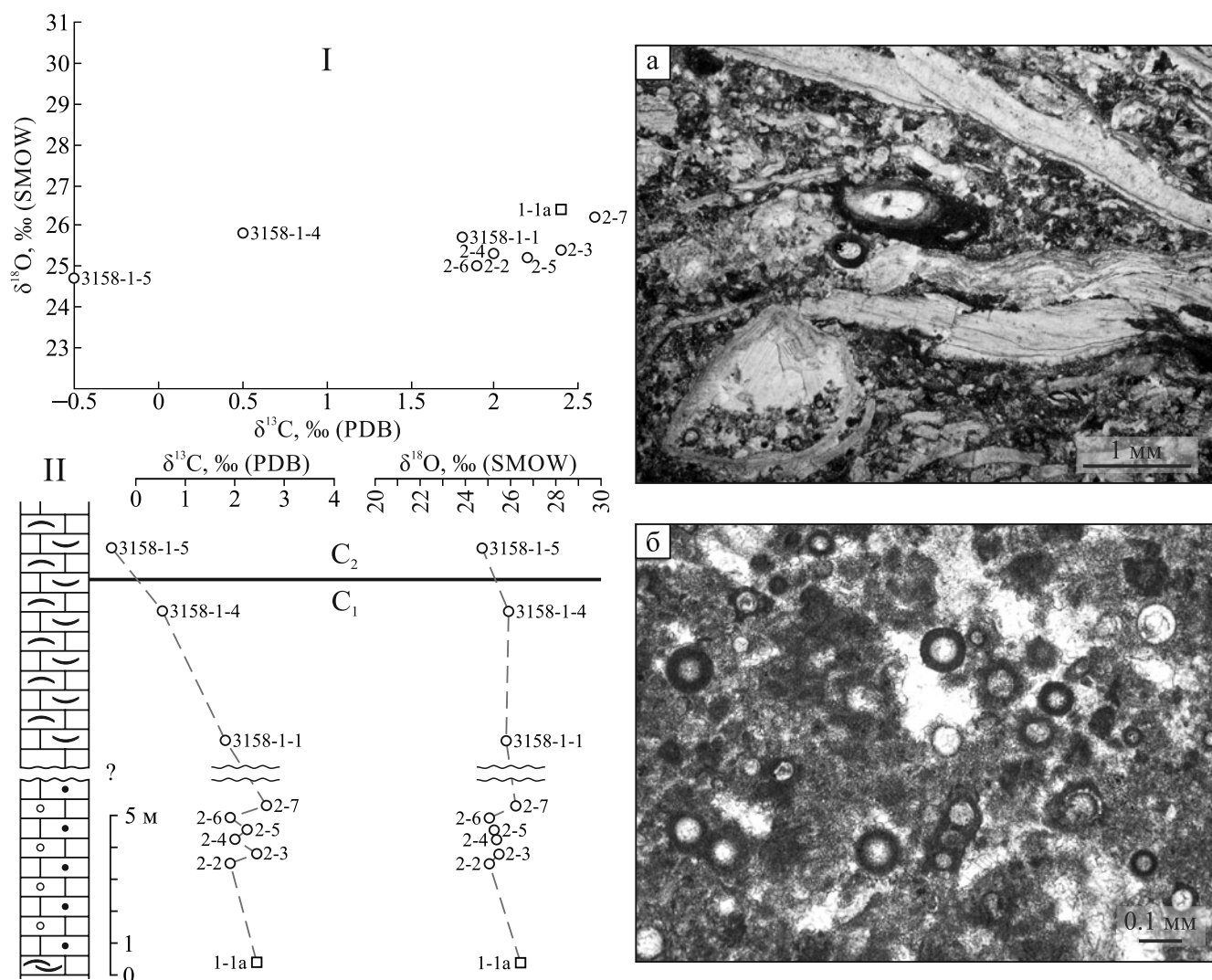


Рис. 3. Изотопный состав углерода и кислорода в известняках пограничного серпуховско-башкирского интервала в разрезе “Большой Кизил”.

Образцы без номера обнажения принадлежат разрезу 3157. Известняки на микрофото: а – брахиоподовые (обр. 3157-1-1а), б – кальцитархо-пеллоидные (обр. 3157-2-2). Условные обозначения к колонке – см. рис. 2.

Fig. 3. Carbon and oxygen isotopic composition in limestones of Mid-Carboniferous boundary interval in “Bolshoy Kizil” section.

Samples with short number belong to section 3157. Limestones: а – brachiopods-bearing (sample 3157-1-1а), б – Calcitarcha-peloidal (sample 3157-2-2). Legend – see Fig. 2.

ным, не представляется возможным, необходимы более детальные исследования. В целом относительно легкий состав углерода и кислорода может быть связан: 1) с современными процессами выветривания, 2) с влиянием метеорных вод с изотопно-легкой углекислотой во время перерыва в осадконакоплении в начале башкирского века или 3) с низкой соленостью бассейна осадконакопления (из-за поступления пресных вод), вероятно, по причине ослабления его связи с Мировым океаном. Последнему варианту противоречат находки многочисленных брахиопод.

Предполагается, что карбонатные отложения разрезов на реках Бол. Кизил и Худолаз приурочены к единой карбонатной платформе, однако во время осадконакопления они, вероятно, были удалены друг от друга и, скорее всего, оказались сближены позднее, вследствие тектонических процессов (Горожанина и др., 2009). Как показано ранее, изотопный состав С и О известняков в том и другом разрезах несколько различается, что, по-видимому, обусловлено их различной фациальной приуроченностью. В частности, Е.Н. Горожанина с соавторами пришли к выводу, что известня-

ки, обнажающиеся на р. Бол. Кизил, сформировались в обстановке бортового уступа Магнитогорско-Богдановского грабена, перекрытого к концу раннего карбона вулканогенно-осадочными толщами, а карбонаты, вскрытые в разрезе “Худолазлог” (слоистые мелководные и умеренно мелководные), накапливались ближе к осевой части отмеченной структуры.

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ УГЛЕРОДА И КИСЛОРОДА В ИЗВЕСТНЯКАХ ВОСТОЧНОГО СКЛОНА СРЕДНЕГО УРАЛА

На востоке Среднего Урала, в отличие от Южного, на границе серпуховского и башкирского ярусов в большинстве разрезов наблюдается отчетливая смена литологического состава пород, обусловленная изменением обстановок осадконакопления. В частности, предполагается (Мизенс и др., 2012, 2016), что на рубеже раннего и среднего карбона на Среднем Урале имели место активные сдвиговые процессы, ведущие к образованию небольших относительно глубоководных бассейнов типа pull apart. Такие бассейны частично заполнялись грубообломочными отложениями, которые сейчас можно наблюдать в береговых обнажениях рек Исеть, Нейва, Реж, Кунара.

Разрез “Исетский карьер”

На Среднем Урале наиболее представительные разрезы с литологически выраженной границей нижнего и среднего карбона наблюдаются в карьерах стройматериалов “Уралнеруд” на правом (3162, 3185, пробы разных лет) и левом берегах р. Исеть вблизи д. Ключики Каменского района (см. рис. 1). Здесь массивные карбонатные брекчии ключевской свиты башкирского яруса залегают на слоистых известняках серпуховского яруса. В старом затопленном карьере, на левом берегу реки, в цементе брекчий ранее были обнаружены фораминиферы *Neoarchaediscus gregorii* (Dain), *Eostaffella* sp., *E. cf. pseudostruvei angusta*, *E. postmosquensis* низов башкирского яруса, а также перетолженные верхневизейско-серпуховские формы (Степанова и др., 2001). Позднесерпуховский возраст подстилающей брекчии толщи был обоснован находками конодонтов *Gnathodus bilineatus bollandensis* в 23 м ниже литологической границы, а также наличием амmonoидей *Fayettevillea friscoensis* (Miller et Owen), *Stenoglyphyrites beshevensis* (Librovitch), *Stenopronorites uralensis* (Karpinsky), *Glyphyrites embolicus* Ruzhentsev et Bogoslovskaya, *Epicanites aktubensis* (Ruzhentsev), *Platygoniatites* sp. и *Proshumardites* sp. (определения А.А. Школина) на пластовых поверхностях. При исследованиях в действующем карьере на правом берегу реки с отметки 28.5 м ниже подошвы брекчий была собрана

на представительная коллекция амmonoидей: *Dombarocanites* sp., *Stenopronorites uralensis*, *Delepinoceras* cf. *bressoni* Ruzhentsev, *Platygoniatites* cf. *superior* Ruzhentsev et Bogoslovskaya, *Proshumardites principalis* Ruzhentsev et Bogoslovskaya, *Stenoglyphyrites* sp., *Fayettevillea* sp., *Syngastrioceras* sp., обоснована корреляция указанной фауны с амmonoидными зонами Западной Европы E2c и E2d (Nikolaeva et al., 2018). Однако интервал между гониатитовыми скоплениями и брекчиями ключевской свиты не имеет удовлетворительной палеонтологической характеристики. Здесь отсутствуют руководящие таксоны фораминифер и брахиопод, а конодонты и амmonoидеи пока не изучены в полной мере.

В слоистых известняках правобережного разреза, относимых в настоящее время к верхней части серпуховского яруса, было обнаружено несколько прослоев вулканических туфов. Возраст одного из них (в 14 м ниже подошвы брекчий), определенный по цирконам уран-свинцовым методом (SHRIMP), составил 320 ± 3 млн лет (Мизенс и др., 2017), что с высокой вероятностью предполагает принадлежность отложений к нижней части башкирского яруса².

Изучение стабильных изотопов углерода и кислорода нами производилось только в верхнесерпуховской части разреза в действующем, правобережном, карьере. Большая часть изученных образцов в ее составе представлена известняками, в разной степени доломитизированными (доля доломита до 46%) и окремненными. В брекчиях ключевской свиты, состоящих из разнородных обломков, изотопный состав не измерялся. Среди неподверженных доломитизации верхнесерпуховских пород встречаются несколько разновидностей: микро-тонкодетритовые вакстоуны с криптозернистым матриксом и рассеянными кальцитархами, редкими члениками криноидей и неопределимым детритом, в том числе раковинным (обр. 3162-5); мелко-тонкобиокластовые пакстоуны с преобладающими пелоидами и фрагментами известковых зеленых водорослей, с редкими кальцитархами и фораминиферами (3162-3); перекристаллизованные строматолиты с пленками органического вещества и стилолитами (3162-6, 3162-8). Все остальные пробы (3162-2, 3162-4, 3185-1, 3185-2, 3185-3) представлены доломитизированными известняками (см. табл. 1).

Известно, что изотопный состав кислорода в седиментационном кальците и сингенетичном с ним раннедиагенетическом доломите различается: в последнем, как правило, тяжелых изотопов больше (Friedman, O'Neil, 1977; Фор, 1989; Hoefs, 2009; Сунгатуллин и др., 2014). Однако в случае наложенной (метасоматической) доломитизации изотопный состав кислорода в доломите может быть

² В настоящее время граница между серпуховским и башкирским ярусами устанавливается на уровне 323.2 ± 0.4 млн лет (Davydov et al., 2012; Ogg et al., 2016).

различен (зависит от изотопных параметров минералообразующих флюидов). В отношении изученного разреза однозначно ответить на вопрос о природе доломита достаточно сложно. В шлифах встречаются признаки как ранней доломитизации (*in situ*, когда микро- или тонкокристаллический ромбоэдрический доломит равномерно распределен в основной кальцитовых массе без нарушения седиментационных признаков породы), так и поздней (доломит приурочен к парастилолитовым швам или последние выглядят как своеобразные барьеры, разграничивающие богатые доломитом и свободные от него участки).

Обращает на себя внимание широкий диапазон вариаций изотопного состава кислорода в рассматриваемых породах: $\delta^{18}\text{O} = 24.3\text{--}30.7\text{‰}$. Вероятно, наиболее высокие значения связаны с общей доломитизацией толщи. В то же время прямой зависимости между содержанием доломита и величиной $\delta^{18}\text{O}$ в карбонатах не выявлено³. Кроме того, значения $\delta^{18}\text{O}$ сходны с таковыми в разрезах на р. Худолаз ($\delta^{18}\text{O} = 23.1\text{--}30.5\text{‰}$), где не обнаружены известняки, содержащие значительные количества доломита. Таким образом, нельзя исключать, что утяжеление изотопного состава кислорода в этом разрезе ассоциирует с глобальными процессами похолодания и/или с образованием полярных ледников.

Изотопный состав углерода в границах изученного интервала достаточно стабильный, несмотря на различия в отдельных структурных и минеральных особенностях пород. $\delta^{13}\text{C}$ изменяется в незначительных пределах – от 2.8 до 3.4‰ (см. табл. 1, рис. 4). Скорее всего, эти значения близки к первичным.

Среди всех отобранных проб только два образца – микро-тонкобиокластовые вакстоуны (3162-5) и мелко-тонкобиокластовые пакстоуны (3162-3) – могут быть пригодны для выявления первичных изотопных отношений, поскольку не содержат признаков перекристаллизации, доломитизации и окремнения. Значения $\delta^{13}\text{C}$ в указанных образцах составляют соответственно 2.9 и 3.2‰, а $\delta^{18}\text{O} = 27.2$ и 28.4‰. Тем не менее изотопный состав С и О большинства остальных образцов отличается от указанного несущественно ($\delta^{13}\text{C} = 2.8\text{--}3.4\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = 27.7$ и 30.7‰). Только на изотопный состав кислорода в образце 3162-6 ($\delta^{18}\text{O} = 24.3\text{‰}$), по всей видимости, повлияло окремнение.

В целом изотопный состав углерода и кислорода пород рассматриваемого разреза свидетельствует о том, что в среде седиментации отсутствовали (или имели резко подчиненное значение) пресные воды, верхнесерпуховские известняки не подвер-

гались субаэральному (метеорному) воздействию на границе раннего и среднего карбона. Вероятнее всего, бассейн осадконакопления на рубеже $\text{C}_1\text{--C}_2$ здесь был достаточно глубоким. Присутствие в составе башкирских брекчий большого количества обломков из подстилающих отложений (в том числе верхнесерпуховских) может служить аргументом в пользу предположения о возникновении локальных поднятий на некотором удалении от рассматриваемой площади в это время.

Разрез “Луговая”

Разрез (3176) расположен на левом берегу р. Реж, напротив с. Липино и д. Луговая. Серпуховская часть разреза (за исключением обр. 3176-1-7) представлена известняками массивными светло-серыми микрозернистыми, с рассеянными раковинами брахиопод, члениками криноидей, фораминиферами, биокластами мшанок, известковых водорослей (в том числе остатков *Fasciella*) и кальцимикробов, а также разнообразными литокластами (интракластами). На отдельных участках обнаруживаются остатки красных водорослей, находящиеся предположительно в прижизненном положении в окружении инкрустационного цемента, что может указывать на биогермную природу известняков. Слой с обр. 3176-1-7 сложен перекристаллизованными микробиалитами: в шлифах встречаются хорошо выраженные онколиты, а также угадываются пузыревидные спаритовые структуры и брекчированные слои криптозернистого известняка. В фораминиферовом сообществе преобладают *Eolasiodiscus donbassicus*, *Monotaxinoides transitorius* и другие представители лазиодисцид, встречаются архедисциды, *Eostaffella ovoidea*, *E. postmosquensis*, *Eostaffellina subsphaeroidea* Melnikova, здесь же определены конодонты *Gnathodus bilineatus bollandensis* и *Lochriea mononodosa* (Rhodes, Austin et Druce). К некоторым уровням худолазовского горизонта приурочены банковые скопления брахиопод *Latiproductus* sp., *Striatifera striata* (Fischer), *Productus productus* Martin, в пределах чернышевского горизонта встречаются редкие *Avonia* sp., *Echinoconchus* sp. В подошве башкирского яруса (обр. 3176-2-2 и выше) литология пород меняется. Известняки становятся более темными, отчетливо слоистыми и зернистыми – от мелко- до грубозернистых, иногда с зернами гравийной размерности. Несколько возрастает роль члеников криноидей, биокластов мшанок (вероятно, переотложенных) и интракластов, повышается степень микритизации зерен, в то время как сам набор форменных элементов в целом остается прежним. Комплекс фораминифер в отложениях выше границы смешанный, содержит как башкирские виды, так и серпуховские (Мизенс и др., 2007). Среднекаменноугольный возраст опре-

³ Однако полностью отрицать наличие такой связи в данном случае нельзя, поскольку известняки доломитизированы неравномерно, а материалом для минералого-геохимических и изотопных исследований служили разные навески.

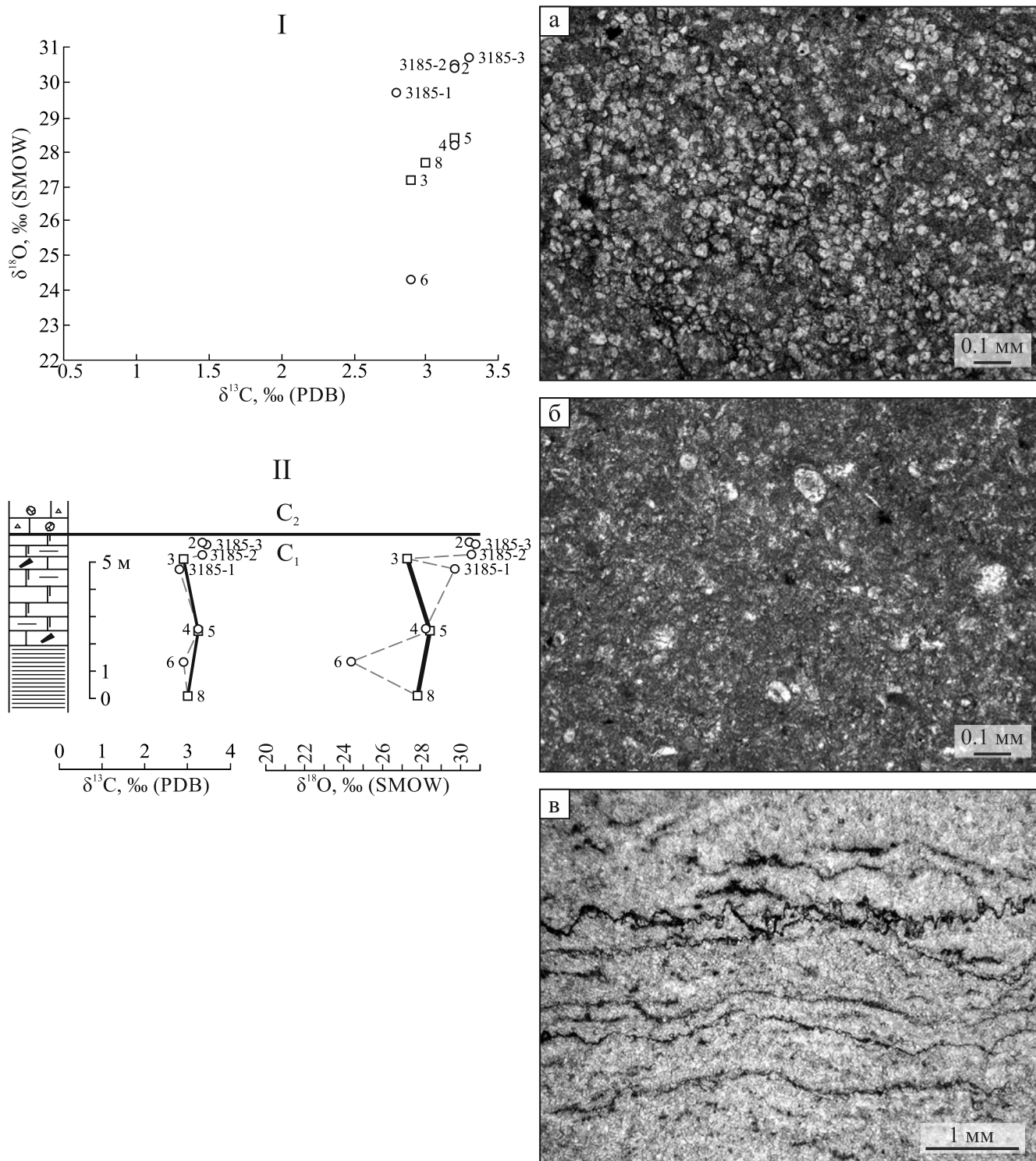


Рис. 4. Изотопный состав углерода и кислорода в известняках пограничного серпуховско-башкирского интервала разреза в карьере на правом берегу р. Исеть.

Образцы без номера обозначения принадлежат разрезу 3162. Известняки: а – доломит-содержащие (обр. 3162-2), б – биокластовые микро- и тонкозернистые (обр. 3162-5), в – перекристаллизованные микробиалиты (обр. 3162-8). Условные обозначения – см. рис. 2.

Fig. 4. Carbon and oxygen isotopic composition in limestones of the Mid-Carboniferous boundary interval in section at the quarry on the right bank of the Iset river.

Samples with short number belong to section 3162. Limestones: а – *Fasciella*-bearing (sample 3162-2), б – fine-grained bioclastic (sample 3162-5), в – recrystallized microbialites (sample 3162-8). Legend – see Fig. 2.

деляется присутствием конодонтов *Declinognathodus noduliferus*, *D. lateralis*, также встречающихся в ассоциации с серпуховскими формами. В основании среднего карбона обнаруживаются немногочисленные брахиоподы *Neochonetes* sp., *Linoproductus postovatus* Semichatova, *Alphachoristites* cf. *bisulcatiformis* (Semichatova).

Детальные (в том числе микроскопические) исследования верхнесерпуховских известняков показали, что пространство между первичными компонентами породы нередко заполнено инкрустационным кристаллическим кальцитом (цементом), местами встречаются видимые невооруженным глазом светлые перекристаллизованные участки. Отмеченная неоднородность придает известнякам псевдобрекчиевидный облик и свидетельствует о наличии пустот в породах на определенном этапе седименто- и литогенеза. Так, полости могли быть характерны для известняков изначально (если последние слагали биогермы) или образовались в результате воздействия гипергенных процессов. В случае если субазальной экспозиции подвергались проницаемые породы, метеорные воды могли проникать на достаточно большую глубину, даже если осушение было непродолжительным.

Геохимические критерии сохранности первичных признаков, однако, не подтверждают предположение о значительной преобразованности известняков ($Mn/Sr = 0.55-1.32$, $Fe/Sr = 4.78-7.1$, лишь для обр. 3176-1-2 это отношение составляет 12.87). В то же время некоторыми аргументами в пользу наличия перерыва являются содержания малых элементов. В частности, при равной средней концентрации марганца в серпуховской и башкирской частях разреза (131 и 128 г/т соответственно) среднее содержание стронция в них различается (151 и 236 г/т), что, вероятно, свидетельствует о его потере нижнекаменноугольными карбонатами при “пресноводном диагенезе” (в соответствии с Юдович, Кетрис, 2011).

В верхнесерпуховских известняках рассматриваемого разреза флуктуации величины $\delta^{13}C$ в целом не очень выражены, ее значения находятся в пределах от 1.5 до 2.3‰ (см. табл. 1, рис. 5). Кривая $\delta^{18}O$ имеет более сложный вид (параметр колеблется от 24 до 26.6‰), что может быть связано с вариациями температур седиментации и солености бассейна. Между тем такое распределение и невысокие значения $\delta^{18}O$ в целом, скорее всего, обусловлены постседиментационными преобразованиями. Действительно, в микробиалитах (обр. 3176-1-7) $\delta^{13}C$ составляет 2‰, а $\delta^{18}O = 26‰$ (т. е. по изотопным параметрам они несущественно отличаются от смежных отложений), хотя, весьма вероятно, их возникновение являлось отражением изменения глубины бассейна, температуры и солености вод. И наоборот, образцы 3176-1-4 и 3176-1-5 по литологии сходны друг с другом, но имеют различные изотопные характеристики.

На предполагаемой границе серпуховского и башкирского ярусов (между точками 3176-2-1 и 3176-2-2) значение $\delta^{13}C$ сохраняется на уровне 1.7‰, но $\delta^{18}O$ возрастает от 25 до 26.6‰. К сожалению, одной пробы недостаточно для корректной интерпретации, необходимы дополнительные исследования башкирской части разреза. Согласно отмеченным признакам, для среднекаменноугольной границы в этом разрезе характерен непродолжительный перерыв. Нельзя исключать и того, что вблизи поверхности несогласия могла возникнуть зона повышенной проницаемости пород, благодаря чему (при воздействии проходящих флюидов) первичные $\delta^{13}C$ и $\delta^{18}O$ были изменены как в серпуховских, так и в башкирских отложениях.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При проведении исследований изотопного состава углерода и кислорода в известняках пограничного нижне-среднекаменноугольного интервала были учтены последние биостратиграфические данные по разным группам органических остатков (фораминиферы, брахиоподы, аммоноидеи, конодонты), которые встречаются в разрезах различной фациальной принадлежности.

К сожалению, опробованные нами интервалы оказались недостаточно протяженными для проведения комплексных межрегиональных корреляций на основе изотопных данных (рис. 6). Тем не менее полученные результаты позволяют выявить некоторые закономерности. Так, для разреза “Луговая” характерен относительно легкий и достаточно стабильный изотопный состав углерода – 1.0–2.3‰, а значения $\delta^{18}O$ составляют 24.0–26.6‰; наличие непродолжительного перерыва на границе серпуховского и башкирского ярусов предполагается по косвенным признакам. Относительно постоянным, но более тяжелым является также изотопный состав углерода в серпуховских известняках в карьере “Уралнеруд” на правом берегу р. Исеть. Здесь $\delta^{13}C = 2.8-3.4‰$, а величина $\delta^{18}O$ превышает 27‰ (27.2–30.7‰, за исключением одного образца). Разрезы на востоке Южного Урала по р. Худолаз отличаются более тяжелым изотопным составом углерода на уровне башкирского яруса (3.4–3.8‰) по сравнению с серпуховским (1.5–3.4‰), но изотопный состав кислорода варьирует в широких пределах 23.1–30.5‰, причем наибольшие значения характерны для верхов серпуховского яруса. Не до конца понятно, с чем связан тренд уменьшения значений $\delta^{13}C$ (от 2.6 до –0.5‰) и $\delta^{18}O$ (от 26.4 до 24.7‰) в известняках вблизи границы отделов в разрезе на р. Бол. Кизил. Возможно, имело место опреснение бассейна в связи с его изоляцией от Мирового океана, но более вероятно влияние гипергенных процессов.

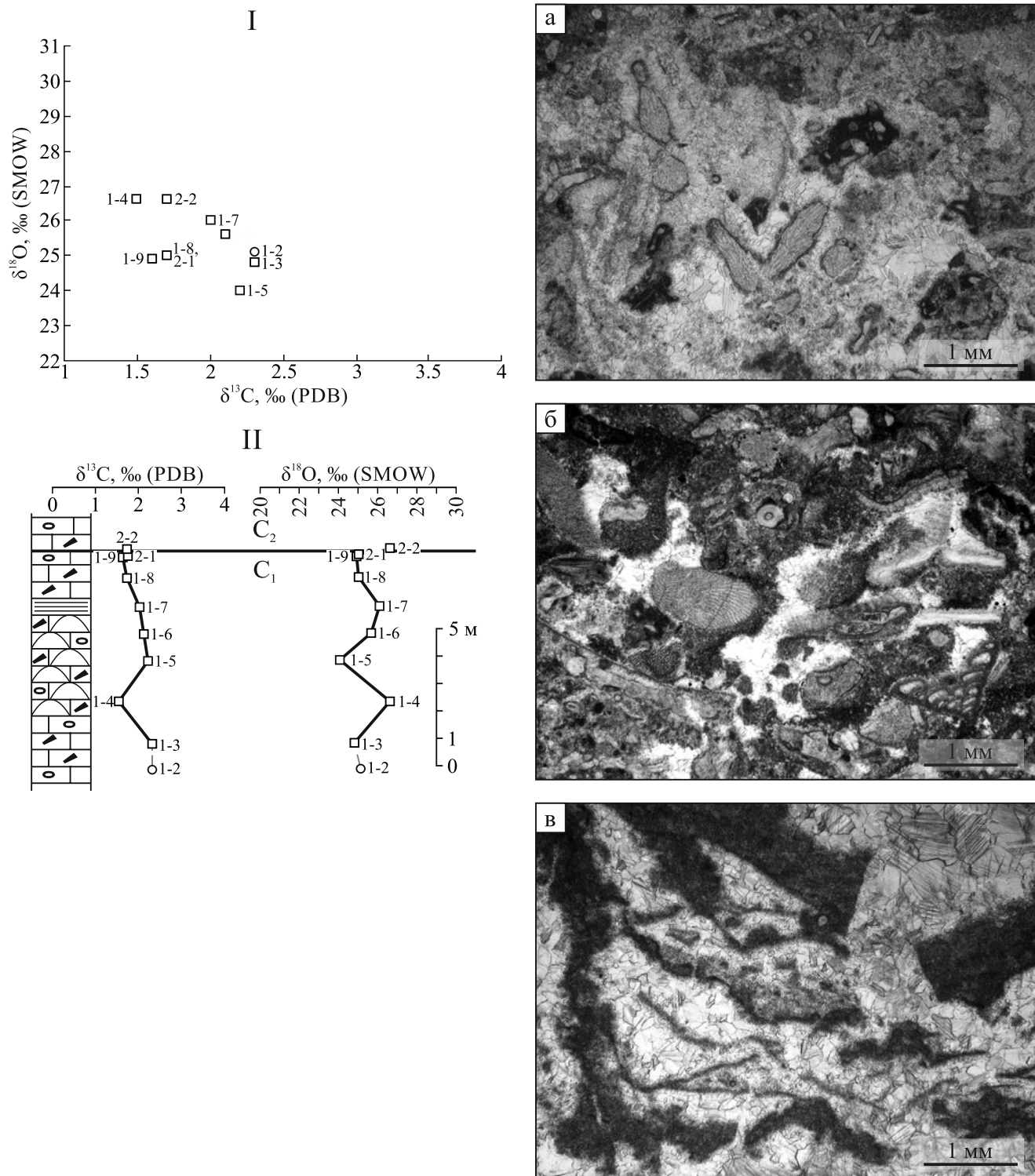


Рис. 5. Изотопный состав углерода и кислорода в известняках пограничного серпуховско-башкирского интервала разреза “Луговая”.

Известняки: а – биоморфные и с обломками различного генезиса, C_1 (обр. 3176-1-6); б – полибиокластовые C_2 (обр. 3176-2-2); в – перекристаллизованные микробалиты (обр. 3176-1-7). Условные обозначения – см. рис. 2.

Fig. 5. Carbon and oxygen isotopic composition in limestones of the Mid-Carboniferous boundary interval in “Lugovaya” section.

Limestones: а – boundstones and with different allochemes, C_1 (sample 3176-1-6); б – bioclastic (sample 3176-2-2); в – recrystallized microbialites (sample 3176-1-7). Legend – see Fig. 2.

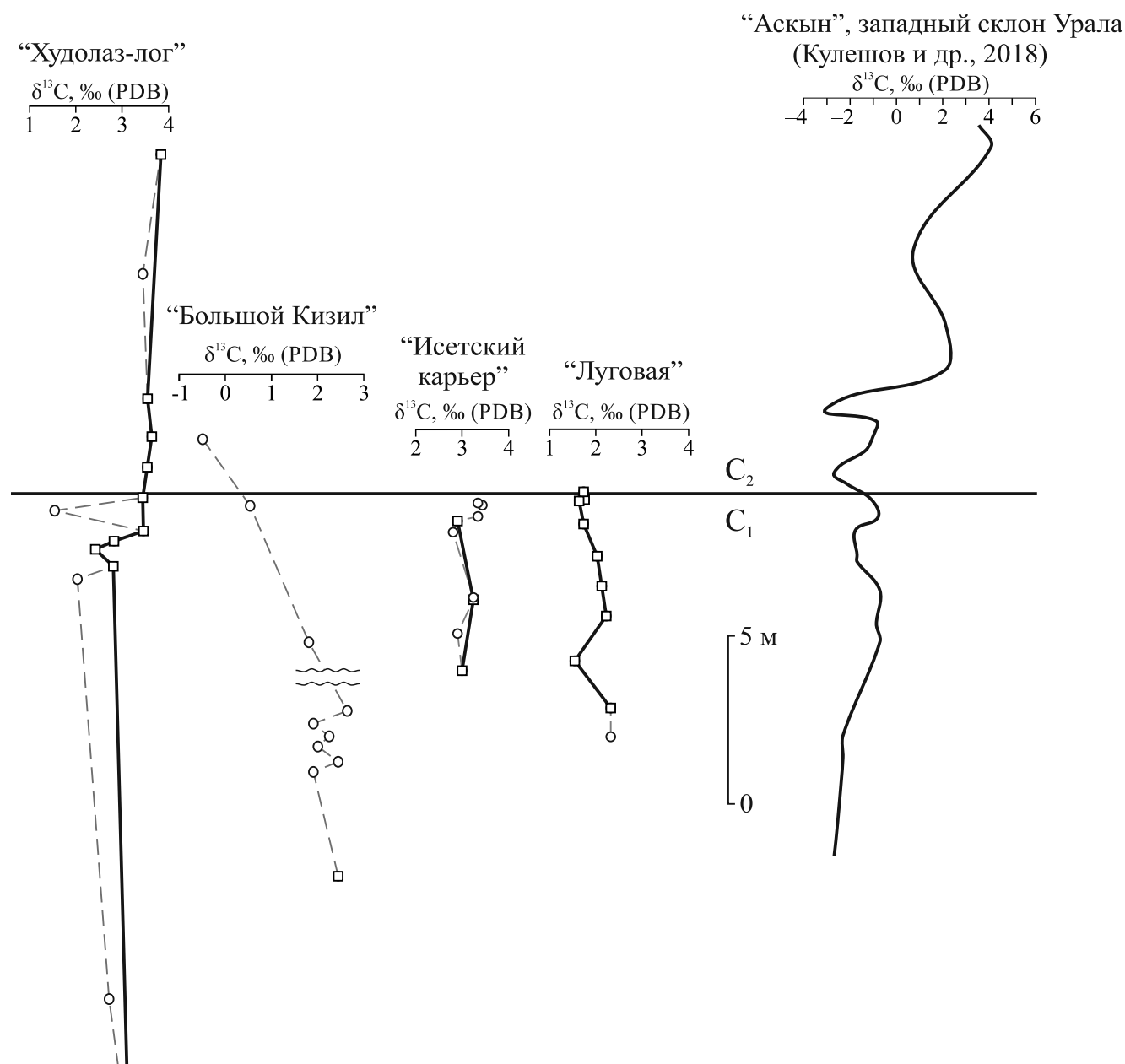


Рис. 6. Вариации изотопного состава углерода в разрезах пограничного нижне-среднекаменноугольного интервала на восточном склоне Урала (по результатам изотопного анализа валовых проб).

Отложения одинаковой мощности в разных разрезах могли сформироваться в течение различных временных отрезков.

Fig. 6. Variations in carbon and oxygen isotopic composition in the Mid-Carboniferous boundary interval sections on the eastern slope of the Urals (isotopic analysis of bulk samples).

Deposits of the same thickness in different sections could have been formed during the different time periods.

Таким образом, в предположительно наиболее полных разрезах пограничного C_1 - C_2 интервала (на р. Худолаз Южного Урала и на р. Исеть Среднего Урала) фиксируется увеличение значений $\delta^{13}C$ и $\delta^{18}O$ начиная с позднесерпуховского времени. Постепенное утяжеление изотопного состава углерода в верхах нижнего карбона отмеча-

лось также в разрезах Донбасса (Bruckschen et al., 1999; Saltzman, 2003). Для разрезов со стратиграфическим несогласием как на западном, так и на восточном склонах Урала в целом характерен более легкий изотопный состав углерода и кислорода. В частности, в разрезе "Аскын" на западе Южного Урала (по данным В.Н. Кулешова с соавтора-

ми (2018)) изотопный состав углерода в известняках верхов серпуховского яруса достаточно легкий: $\delta^{13}\text{C} = -2.8 \dots -0.7\text{‰}$, а величина $\delta^{18}\text{O}$ составляет 25.5–26.6‰. В основании среднего карбона сохраняются почти такие же значения, но выше по разрезу они возрастают до 4.1 и 30.0‰ соответственно. В лимитотипическом (GSSP) разрезе Arroyo Canyon в Северной Америке вблизи границы миссисипия и пенсильвания обнаружена отчетливая отрицательная аномалия по углероду и кислороду (Saltzman, 2003). При этом в нем также установлено наличие перерывов в осадконакоплении и горизонтов палеопочв (Richards et al., 2002).

С рубежом раннего и среднего карбона связывается катастрофическое понижение уровня Мирового океана, объясняющее стратиграфические перерывы на значительной территории земного шара и приуроченный к ним биотический кризис (Grossman et al., 2002; Алексеев, Реймерс, 2010; Кучева, 2015). По оценкам Ч. Росса и Ю. Росс (Ross, Ross, 1987), амплитуда эвстатических колебаний в позднем палеозое, в том числе на рубеже миссисипия и пенсильвания (серпуховского и башкирского веков), могла составлять 100–200 м. По более скромным представлениям (Naq, Schutter, 2008), максимальная амплитуда таких флуктуаций в начале башкирского века достигала 80 м. С подобными оценками не согласны Е.В. Артюшков и П.А. Чехович (2011), полагающие, что важнейшую роль в образовании стратиграфических перерывов в это время играли поднятия земной коры континентов, а не падения уровня моря. Так или иначе, в условиях регрессий морские фации в пределах шельфов могли сохраняться лишь на ограниченных территориях. По всей видимости, на карбонатонакопление в бассейнах современного западного склона Урала, находящихся в карбоне на восточной окраине Восточно-Европейской платформы, оказывали влияние как падения уровня моря, так и восходящие тектонические движения (благодаря чему на границе нижнего и среднего карбона фиксируются перерывы в осадконакоплении), тогда как в бассейнах восточного склона, представляющего собой палеоокеанический сектор Урала (Пучков, 2010), осадконакопление не прерывалось или прерывалось на очень короткое время (перерыв характерен для разрезов, содержащих органические постройки). Таким образом, гляцио-эвстатические колебания уровня моря характеризовались относительно небольшой продолжительностью. На полноту разрезов восточного склона по сравнению с западным обращали внимание и предыдущие исследователи (Чувазов и др., 1984; Кулагина и др., 2013). При этом признаки ритмичного колебания уровня моря на востоке проявляются в наличии в пограничном $\text{C}_1\text{--C}_2$ интервале фациальнонеоднородных отложений, в частности прослоев строматолитов, характерных как для Южно-

го, так и для Среднего Урала. Так, предполагается (Сапурин, Степанова, 2016), что мелководные последовательности с пластами микробиалитов, обнажающиеся на р. Худолаз, формировались в полуизолированном бассейне, при регрессиях превращающемся в лагуну. Сходным образом в карьере “Уралнеруд” на правом берегу р. Исеть преимущественно тонко- и микрозернистые известняки чередуются с пачками строматолитоподобных разностей и с брекчиями. Вероятно, осадконакопление здесь происходило в пределах достаточно глубокой шельфовой впадины (Степанова, Кучева, 2009а) или на внешней части карбонатного склона.

Несмотря на то что величина $\delta^{13}\text{C}$ в осадочных карбонатах часто зависит от локальных факторов (таких как биологическая продуктивность бассейна, количество поступающей в придонные воды изотопно-легкой углекислоты), результаты наших исследований свидетельствуют о том, что утяжеление изотопного состава углерода в пограничных ниже-среднекаменноугольных отложениях, формировавшихся на восточном склоне Урала, происходило на фоне начавшихся оледенений и вызванных ими колебаний уровня моря. Такой тренд, как правило, объясняется увеличением темпов захоронения изотопно-легкого углерода в составе органического вещества осадочных бассейнов и соответствующим возрастанием количества тяжелых изотопов этого элемента в углекислом газе атмосферы (Bruckschen et al., 1999; Grossman et al., 2002; Кулешов и др., 2018). В частности, в известняках разреза “Худолаз-лог” фиксируются отчетливые синхронные положительные вариации величин $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$. Подобное явление в пограничном интервале в разрезах различных регионов мира описано предыдущими исследователями и свидетельствует о непосредственной взаимосвязи глобальных оледенений и процессов интенсивного захоронения углерода в осадках (Mii et al., 1999, 2001; Brand, Bruckschen, 2002).

Однако вопрос о зависимости положительно-го экскурса величины $\delta^{13}\text{C}$ от накопления органического вещества в континентальных бассейнах на рубеже раннего и среднего карбона до сих пор является дискуссионным, поскольку время интенсивного углеобразования не совсем совпадает с отмеченной изотопной вариацией. В частности, промышленные запасы углей Донбасса и Кузбасса в среднем карбоне сосредоточены значительно выше подошвы башкирского яруса (Егоров, 1960, 1985). В бассейнах Северной Америки угленосные интервалы тоже “отстают” от нее на несколько конодонтовых зон (Peppers, 1996; Saltzman, 2003)⁴. В.И. Давыдов с соавторами (Davydov et al., 2012) отмечают, что поло-

⁴ Нельзя полностью исключать и то, что часть континентальных угленосных отложений могла не сохраниться.

жительные аномалии $\delta^{13}\text{C}$ в карбоне странным образом предшествуют эпохам масштабного углекислого газа, опережая последние на 5–6 млн лет. При этом повсеместно фиксирующийся экскурс на кривой $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ не проявляет какой-либо корреляции с поведением величины $\delta^{13}\text{C}_{\text{орг}}$, которая на границе миссисипия и пенсильвания, по данным Е. Гроссмана с соавторами ([Grossman et al., 2008]), остается практически неизменной (несколько выше –24‰). Общеизвестно, что именно синхронное возрастание этих величин свидетельствует об уменьшении содержания углекислого газа в атмосфере и наступлении оледенений, а имеющийся сценарий, по мнению Я.Э. Юдовича и М.П. Кетрис (2011), может свидетельствовать об обстановках “черносланцевой седиментации”. По этой причине признаки существования аноксидных обстановок, благоприятствующих захоронению большого количества органического вещества, возможно, следует искать в глубоководных разрезах. Такое предположение не противоречит мнению А.И. Конюхова (2015), считающего, что осадки с высоким содержанием сапропелевой органики в периоды резких похолоданий (при снижении уровня моря) могли накапливаться в рифтовых зонах, передовых прогибах, на внешнем шельфе и прилегающих к нему участках континентального склона. Напротив, китайские исследователи недавно пришли к заключению, что раннебашкирское оледенение связано с усилением континентального выветривания, а не с интенсификацией захоронения органического углерода в осадочных бассейнах (Tian et al., 2020). Для выявления взаимосвязей и реконструкции точной хронологии событий, происходивших на рубеже раннего и среднего карбона, требуются дальнейшие детальные исследования.

В восточноуральских разрезах утяжеление изотопного состава углерода носит относительно плавный характер (а не скачкообразный, как в разрезах со стратиграфическим перерывом). Здесь нельзя не отметить, что некоторые из изученных нами верхнесерпуховских стратиграфических уровней на самом деле могут соответствовать нижнебашкирскому подъярсу. Последнее предположение имеет право на существование по следующим причинам: 1) перерывы во многих разрезах по всему миру достаточно значительные, а наибольшие по амплитуде гляцио-эвстатические колебания исследователи коррелируют с подошвой башкирского яруса (Buggisch et al., 2011; Ross, Ross, 1987); 2) в разрезе “Худолаз-лог” граница $\text{C}_1\text{-C}_2$ проводится в кровле верхнего строматолитового пласта, поскольку зональный вид фораминифер в микробиалитах не встречается, что объясняется фаціальным фактором, но с высокой степенью вероятности он может быть обнаружен в прошлое между строматолитами⁵;

3) в разрезах на р. Исеть, несмотря на достаточно полную характеристику верхнесерпуховского уровня по аммоноидеям (Степанова и др., 2001; Nikolaeva et al., 2018), значительный (более 25 м) интервал разреза непосредственно ниже подошвы башкирских брекчий до сих пор остается биостратиграфически слабо охарактеризованным, по одному из прослоев вулканических туфов в его пределах получен U-Pb-изотопный возраст 320 ± 3 млн лет (Мизенс и др., 2017).

Для решения обозначенных проблем необходимо дальнейшее расширенное изучение пограничного ниже-среднекаменноугольного интервала в разрезах на реках Исеть и Худолаз, в том числе комплексные биостратиграфические и хемотратиграфические (C, O, Sr-изотопные) исследования.

ВЫВОДЫ

1. В разрезах пограничного ниже-среднекаменноугольного интервала на восточном склоне Южного и Среднего Урала, которые предположительно являются наиболее полными (“Худолаз-лог” и “Исеть”), известняки серпуховского яруса характеризуются более высокими значениями $\delta^{13}\text{C}$ (1.5–3.8‰) и $\delta^{18}\text{O}$ (23.1–30.7‰), нежели таковые в разрезах со стратиграфическим перерывом ($\delta^{13}\text{C} = -0.5 \dots 2.6\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = 24.0\text{--}26.6\text{‰}$). Отмеченное явление может объясняться как выпадением из геологической летописи определенной последовательности отложений, так и влиянием локальных геологических факторов или вторичными (постседиментационными) преобразованиями.

2. Относительно полные фаціальне-неоднородные разрезы восточного склона, несущие признаки гляцио-эвстатических колебаний уровня моря, свидетельствуют о кратковременном, но постепенном процессе утяжеления изотопного состава углерода атмосферного CO_2 . По имеющимся к настоящему моменту биостратиграфическим данным предполагается, что этот процесс начался еще в позднесерпуховское время.

3. Полученные нами результаты подтверждают идею о тесной взаимосвязи между среднекаменноугольным оледенением и нарушением глобального углеродного цикла, вероятно сопровождавшимся смещением баланса углерода между его основными резервуарами в сторону увеличения объемов захороненного органического вещества в осадочных формациях.

4. В ряде случаев на формирование изотопного состава углерода и кислорода изученных карбонатов могли оказывать влияние локальные факторы, связанные с периодами обмеления и изоляции бассейна (бассейнов?) осадконакопления от Мирового океана, изменением солёности, температур седиментации, характера циркуляции вод.

⁵ Тем не менее для этого прослоя характерны стратиформые ракушки.

Благодарности

Авторы выражают глубокую признательность М.Т. Крупенину и Д.В. Гражданкину за продуктивное обсуждение тонкостей геохимии стабильных изотопов, а также В.В. Черных – за консультации по общим вопросам стратиграфии и проблемам корреляции разрезов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев А.С. (2000) Типизация фанерозойских событий массового вымирания организмов. *Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология*, (5), 6-14.
- Алексеев А.С. (2006) Двучленное деление каменноугольной системы. *Эволюция биосферы и биоразнообразия (к 70-летию А.Ю. Розанова)*. М.: Тов-во науч. изд. КМК, 527-539.
- Алексеев А.С. (2008) Каменноугольная система. Состояние изученности стратиграфии докембрия и фанерозоя России. Задачи дальнейших исследований. *Постановления МСК и его постоянных комиссий. Вып. 38*. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 61-68.
- Алексеев А.С., Реймерс А.Н. (2010) Климат каменноугольного периода и его динамика на Восточно-Европейской платформе и западном склоне Урала. *Геология и нефтегазоносность северных районов Урало-Поволжья. Матер. Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения проф. П.А. Софроницкого*. Пермь: ПГУ, 16-18.
- Артюшков Е.В., Чехович П.А. (2011) Изменения уровня моря и быстрые движения земной коры в платформенных областях в позднем палеозое. *Геология и геофизика*, **52**(10), 1567-1592.
- Вотьяков С.Л., Киселева Д.В., Шагалов Е.С., Чередниченко Н.В., Дерюгина Л.К., Денисов С.А., Чемпапов А.П., Узких С.Э., Орехов А.А. (2006) Мультиэлементный анализ геологических образцов методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на ELAN 9000. *Ежегодник-2005*. Екатеринбург: ИГТ УрО РАН, 425-430.
- Горбунова Н.П., Татарина Л.А. (2015) Многоканальный спектрометр СРМ-35 – новые возможности силикатного рентгенофлуоресцентного анализа. *Ежегодник-2014*. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 235-237.
- Горожанина Е.Н., Пазухин В.Н., Горожанин В.М. (2009) Палеофациальная модель осадконакопления нижнекаменноугольных отложений на Южном Урале. *Типовые разрезы карбона России и потенциальные глобальные стратотипы. Матер. Междунар. полевого совещ.* Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 12-21.
- Егоров А.И. (1960) Пояса углеобразования и нефтегазоносные зоны земного шара. Ростов н/Д.: Изд-во Ростовского ун-та, 184 с.
- Егоров А.И. (1985) Угленосные и горючесланцевые формации Европейской части СССР. Ростов н/Д.: Изд-во Ростовского ун-та, 192 с.
- Иванова Р.М., Яркова А.В., Симонова З.Г., Плюснина А.А. (1972) Разрез по р. Худолаз. *Путеводитель экскурсий по разрезам карбона восточного склона Южного Урала. Магнитогорский синклиниорий*. Свердловск: Изд. УФ АН СССР, 77-109.
- Конюхов А.И. (2015) Черные глины и другие отложения, обогащенные органическим веществом, на окраинах материков в раннем и позднем палеозое. *Вестн. МГУ. Сер. 4: Геология*, (4), 22-33.
- Кузнецов А.Б. (2013) Эволюция изотопного состава стронция в протерозойском океане. Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. СПб.: ИГД РАН, 43 с.
- Кулагина Е.И., Пазухин В.Н., Кочеткова Н.М., Синицына З.А., Кочетова Н.Н. (2001) Стратотипические и опорные разрезы башкирского яруса карбона Южного Урала. Уфа: Гилем, 139 с.
- Кулагина Е.И., Пазухин В.Н., Кочетова Н.Н. (2013) Предложения по обновлению стратиграфической схемы нижнего карбона Урала. *Геологический сборник № 10 ИГ УНЦ РАН*. Уфа: ДизайнПресс, 88-98.
- Кулешов В.Н., Седаева К.М., Горожанин В.М., Горожанина Е.Н. (2018) Гипостратотип башкирского яруса каменноугольной системы (р. Аскын, Башкортостан): литология, изотопные особенности ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$) и условия образования карбонатных пород. *Стратиграфия. Геол. корреляция*, (6), 41-64.
- Кучева Н.А. (2015) Распространение брахиопод в пограничных отложениях нижнего и среднего карбона разреза Бражка (западный склон Среднего Урала). *Бюл. МОИП. Отд. геол.*, **90**(2), 35-50.
- Мизенс Г.А., Бадида Л.В., Степанова Т.И., Кучева Н.А. (2016) Палеокарст на восточном склоне Среднего Урала и граница нижнего/среднего карбона. *Литосфера*, (6), 56-69.
- Мизенс Г.А., Дуб С.А. (2018) Редкоземельные элементы в отложениях карбонатных платформ на рубеже раннего и среднего карбона (Южный и Средний Урал). *Ежегодник-2017*. Тр. ИГТ УрО РАН, вып. 165. Екатеринбург, 136-143.
- Мизенс Г.А., Степанова Т.И., Дуб С.А., Кузнецов А.Б. (2017) Граница нижнего и среднего карбона на востоке Урала по изотопно-геохронологическим данным. *Докл. АН*, **477**(1), 61-66.
- Мизенс Г.А., Степанова Т.И., Кучева Н.А. (2012) Восточные зоны Среднего Урала в карбоне (эволюция бассейнов осадконакопления и особенности палеотектоники). *Литосфера*, (4), 107-126.
- Мизенс Г.А., Степанова Т.И., Кучева Н.А., Коровко А.В. (2007) Фациальные особенности обломочных пород башкирского яруса на восточном склоне Среднего Урала. *Ежегодник-2006*. Екатеринбург: ИГТ УрО РАН, 94-100.
- Пазухин В.Н., Николаева С.В., Кулагина Е.И. (2012) Срединная граница карбона на Южном Урале и в Приуралье. *Палеозой России: региональная стратиграфия, палеонтология, гео- и биособытия. Матер. III Всерос. совещ.* СПб.: ВСЕГЕИ, 169-172.
- Пучков В.Н. (2010) Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 280 с.
- Сапурин С.А., Степанова Т.И. (2016) Микробийальные образования в пограничных серпуховско-башкирских отложениях на восточном склоне Южного Урала (р. Худолаз). *Ежегодник-2015*. Тр. ИГТ УрО РАН, вып. 163. Екатеринбург, 31-36.
- Семихатов М.А., Кузнецов А.Б., Подковыров В.Н., Бартли Дж., Давыдов Ю.В. (2004) Юдомский комплекс стратотипической местности: С-изотопные хемотратиграфические корреляции и соотношение с вендом. *Стратиграфия. Геол. корреляция*, **12**(5), 3-29.
- Степанова Т.И., Кучева Н.А. (2006) Разрез "Худолаз" – стратотип горизонтов субрегиональной схемы ниж-

- некаменноугольных отложений восточного склона Урала. *Литосфера*, (1), 45-75.
- Степанова Т.И., Кучева Н.А. (2009а) Анализ распространения фораминифер и брахиопод в визейско-серпуховских карбонатных отложениях восточного склона Урала. *Верхний палеозой России. Стратиграфия и фациальный анализ. Матер. II Всерос. науч. конф.* Казань: КГУ, 155-157.
- Степанова Т.И., Кучева Н.А. (2009б) Палеонтологическое обоснование горизонтов серпуховского яруса Восточно-Уральского субрегиона в стратотипе по реке Худолаз. *Типовые разрезы карбона России и потенциальные глобальные стратотипы. Матер. Междунар. полевого совещ.* Уфа: ДизайнПолиграф-Сервис, 97-128.
- Степанова Т.И., Кучева Н.А., Школин А.А. (2001) Новые материалы по стратиграфии и аммоноидеям верхнесерпуховских отложений на р. Исеть. *Эволюция жизни на Земле. Матер. II Междунар. симпоз.* Томск: ТГУ, 233-236.
- Сунгатуллин Р.Х., Кулешов В.Н., Кадыров Р.И. (2014) Изотопный состав ($\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$) доломитов из пермских эвапоритовых толщ востока Русской плиты (на примере Сюлеевского месторождения гипса). *Литология и полезн. ископаемые*, (5), 432-442.
- Фор Г. (1989) Основы изотопной геологии. М.: Мир, 590 с.
- Чувазов Б.И. (2000) Палеозойские карбонатные платформы Уральского подвижного пояса и его обрамления (позднедевонские и раннекаменноугольные карбонатные платформы). *Осадочные бассейны Урала и прилегающих районов: закономерности строения и минерализации.* Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 68-87.
- Чувазов Б.И., Иванова Р.М., Колчина А.Н. (1984) Верхний палеозой восточного склона Урала. Стратиграфия и геологическая история. Свердловск: УНЦ АН СССР, 230 с.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П. (2011) Геохимические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия). Сыктывкар: Геопринт, 742 с.
- Banner J.L., Hanson G.N. (1990) Calculation of simultaneous isotopic and trace element variations during water-rock interaction with applications to carbonate diagenesis. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **54**, 3123-3137.
- Brand U., Bruckschen P. (2002) Correlation of the Askyn River section, Southern Urals, Russia, with the Mid-Carboniferous Boundary GSSP, Bird Spring Formation, Arrow Canyon, Nevada, USA: implications for global paleoceanography. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **184**, 177-193.
- Brand U., Veizer J. (1980) Chemical diagenesis of a multi-component carbonate system-1. Trace elements. *J. Sediment. Petrol.*, **50**(4), 1219-1236.
- Bruckschen P., Oesmann S., Veizer J. (1999) Isotope stratigraphy of the European Carboniferous. Proxy signals for ocean chemistry, climate and tectonic. *Chem. Geol.*, **161**, 127-164.
- Buggisch W., Wang X., Alekseev A.S., Joachimski M.M. (2011) Carboniferous-Permian carbon isotope stratigraphy of successions from China (Yangtze platform), USA (Kansas) and Russia (Moscow Basin and Urals). *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **301**(1-4), 18-38.
- Davydov V.I., Cózar P. (2019) The formation of the Alleghenian Isthmus triggered the Bashkirian glaciation: Constraints from warm-water benthic foraminifera. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **531**(B), 108403.
- Davydov V.I., Korn D., Schmitz M.D., Gradstein F.M., Hammer O. (2012) The Carboniferous Period. *The Geologic Time Scale 2012*. (Coord. F.M. Gradstein, J.G. Ogg, M. Schmitz, G. Ogg). N.Y., Elsevier, 603-651.
- Derry L.A., Kaufman A.J., Jacobsen S.B. (1992) Sedimentary cycling and environmental change in the Late Proterozoic: Evidence from stable and radiogenic isotopes. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **56**, 1317-1329.
- Friedman J., O'Neil Y.R. (1977) Compilation of Stable Isotope Fractionation Factors of Geochemical Interest. *US Geol. Surv. Prof. Pap. N 440-KK*. Wash. D.C., Gov. Print. Off., 110 p.
- Interest. *US Geol. Surv. Prof. Pap. N 440-KK*. Wash. D.C., Gov. Print. Off., 110 p.
- Grossman E.L., Bruckschen P., Mii H.-S., Chuvashov B.I., Yancey T.E., Veizer J. (2002) Carboniferous paleoclimate and global change: isotopic evidence from the Russian Platform. *Стратиграфия и палеогеография карбона Евразии.* Екатеринбург, ИГГ УрО РАН, 61-71.
- Grossman E.L., Yancey T.E., Jones T.E., Bruckschen P., Chuvashov B.I., Mazzullo S.J., Mii H.-S. (2008) Glaciation, aridification, and carbon sequestration in the Permo-Carboniferous: The isotopic record from low latitudes. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **268**(3-4), 222-233.
- Haq B.U., Schutter S.R. (2008) A chronology of Paleozoic sea-level changes. *Science*, **322**(5898), 64-68.
- Hoefs J. (2009) Stable Isotope Geochemistry. 6th ed. Berlin, Springer, 293 p.
- Kaufman A.J., Jacobsen S.B., Knoll A.H. (1993) The Vendian record of Sr and C isotopic variations in seawater: Implications for tectonics and paleoclimate. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **120**(3-4), 409-430.
- Knoll A.H., Grotzinger J.P., Kaufman A.J., Kolosov P. (1995) Integrated approaches to terminal Proterozoic stratigraphy: An example from the Olenek Uplift, north-eastern Siberia. *Prec. Res.*, **73**, 251-270.
- Kulagina E.I., Pazukhin V.N., Nikolaeva S.V., Kochetova N.N., Zainakaeva G.F., Gibshman N.B. (2009) Serpukhovian and Bashkirian bioherm facies of the Kizil Formation in the South Urals. *Carboniferous Type Sections in Russia and Potential Global Stratotypes. Southern Urals Session. Proc. Int. Field Meeting Ufa-Sibai.* Ufa, DizainPoligrafServis Publ., 78-96.
- Mii H.-S., Grossman E.L., Yancey T.E. (1999) Carboniferous isotope stratigraphies of North America: implications for Carboniferous paleoceanography and Mississippian glaciation. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **111**, 960-973.
- Mii H.-S., Grossman E.L., Yancey T.E., Chuvashov B., Egorov A. (2001) Isotopic records of brachiopod shells from the Russian Platform-evidence for the onset of mid-Carboniferous glaciation. *Chem. Geol.*, **175**, 133-147.
- Nikolaeva S.V., Mizens G.A., Stepanova T.I., Dub S.A., Kucheva N.A., Kuznetsov A.B. (2018) Uppermost Mississippian (Serpukhovian) ammonoid occurrences in U-Pb dated deposits of the Middle Urals (Iset River). *Cephelopods – present and past. Abstracts.* Morocco, 86-87.
- Ogg J.G., Ogg G.M., Gradstein F.M. (2016) Carboniferous. *A Concise Geologic Time Scale* (Ed. by J.G. Ogg, G.M. Ogg, F.M. Gradstein). Amsterdam, Elsevier, 29-39.
- Peppers R.A. (1996) Palynological correlation of major Pennsylvanian (Middle and Upper Carboniferous)

- chronostratigraphic boundaries in the Illinois and other coal basins. *Geol. Soc. Amer. Mem.*, **188**, 111 p.
- Raymond A., Kelley P.H., Lutken C.B. (1989) Polar glaciers and life at the equator: The history of Dinantian and Namurian (Carboniferous) climate. *Geology*, **17**, 408-411.
- Richards B.C., Lane H.R., Brenckle P.L. (2002) The IUGS Mid-Carboniferous (Mississippian-Pennsylvanian) Global Boundary Stratotype Section and Point at Arrow Canyon, Nevada, USA. *Carboniferous and Permian of the World* (Ed. by L.V. Hills, C.M. Henderson, E.W. Bamber). Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir, **19**, 802-831.
- Rodriguez S. (1984) Carboniferous corals from eastern Cantabrian Mountains: Paleogeographic implications. *Palaeontographica Amer.*, **54**, 433-436.
- Ross C.A., Ross J.R.P. (1985) Carboniferous and Early Permian biogeography. *Geology*, **13**, 27-30.
- Ross C.A., Ross J.R.P. (1987) Late Paleozoic sea level and depositional sequences. *Geology*, **61**, 137-149.
- Saltzman M.R. (2003) The Late Paleozoic ice Age: Oceanic gateway or pCO₂? *Geology*, **31**, 151-154.
- Steuber T., Veizer J. (2002) Phanerozoic record of plate tectonic control of seawater chemistry and carbonate sedimentation. *Geology*, **30**, 1123-1126.
- Tian X., Chen J., Yao L., Hu K., Qi Y., Wang X. (2020) Glacio-eustasy and $\delta^{13}\text{C}$ across the Mississippian-Pennsylvanian boundary in the eastern Paleo-Tethys Ocean (South China): Implications for mid-Carboniferous major glaciation. *Geol. J.*, **55**, 2704-2716.
- Banner J.L., Hanson G.N. (1990) Calculation of simultaneous isotopic and trace element variations during water-rock interaction with applications to carbonate diagenesis. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **54**, 3123-3137.
- Brand U., Bruckschen P. (2002) Correlation of the Askyn River section, Southern Urals, Russia, with the Mid-Carboniferous Boundary GSSP, Bird Spring Formation, Arrow Canyon, Nevada, USA: implications for global paleoceanography. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **184**, 177-193.
- Brand U., Veizer J. (1980) Chemical diagenesis of a multi-component carbonate system-I. Trace elements. *J. Sediment. Petrol.*, **50**(4), 1219-1236.
- Bruckschen P., Oesmann S., Veizer J. (1999) Isotope stratigraphy of the European Carboniferous. Proxy signals for ocean chemistry, climate and tectonic. *Chem. Geol.*, **161**, 127-164.
- Buggisch W., Wang X., Alekseev A.S., Joachimski M.M. (2011) Carboniferous-Permian carbon isotope stratigraphy of successions from China (Yangtze platform), USA (Kansas) and Russia (Moscow Basin and Urals). *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **301**(1-4), 18-38.
- Chuvashov B.I. (2000) Paleozoic carbonate platforms of the Urals and adjacent regions (the late Devonian and early Carboniferous carbonate platforms). *Osadochnye bassейny Urala i prilegayushchikh regionov: zakonomernosti stroeniya i minerageniya* [Sedimentary basins of the Urals and adjacent regions: patterns of structure and minerageny]. Ekaterinburg, IGG UrO RAN, 68-87. (In Russian)
- Chuvashov B.I., Ivanova R.M., Kolchina A.N. (1984) *Verkh-nii paleozoi Vostochnogo sklona Urala. Stratigrafiya i geologicheskaya istoriya* [Upper Paleozoic of the eastern slope of the Urals. Stratigraphy and geological history]. Sverdlovsk, UScTs Akad. Nauk SSSR, 230 p. (In Russian)
- Davydov V.I., Cózar P. (2019) The formation of the Alleghenian Isthmus triggered the Bashkirian glaciation: Constraints from warm-water benthic foraminifera. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **531**(B), 108403.
- Davydov V.I., Korn D., Schmitz M.D., Gradstein F.M., Hammer O. (2012) The Carboniferous Period. *The Geologic Time Scale 2012* (Coord. F.M. Gradstein, J.G. Ogg, M. Schmitz, G. Ogg). N.Y., Elsevier, 603-651.
- Derry L.A., Kaufman A.J., Jacobsen S.B. (1992) Sedimentary cycling and environmental change in the Late Proterozoic: Evidence from stable and radiogenic isotopes. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **56**, 1317-1329.
- Egorov A.I. (1960) *Poyasa ugleobrazovaniya i neftegazonosnye zony zemnogo shara* [Coal belt and oil and gas zones of the Earth]. Rostov-on-Don, Rostov Univ. Publ., 184 p. (In Russian)
- Egorov A.I. (1985) *Uglenosnye i goryucheshlantsevye formatsii Evropeiskoi chasti SSSR* [Coal-bearing and oil shale formations of the European part of the USSR]. Rostov-on-Don, Rostov Univ. Publ., 192 p. (In Russian)
- Faure G. (1989) Principles of isotope geology. Moscow, Mir Publ., 590 p. (In Russian)
- Friedman J., O'Neil Y.R. (1977) Compilation of Stable Isotope Fractionation Factors of Geochemical Interest. *US Geol. Surv. Prof. Pap. N 440-KK*. Wash. D.C., Gov. Print. Off., 110 p.
- Gorbunova N.P., Tatarinova L.A. (2015) SRM-35 multi-channel spectrometer – new features of silicate X-ray

REFERENCES

- fluorescence analysis. *Ezhegodnik-2014*. Ekaterinburg, IGG UrO RAN, 235-237. (In Russian)
- Gorozhanina E.N., Pazukhin V.N., Gorozhanin V.M. (2009) Paleofacial sedimentary model of the Lower Carboniferous deposits in the Southern Urals. *Tipovye razrezy karbona Rossii i potentsial'nye global'nye stratotipy* [Typical sections of the Russian Carboniferous and potential global stratotypes]. Materials of International field meeting. Ufa, DesainPoligrafServis Publ., 12-21. (In Russian)
- Grossman E.L., Bruckschen P., Mii H.-S., Chuvashov B.I., Yancey T.E., Veizer J. (2002) Carboniferous paleoclimate and global change: isotopic evidence from the Russian Platform. *Stratigrafiya i paleogeografiya karbona Evrazii* [Strigraphy and Paleogeography of Eurasian Carboniferous]. Ekaterinburg, IGG UrO RAN, 61-71.
- Grossman E.L., Yancey T.E., Jones T.E., Bruckschen P., Chuvashov B.I., Mazzullo S.J., Mii H.-S. (2008) Glaciation, aridification, and carbon sequestration in the Permo-Carboniferous: The isotopic record from low latitudes. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **268**(3-4), 222-233.
- Haq B.U., Schutter S.R. (2008) A chronology of Paleozoic sea-level changes. *Science*, **322**(5898), 64-68.
- Hoefs J. (2009) Stable Isotope Geochemistry. 6th ed. Berlin, Springer, 293 p.
- Ivanova R.M., Yarkova A.V., Simonova Z.G., Plyusnina A.A. (1972) Section of the Khudolaz river. *Putevoditel' ekskursii po razrezam karbona vostochnogo sklona Yuzhnogo Urala. Magnitogorskii sinklinorii* [Guidebook for tours on the Carboniferous sections of the eastern slope of the Southern Urals. Magnitogorsk synclinorium]. Sverdlovsk, UF Akad. Nauk SSSR, 77-109. (In Russian)
- Kaufman A.J., Jacobsen S.B., Knoll A.H. (1993) The Vendian record of Sr and C isotopic variations in seawater: Implications for tectonics and paleoclimate. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **120**(3-4), 409-430.
- Knoll A.H., Grotzinger J.P., Kaufman A.J., Kolosov P. (1995) Integrated approaches to terminal Proterozoic stratigraphy: An example from the Olenek Uplift, north-eastern Siberia. *Prec. Res.*, **73**, 251-270.
- Konyukhov A.I. (2015) Black shales and other deposits that were enriched in organic matter on the continental margins in the early to late Paleozoic. *Vestn. Moscow Univ. Ser. 4. Geol.*, **70** (4), 286-298. (In Russian)
- Kucheva N.A. (2015) Brachiopod distribution in Lower and Middle Carboniferous boundary interval of section Brazhka (western slope of Middle Urals). *Bull. MOIP. Otd. Geol.*, **90**(2), 35-50. (In Russian)
- Kulagina E.I., Pazukhin V.N., Kochetkova N.M., Sinitsyna Z.A., Kochetova N.N. (2001) *Stratotipicheskie i opornye razrezy bashkirskogo yarusa karbona Yuzhnogo Urala* [Stratotype and key sections of the Bashkirian Stage on the Southern Urals]. Ufa, Gilem Publ., 139 p. (In Russian)
- Kulagina E.I., Pazukhin V.N., Kochetova N.N. (2013) Suggestions for updating the Lower Carboniferous Ural stratigraphic scheme. *Geologicheskii sbornik № 10 IG UNTs RAN* [Geological collection number 10 of IG USC RAS]. Ufa, DesignPress Publ., 88-98. (In Russian)
- Kulagina E.I., Pazukhin V.N., Nikolaeva S.V., Kochetova N.N., Zainakaeva G.F., Gibshman N.B. (2009) Serpukhovian and Bashkirian bioherm facies of the Kizil Formation in the South Urals. *Carboniferous Type Sections in Russia and Potential Global Stratotypes*. Southern Urals Session. Proc. Int. Field Meeting Ufa–Sibai. Ufa. DizainPoligrafServis Publ., 78-96. (In Russian)
- Kuleshov V.N., Sedaeva K.M., Gorozhanin V.M., Gorozhanina E.N. (2018) Hypostratotype of the Bashkirian Stage of the Carboniferous System (Askyn River, Bashkortostan): lithology, isotopes ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$) and carbonate depositional settings. *Stratigr. Geol. Correl.*, **26**(6), 686-707.
- Kuznetsov A.B. (2013) Evolution of the isotopic composition of strontium in the Proterozoic ocean. Abstract of DSc. thesis (Geology, mineralogy). St.Petersburg, IGGP of RAS, 43. (In Russian)
- Mii H.-S., Grossman E.L., Yancey T.E. (1999) Carboniferous isotope stratigraphies of North America: implications for Carboniferous paleoceanography and Mississippian glaciation. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **111**, 960-973.
- Mii H.-S., Grossman E.L., Yancey T.E., Chuvashov B., Egorov A. (2001) Isotopic records of brachiopod shells from the Russian Platform-evidence for the onset of mid-Carboniferous glaciation. *Chem. Geol.*, **175**, 133-147.
- Mizens G.A., Badida L.V., Stepanova T.I., Kucheva N.A. (2016) Ancient karst at the eastern slope of the Middle Urals and the Early-Middle Carboniferous boundary. *Lithosfera*, (6), 56-69. (In Russian)
- Mizens G.A., Dub S.A. (2018) Rare-earth elements in carbonate platforms deposits on the Mid-Carboniferous boundary interval (the Southern and Middle Urals). *Ezhegodnik-2017*. Tr. IGG UrO RAN. 165. 136-143. (In Russian)
- Mizens G.A., Stepanova T.I., Dub S.A., Kuznetsov A.B. (2017) Boundary between the Lower and Middle Carboniferous in the Eastern Urals: New isotope–geochronological data. *Dokl. Earth Sci.*, **477**(1), 1251-1255.
- Mizens G.A., Stepanova T.I., Kucheva N.A. (2012) The Middle Urals eastern zones in the Carboniferous (the sedimentary basins evolution and paleotectonics features). *Lithosfera*, (4), 107-126. (In Russian)
- Mizens G.A., Stepanova T.I., Kucheva N.A., Korovko A.V. (2007) Depositional features of clastic rocks of the Bashkirian Stage on the eastern slope of the Middle Urals. *Ezhegodnik-2006*. Ekaterinburg, IGG UrO RAN, 94-100. (In Russian)
- Nikolaeva S.V., Mizens G.A., Stepanova T.I., Dub S.A., Kucheva N.A., Kuznetsov A.B. (2018) Uppermost Mississippian (Serpukhovian) ammonoid occurrences in U-Pb dated deposits of the Middle Urals (Iset River). *Cephalopods – present and past. Abstracts*. Morocco, 86-87.
- Ogg J.G., Ogg G.M., Gradstein F.M. (2016) Carboniferous. *A Concise Geologic Time Scale*. Ed. by J.G. Ogg, G.M. Ogg, F.M. Gradstein. Amsterdam, Elsevier, 29-39.
- Pazukhin V.N., Nikolaeva S.V., Kulagina E.I. (2012) The Mid-Carboniferous boundary at the Southern Urals and Pre-Urals. *Paleozoi Rossii: regional'naya stratigrafiya, paleontologiya, geo- i biosobytiya* [Paleozoic of Russia: Regional stratigraphy, paleontology, geo- and bioevents]. Proc. 3rd All-Russian Conf. St.Petersburg, VSEGEI Publ., 169-172. (In Russian)
- Peppers R.A. (1996) Palynological correlation of major Pennsylvanian (Middle and Upper Carboniferous) chronostratigraphic boundaries in the Illinois and other coal basins. *Geol. Soc. Amer. Mem.*, **188**, 111 p.
- Puchkov V.N. (2010) *Geologiya Urala i Priural'ya (aktual'nye voprosy stratigrafii, tektoniki, geodinamiki i metallogenii)* [Geology of the Urals and Cis-Urals (actual problems of

- stratigraphy, tectonics, geodynamics and metallogeny). Ufa, DesainPoligrafServis Publ., 280 p. (In Russian)
- Raymond A., Kelley P.H., Lutken C.B. (1989) Polar glaciers and life at the equator: The history of Dinantian and Namurian (Carboniferous) climate. *Geology*, **17**, 408-411.
- Richards B.C., Lane H.R., Brenckle P.L. (2002) The IUGS Mid-Carboniferous (Mississippian-Pennsylvanian) Global Boundary Stratotype Section and Point at Arrow Canyon, Nevada, USA. *Carboniferous and Permian of the World*. Ed. by L.V. Hills, C.M. Henderson, E.W. Bamber. Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir, **19**, 802-831.
- Rodriguez S. (1984) Carboniferous corals from eastern Cambrian Mountains: Paleogeographic implications. *Palaeontograph. Amer.*, **54**, 433-436.
- Ross C.A., Ross J.R.P. (1985) Carboniferous and Early Permian biogeography. *Geology*, **13**, 27-30.
- Ross C.A., Ross J.R.P. (1987) Late Paleozoic sea level and depositional sequences. *Geology*, **61**, 137-149.
- Saltzman M.R. (2003) The Late Paleozoic ice Age: Oceanic gateway or pCO₂? *Geol.*, **31**, 151-154.
- Sapurin S.A., Stepanova T.I. (2016) Microbial structures in the Mid-Carboniferous boundary interval deposits on the eastern slope of the Southern Urals. *Ezhegodnik-2015*. Tr. IGG UrO RAN V. 163, 31-36. (In Russian)
- Semikhatov M.A., Kuznetsov A.B., Podkovyrov V.N., Bartli J., Davydov Yu.V. (2004) The Yudoma complex of the stratotype area: C-isotope chemo-stratigraphic correlations and a respect to the Vendian. *Stratigr. Geol. Korrel.*, **12**(5), 3-29. (In Russian)
- Stepanova T.I., Kucheva N.A. (2006) Section "Khudolaz" – the Regional Substages stratotype of the Lower Carboniferous subregional scheme for the eastern slope of the Urals. *Lithosfera*, (1), 45-75. (In Russian)
- Stepanova T.I., Kucheva N.A. (2009a) Analysis of foraminifers and brachiopods distribution in Visean-Serpukhovian carbonate deposits on the eastern slope of the Urals. *Verkhniy paleozoi Rossii. Stratigrafiya i fatsial'nyi analiz* [Upper Paleozoic of Russia. Stratigraphy and facies analysis]. Proc. 2nd All-Russian Conf. Kazan', Kazan' State Univ. Publ., 155-157. (In Russian)
- Stepanova T.I., Kucheva N.A. (2009b) Palaeontological substantiation of the Serpukhovian stage Regional Substages of the East-Uralian Subregion in the Stratotype section on the Khudolaz river. *Tipovye razrezy karbona Rossii i potentsial'nye global'nye stratotipy* [Carboniferous Type Sections in Russia and Potential Global Stratotypes]. Proc. Int. Field Meeting. Ufa, DesainPoligrafServis Publ., 97-128. (In Russian)
- Stepanova T.I., Kucheva N.A., Shkolin A.A. (2001) New data on stratigraphy and ammonoids of the Upper-Serpukhovian deposits on the Iset river. *Evolutsiya zhizni na Zemle* [The evolution of life on the Earth]. Proc. 2nd Int. Symp. Tomsk, Tomsk State Univ. Publ., 233-236. (In Russian)
- Steuber T., Veizer J. (2002) Phanerozoic record of plate tectonic control of seawater chemistry and carbonate sedimentation. *Geology*, **30**, 1123-1126.
- Sungatullin R.H., Kuleshov V.N., Kadyrov R.I. (2014) Isotopic composition ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$) of dolomites from the Permian evaporite strata of the east part of the Russian Platform (on example of the Syukeeskoe gypsum deposit). *Lithol. Polezn. Iskop.*, (5), 432-442. (In Russian)
- Tian X., Chen J., Yao L., Hu K., Qi Y., Wang X. (2020) Glacio-eustasy and $\delta^{13}\text{C}$ across the Mississippian-Pennsylvanian boundary in the eastern Paleo-Tethys Ocean (South China): Implications for mid-Carboniferous major glaciation. *Geol. J.*, **55**, 2704-2716.
- Votyakov S.L., Kiseleva D.V., Shagalov E.S., Cherednichenko N.V., Deryugina L.K., Denisov S.A., Chempalov A.P., Uzkikh S.E., Orekhov A.A. (2006) Multi-element analysis of geological samples by inductively coupled plasma mass spectrometry using an ELAN 9000. *Ezhegodnik-2005*. Ekaterinburg, IGG UrO RAN, 425-430. (In Russian)
- Yudovich Ya.E., Ketris M.P. (2011) *Geokhimicheskie indikatorы litogeneza (litologicheskaya geokhimiya)* [Geochemical indicators of lithogenesis (lithologic geochemistry)]. Syktyvkar, Geoprint Publ., 742 p. (In Russian)