

Геохимия известняков пограничного интервала нижнего-среднего карбона на Южном и Среднем Урале

Г. А. Мизенс, С. А. Дуб

Институт геологии и геохимии УрО РАН, 620110, г. Екатеринбург, ул. Акад. Вонсовского, 15,
e-mails: mizens@igg.uran.ru; sapurin@igg.uran.ru

Поступила в редакцию 09.12.2021 г., принята к печати 09.02.2022 г.

Объект исследования. Известняки 11 разрезов пограничного интервала нижнего и среднего карбона на Южном и Среднем Урале (9 разрезов на восточном склоне, 2 – на западном). Осадочные последовательности западного склона Урала накапливались в пределах Восточно-Европейской платформы, в то время как восточноуральские карбонатные толщи представляют собой фрагменты карбонатной платформы, формировавшейся в остаточном бассейне Уральского океана. **Материал и методы.** Изучались литологические особенности известняков всех рассматриваемых разрезов, проанализировано распределение редких элементов, а также Al и Fe. **Результаты и выводы.** Уточнены и оценены основные характеристики бассейнов осадконакопления, в том числе редокс-состояние среды, удаленность и состав источников терригенного материала, климатические особенности и влияние эндогенных процессов, в первую очередь вулканизма. Полученные результаты подтверждают точку зрения об отсутствии длительного перерыва в осадконакоплении на уровне границы раннего и среднего карбона и отсутствии катастрофического падения уровня Мирового океана. Нет также признаков значительного похолодания. Геохимические и литологические данные свидетельствуют о локальных кратковременных перерывах, трансформациях обстановок осадконакопления и источников алюмосиликокластической примеси, а также о некоторой гумидизации климата на рубеже раннего и среднего карбона.

Ключевые слова: граница нижнего и среднего карбона, известняки, литофильные элементы, редкоземельные элементы, Южный и Средний Урал, условия осадконакопления

Источник финансирования

Исследования выполнены в рамках темы АААА-А18-118053090044-1 государственного задания ИГГ УрО РАН с использованием оборудования ЦКП “Геоаналитик” ИГГ УрО РАН. Дооснащение и комплексное развитие “Геоаналитик” ЦКП ИГГ УрО РАН осуществляется при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-15-2021-680

Geochemistry of limestones of the Mid-Carboniferous boundary interval in the Southern and Middle Urals

Gunar A. Mizens, Semyon A. Dub

A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of RAS, 15 Akad. Vonsovsky st., Ekaterinburg 620110, Russia,
e-mails: mizens@igg.uran.ru; sapurin@igg.uran.ru

Received 09.12.2021, accepted 09.02.2022

Research subject. Limestones of 11 sections of the Mid-Carboniferous boundary interval in the Southern and Middle Urals were studied. Sections of the western slope of the Urals (2 sections) refer to the East European platform, while the eastern Urals carbonate strata (9 sections) are fragments of the carbonate platform formed in the residual basin of the Ural Ocean. **Material and methods.** The lithological features of limestones of all considered sections were identified, the distribution and main characteristics of 28 trace (rare and scattered) elements, as well as Al and Fe, were studied and analyzed. **Results and conclusions.** The main characteristics of sedimentary basins, including the redox state, terrigenous material provenances, climatic conditions and the influence of endogenous processes, primarily volcanism, were clarified and evaluated. The results confirm the point of view about the short-duration hiatus at the Mid-Carboniferous boundary and the absence of a catastrophic drop in the World Ocean level. There are also no evidences of a significant cooling period. Geochemical and lithological data indicate local unconformities, transformations of sedimentary environments and sources of siliciclastic admixtures, as well as some climate humidization at the Mississippian-Pennsylvanian boundary.

Для цитирования: Мизенс Г.А., Дуб С.А. (2022) Геохимия известняков пограничного интервала нижнего-среднего карбона на Южном и Среднем Урале. *Литосфера*, 22(3), 300-326. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-3-300-326>

For citation: Mizens G.A., Dub S.A. (2022) Geochemistry of limestones of the Mid-Carboniferous boundary interval in the Southern and Middle Urals. *Lithosphere (Russia)*, 22(3), 300-326. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-3-300-326>

Keywords: *Mid-Carboniferous boundary, limestones, lithophile elements, rare earth elements, Southern and Middle Urals, sedimentary environments*

Funding information

The research was carried out in accordance with the State Contract AAAA-A18-118053090044-1 using the equipment of the Collective Use Center "Geoanalyst" of the Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. The retrofitting and integrated development of the Collective Use Center of the Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences is carried out with the financial support of a grant from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Agreement No. 075-15-2021-680

ВВЕДЕНИЕ

Рубеж раннего и среднего карбона занимает особое место в палеозойской истории Земли. Считается, что средняя глобальная температура на этом рубеже опустилась на 10–15 °С, а в южном полушарии началось оледенение (Mory et al., 2008; Алексеев, Реймерс, 2010; Tian et al., 2020), которое привело к резкому понижению уровня Мирового океана и образованию субглобального перерыва в морских толщах (Ross, Ross, 1988; Alekseev et al, 1996; Mii et al, 2001; Махлина и др., 2001; Grossman et al., 2002; и др.), а также к массовому вымиранию организмов (малое массовое вымирание, по А.С. Алексееву (2000)). В последние годы, однако, появилась и другая точка зрения. На основании анализа характера перерывов и их распространения Е.В. Артющков и П.А. Чехович (2011) пришли к выводу о том, что крупные регрессии и перерывы в осадконакоплении на этом рубеже в большей степени были обусловлены местными тектоническими движениями, они имели региональный характер. Кроме того, анализ вариаций изотопного состава кислорода свидетельствует о том, что средние температуры водных толщ в миссисипии (раннем карбоне) и пенсильвании (среднем–позднем карбоне) отличались не очень существенно (Grossman, Joachimski, 2019). Таким образом, полученные за последние годы сведения указывают на то, что процессы, происходившие на рассматриваемом рубеже, хотя и оставили след в геологической истории, но этот след не был повсеместным.

Некоторая дополнительная информация была получена в результате анализа геохимических особенностей известняков пограничного нижне-среднекаменноугольного интервала карбонатных разрезов Южного и Среднего Урала. Она позволила оценить и уточнить характер влияния тектонических, магматических, гидрохимических, климатических, фациальных и других факторов на формирование осадочных толщ в это время.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Для получения генетической информации было проанализировано распределение ряда химических элементов в известняках из 9 разрезов восточного склона Южного и Среднего Урала и двух – западного склона (рис. 1). На восточном склоне Южного Урала изучены известняки в бассейне р. Худолаз (разрезы 3159, 3160, 3098), в долине р. Бол. Кизил (3157, 3158) и бассейне р. Янгелька (руч. Таштуй – 3188). На востоке Среднего Урала получены данные по карьере строительных материалов на правом берегу р. Исеть (14, 3162, 3185), а также по известнякам в долинах рр. Реж (3176) и Кунара (3174, 3175). На западном склоне изучены разрезы на Среднем Урале – на р. Чусовой (3186) и на Южном – в бассейне р. Инзер (р. Аскын – 3187). В разных разрезах пробы отбирались с разной детальностью с интервалом от первых десятков сантиметров до нескольких метров. Кроме того, не во всех разрезах возможно было выполнить сквозной отбор проб с переходом через границу серпуховского и башкирского ярусов либо вследствие недостаточной обнаженности (например, в разрезах Бол. Кизил – 3157, Худолаз – 3160 и Таштуй – 3188), либо из-за присутствия грубообломочных образований на границе (в карьерах на р. Исеть – 14, 3162, 3185 и р. Кунара – 3174, 3175), или перемещенных блоков (Чернышевский – 3098). Тем не менее все пробы отобраны в непосредственной близости от границы C_1 - C_2 (в приграничном интервале).

В известняках всех рассматриваемых разрезов изучено содержание и распределение 28 редких элементов, а также Al и Fe. Изучение состава образцов проведено в ЦКП "Геоаналитик" ИГГ УрО РАН (г. Екатеринбург). Концентрации элементов (за исключением Al и Fe) в валовых пробах измерены на ICP-MS спектрометре Perkin Elmer ELAN 9000 (аналитики Д.В. Киселева, Н.В. Чередниченко, Л.К. Дерюгина). Подготовка проб для ICP-MS анализа велась по стандартной методике: навеску массой порядка 100 мг полностью растворяли

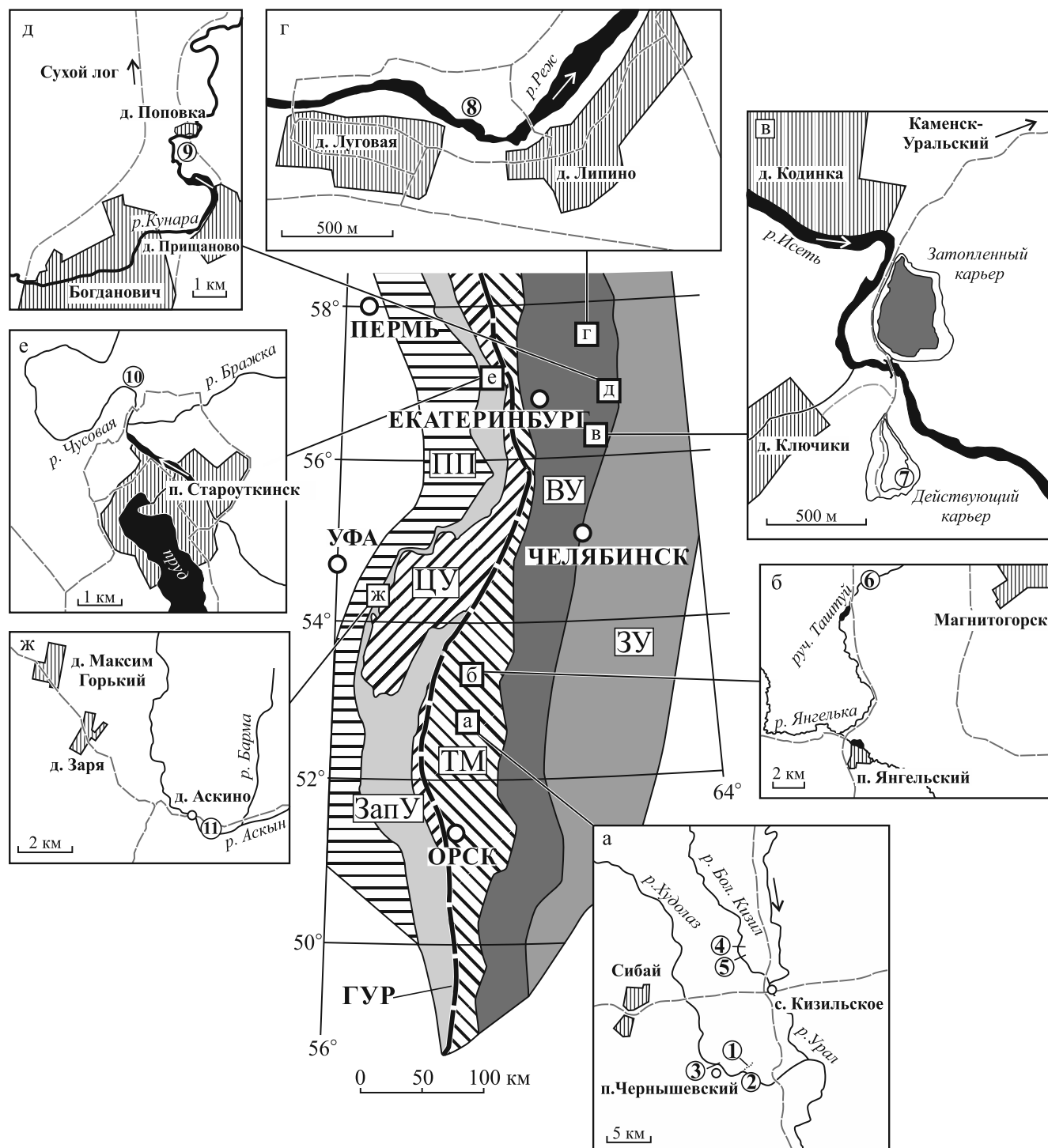


Рис. 1. Разрезы пограничного нижне-среднекаменноугольного интервала и их положение в современной структуре Урала.

Восточный склон Южного Урала: а (1 – Худолаз-лог (3159), 2 – Худолаз (3160), 3 – Чернышевский (3098), 4, 5 – Бол. Кизил (3158 и 3157)), б (6 – Таштуй (3188)), восточный склон Среднего Урала: в (7 – карьер на правом берегу р. Исеть (3162, 3185 и 14)), г (8 – Луговая (3176)), д (9 – Кунара (3174, 3175)); западный склон Среднего Урала: е (10 – Бразжа (3186)); западный склон Южного Урала: ж (11 – Аскын (3187)). 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: а (1 – Khudolaz-log (3159), 2 – Khudolaz (3160), 3 – Chernyshevka (3098), 4, 5 – Bolshoy Kizil (3158 and 3157)), 6 (6 – Tashtuy (3188)); Eastern slope of the Middle Urals: в (7 – quarry on the right bank of the Iset river (3162, 3185 and 14-1)), г (8 – Lugovaya (3176)), д (9 – Kunara (3174, 3175)); Western slope of the Middle Urals: е (10 – Brazhka (3186)); Western slope of the Southern Urals: ж (11 – Askyn (3187)). Section numbers, used for samples marking, are indicated in parentheses. Megazones by (Puchkov, 2010): ЗУ – Transuralian, ВУ – East Uralian, ЦУ – Central Uralian, ЗаУ – West Uralian, ТМ – Tagil-Magnitogorskian, ПП – Cisuralian foredeep, ГУП – Main Uralian fault.

в смеси азотной, соляной и плавиковой кислот во фторопластовых вкладышах в микроволновой печи SpeedWave 3+ (Berghof) с последующим переводом полученных растворов в нитраты. Концентрации Al и Fe были пересчитаны из оксидной формы. Содержания породообразующих оксидов в валовых пробах установлены рентгено-спектральным флуоресцентным методом на спектрометрах CPM-35 и Shimadzu XRF 1800 (аналитики Н.П. Горбунова, Л.А. Татарина, Г.С. Неупокоева, Г.А. Аввакумова).

ЛИТОЛОГИЯ И СТРАТИГРАФИЯ ИЗВЕСТНЯКОВ ПОГРАНИЧНОГО C₁-C₂ ИНТЕРВАЛА

Восточный склон Южного Урала

Известняки в разрезах 3159 и 3160 представлены в основном пакстоунами, форменные элементы которых состоят из биокластов известковых водорослей и кальцимикробов, комков цианобактериальной слизи и прочих компонентов. Встречаются полибиокластовые разности с фораминиферами, обломками водорослей, мшанок, криноидей, раковин брахиопод. Распространены строматолиты. Содержание доломита в этих породах до 3.7%, терригенная примесь практически отсутствует. Граница нижнего и среднего карбона проводится по кровле верхнего строматолитового пласта (Степанова, Кучева, 2006).

В основании разреза 3098 обнажаются слоистые известняки – водорослевые грейнстоуны с небольшим количеством криноидей, раковин брахиопод, обломков мшанок, встречаются пелоиды, содержащие верхнесерпуховские органические остатки (Степанова и др., 2013). Выше залегает крупный (300 × 200 м) смещенный фрагмент биогерма, содержащий серпуховско-раннебашкирский комплекс фауны. Для него характерны разнообразие биогермные структуры, в том числе водорослевые и кальциспонгиевые баундстоуны, а также строматолиты.

В разрезах 3157 и 3158 на р. Бол. Кизил обнажаются неотчетливослоистые биокластовые и целнораковинные брахиоподовые известняки, постепенно сменяющиеся слоистыми тонко- и микрозернистыми породами (Kulagina et al., 2009), в составе которых практически отсутствуют круп-

ные органические остатки. В верхней части разрезов залегают биокластовые брахиоподово-водорослевые известняки. Серпуховско-башкирскую границу Е.И. Кулагина с соавторами проводит в обн. 3158 – в основании слоя пелоидного вакстоуна с редкими обломками брахиопод и иглокожих. Содержание доломита во всех известняках на р. Б. Кизил примерно одинаковое (до 3%), терригенная примесь незначительная.

В основании разреза Таштуй (3188) залегают криноидно-фораминиферовые грейнстоуны. Выше залегающие известняки представлены фасциелловыми разностями с обломками красных водорослей, кальцимикробными сгустками и рассеянными члениками криноидей. Терригенная примесь в них составляет доли процента, количество доломита – до 2.2%. В стратиграфическом отношении разрез соответствует верхней части чернышевского горизонта серпуховского яруса (Иванова, 1988).

Восточный склон Среднего Урала

В карьере на р. Исеть (14, 3162, 3185) массивные карбонатные брекчии залегают на слоистых известняках. В старом, в настоящее время затопленном, карьере (на левом берегу реки), в цементе брекчий были обнаружены фораминиферы башкирского яруса, а также переотложенные верхневизейско-серпуховские формы. Возраст подстилающих их пород (чернышевский горизонт серпуховского яруса) определен на основании находок конодонтов (Степанова и др., 2001) и аммоноидей (Nikolaeva et al., 2018). Большая часть изученных образцов в серпуховской части разреза представлена в разной степени доломитизированными (доля доломита до 46%) и окремненными известняками. Среди неизмененных пород распространены микро-тонкодетритовые вакстоуны с рассеянными архедисцидами, редкими члениками криноидей и неопределимым детритом, а также мелко-тонкобиокластовые пакстоуны с пелоидами и обломками известковых зеленых водорослей. Встречаются перекристаллизованные строматолиты с пленками органического вещества. В составе известняков имеется примесь пирокластиков, но ее количество точно не установлено.

Серпуховская часть разреза на р. Реж (3176) представлена известняками массивными микрозернистыми с рассеянными раковинами брахио-

под, члениками криноидей, фораминиферами, биокластами мшанок, известковых водорослей и кальцимикробов, а также разнообразными интракластами. В основании башкирского яруса известняки отчетливо слоистые от мелко- до грубозернистых, иногда с зернами гравийной размерности. Набор форменных элементов остается примерно таким же, как в серпуховской части, но несколько увеличивается содержание терригенной примеси.

В карьере на р. Кунара (3174, 3175) обнажаются слоистые микрозернистые известняки, предположительно относящиеся к серпуховскому ярусу. Так же, как и на р. Исеть, в них присутствует примесь пирокластиков. Выше по неровной границе залегает известняковая конглобрекция ключевской свиты башкирского яруса.

Западный склон Урала

В разрезе Бражка (3186) на Среднем Урале в верхней части серпуховского яруса, представленного доломитизированными пеллоидными литокластовыми грейнстоунами, прослеживается неровный пласт стриастиферового ракушняка. Кровля его отчетливая, мелкобугристая, некоторые раковины при этом срезаны. Но, поскольку в пограничных комплексах фораминифер сохраняется стандартная зональная последовательность, перерыв мог быть не очень продолжительным. В основании башкирского яруса залегают мелкодетритовые известняки с редкими обломками колоний сиригопор, одиночных ругоз и створок брахиопод. Выше залегают тонко- и мелкобиокластовые вакстоуны без крупных органических остатков. Терригенная примесь незначительная.

В южноуральском разрезе Аскын (3187) верхняя часть серпуховского яруса представлена доломитизированными известняками, толстослоистыми и массивными, с прослоями и линзами известняков органогенно-обломочных и оолитовых с незначительной примесью терригенного материала. Известняки содержат остатки брахиопод, встречаются раковины фораминифер, таллиты донецелл, членики криноидей, остракоды. Разрез этого интервала завершается крупнораковинным стриастиферовым ракушником мощностью около 3.5 м. На его неровной мелкобугорчатой поверхности залегает пачка микрозернистых светло-серых известняков, доломитов и доломитизированных известняков, чередующихся с оолитовыми разностями. Согласно Е.И. Кулагиной с соавторами (2001), эти породы относятся уже к башкирскому ярусу.

В ряде описанных разрезов граница между серпуховским и башкирским ярусами точно установлена по органическим остаткам. Это два разреза на западном склоне – Бражка (3186) и Аскын (3187), два разреза на восточном склоне Южного Урала – на рр. Худолаз (3159) и Бол. Кизил (3158), на

востоке Среднего Урала – разрез Луговая на р. Реж (3176) и карьеры на берегах рр. Исеть (3162, 3185, 14) и Кунара (3174, 3175).

По данным рентгенофлуоресцентного анализа и результатам изучения шлифов, в большинстве изученных разрезов содержание терригенной примеси в известняках варьирует от долей процента до первых процентов (за исключением разрезов на рр. Исеть и Кунара, где примесь пирокластиков превышает 10%). Специальное изучение терригенной примеси не проводилось.

В разрезах западного склона Урала на границе серпуховского и башкирского ярусов по литологическим признакам прослеживается кратковременный перерыв в осадконакоплении. В разрезах Луговая (3176), Бол. Кизил (3158), а также в карьерах на рр. Исеть (3162, 3185, 14) и Кунара (3174, 3175) имеет место смена литотипов известняков, при этом в первых двух разрезах также присутствуют признаки кратковременного перерыва (Дуб и др., 2020). В разрезе Худолаз-лог (3159) выраженный перерыв, скорее всего, отсутствует. В обн. 3157, 3098 и 3188 граница точно не установлена.

При этом следует иметь в виду, что разрезы западного склона Урала (Бражка и Аскын) относятся к Волго-Камской эпиконтинентальной карбонатной платформе, на которую уральские коллизионные процессы существенного влияния не оказывали, в то время как восточноуральские карбонатные толщи представляют собой фрагменты карбонатной платформы, формировавшейся в остаточном бассейне Уральского океана, где в раннем–среднем карбоне происходили основные геодинамические события, связанные с развитием Уральского орогена (Пучков, 2010; Мизенс и др., 2012).

ХАРАКТЕР РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОГРАНИЧНОМ C₁-C₂ ИНТЕРВАЛЕ

“Карбонатфильные” элементы (Sr, Mn, Fe). Концентрация и распределение стронция и марганца в изученных разрезах изменчивы (табл. 1), но между известняками нижнего и среднего карбона нет заметной разницы (рис. 2). Так, на восточном склоне Южного Урала (разрезы на рр. Бол. Кизил, Худолаз, Таштуй) содержание стронция колеблется от 50 до 449 г/т в отложениях нижнего карбона и от 73 до 424 г/т – среднего. Причем в разрезах на р. Бол. Кизил содержание этого элемента самое высокое (в среднем 316 г/т). На восточном склоне Среднего Урала (разрезы Исеть, Кунара, Луговая) концентрация его примерно такая же – от 72 до 277 г/т, а наиболее высокая она в известняках башкирского яруса на р. Реж – в среднем 216 г/т. В разрезах западного склона Урала содержание этого элемента несколько отличается – 367–810 г/т

Таблица 1. Содержание ряда химических элементов в известняках пограничного C₁-C₂ интервала, г/т

Table 1. Content of chemical elements in limestones of the Mid-Carboniferous boundary interval, ppm

Разрез		Обр.	Sr	Mn	Al	Zr	Ti	Ba	Li	Rb	Cr	Ni	Co	V	Sc	Th	U	Mo
Бол. Кизил – северный	C ₂	3158-1-6	412.40	18.65	81.20	1.15	5.80	2.92	1.29	0.05	2.32	8.55	1.20	1.00	0.83	0.02	1.58	0.10
		3158-1-5	435.77	21.17	46.36	0.57	5.37	2.63	0.86	0.03	3.63	8.04	1.17	1.02	1.43	0.01	1.60	0.06
	C ₁	3158-1-4	394.51	21.71	75.06	0.82	7.45	2.15	0.86	0.04	2.09	7.71	1.09	0.99	2.88	0.03	2.84	0.07
		3158-1-3	314.32	46.65	77.27	0.70	4.50	2.06	0.69	0.10	1.86	6.40	0.99	4.30	3.65	0.10	6.17	0.17
		3158-1-2	332.28	60.18	102.31	0.61	11.66	2.06	0.47	0.08	4.67	12.90	2.37	10.09	H.o.	0.04	4.03	0.14
		3158-1-1	331.41	26.32	168.08	0.86	6.94	2.51	0.64	0.17	4.89	14.56	2.65	2.03	H.o.	0.02	1.27	0.30
Бол. Кизил – южный	C ₁	3157-2-7	271.98	28.74	111.37	0.90	12.86	2.49	0.56	0.09	6.72	13.30	2.24	2.52	H.o.	0.01	1.47	0.22
		3157-2-6а	242.67	22.76	148.29	1.13	12.85	2.20	0.64	0.13	4.43	14.56	2.03	3.51	H.o.	0.01	2.12	0.22
		3157-2-6	219.42	34.81	90.68	0.65	6.68	3.43	0.43	0.08	6.01	14.37	2.13	2.00	H.o.	0.01	1.41	0.13
		3157-2-4	191.50	23.83	154.61	0.92	13.67	2.12	0.55	0.14	3.98	14.86	1.90	2.54	H.o.	0.01	1.88	0.60
		3157-2-3	245.18	25.34	129.20	0.98	117.87	2.18	0.59	0.12	4.62	16.24	2.18	3.00	H.o.	0.01	2.00	0.31
		3157-2-2	324.46	24.58	171.58	0.90	13.83	2.05	0.48	0.06	7.11	13.48	2.53	3.77	0.45	0.01	1.26	0.35
		3157-2-1а	261.08	28.56	209.46	1.01	18.64	3.11	0.43	0.10	11.28	12.13	1.86	3.15	0.37	0.02	1.27	0.14
		3157-1-1а	449.18	20.90	85.03	0.59	8.24	2.61	0.40	0.08	6.49	10.56	1.58	1.70	0.58	0.00	2.64	0.26
Худолаз и Худолаз-лог	C ₂	3159-10-2	73.14	15.08		0.47	H.o.	1.51	0.35	H.o.	1.91	5.64	0.58	0.41	H.o.	0.01	3.30	0.09
		3159-10-1	142.37	48.29	70.34	1.54	33.39	4.10	3.54	0.03	1.64	12.83	1.70	2.27	0.55	0.02	5.07	0.10
		3159-8-1	78.69	19.84		0.60	2.06	3.37	0.10	H.o.	H.o.	4.45	0.65	0.68	H.o.	0.03	1.56	H.o.
		3159-6-1	198.08	82.69	105.43	0.67	9.81	9.44	1.95	0.06	2.94	9.93	1.78	2.15	0.66	0.02	5.21	0.10
	C ₁	3159-5-1	66.04	6.79		0.11	H.o.	0.55	H.o.	H.o.	H.o.	4.88	0.65	2.98	H.o.	0.00	5.53	0.29
		3159-4-2	49.54	28.03		1.09	2.23	1.75	0.07	0.01	H.o.	5.65	0.67	7.13	H.o.	0.02	3.13	0.07
		3159-3-3	64.19	18.78		0.47	5.60	1.04	0.23	0.12	H.o.	6.24	0.83	1.78	H.o.	0.01	3.24	0.02
		3159-3-2	145.36	10.08		H.o.	0.35	0.82	0.06	H.o.	H.o.	6.27	0.82	0.81	H.o.	H.o.	2.68	H.o.
		3159-3-1	127.34	21.23		0.44	1.05	3.45	0.12	H.o.	H.o.	5.95	0.77	0.85	H.o.	0.01	1.12	0.01
		3159-2-6	95.08	17.93		0.58	0.40	2.17	0.12	H.o.	26.11	16.76	0.65	0.81	H.o.	0.02	0.99	0.47
		3159-2-4	103.84	33.28		0.96	6.66	2.65	0.31	0.10	12.63	12.48	0.98	1.49	0.02	0.02	1.96	0.21
		3159-2-1	167.12	43.36	39.92	0.73	1.78	2.05	0.18	H.o.	38.93	23.05	1.45	1.09	0.08	0.01	1.21	0.47
		3159-2-1а	199.99	50.93		0.92	4.12	2.83	0.32	0.03	8.34	12.33	1.23	1.00	0.38	0.01	1.46	0.06
	C ₁	3160-3-1	184.14	54.51	64.33	2.94	8.83	4.55	1.69	0.05	17.03	12.05	2.11	2.70	0.68	0.04	5.73	0.12
		3160-2-1	209.57	37.64	120.57	0.73	5.82	3.19	1.03	0.08	1.68	14.31	1.82	2.19	0.33	0.01	10.55	0.05
		3160-1-1	178.31	111.60	167.19	1.50	7.31	16.61	1.15	0.09	4.61	14.38	2.17	3.71	0.59	0.03	5.19	0.35
Чернышевский	C ₁	3098-12	400.01	64.66	151.81	0.62	7.73	2.98	0.30	0.16	3.08	22.35	2.74	2.51	0.58	0.05	2.23	0.33
		3098-6	125.98	64.02	11.22	0.75	0.95	4.29	0.28	0.01	1.94	23.11	2.85	1.49	0.65	0.02	2.60	0.09
		3098-5	87.20	57.03	79.64	1.08	3.71	3.67	0.25	0.07	2.13	21.96	2.89	3.80	0.81	0.03	5.26	0.16
		3098-4	101.47	58.76	54.40	0.73	2.73	5.90	0.26	0.05	2.67	19.89	2.59	1.59	1.18	0.03	1.77	0.20
		3098-2	102.06	60.06	29.23	0.53	1.38	2.52	0.15	0.01	2.41	20.31	2.63	3.10	0.42	0.00	4.59	0.16
		3098-1	137.43	59.04	67.09	2.12	3.83	3.35	0.24	0.03	5.14	18.24	2.19	5.27	0.44	0.03	2.44	0.26
Таштуй	C ₁	3188-4-1	93.72	72.61	53.29	0.92	12.16	3.45	0.16	0.02	10.89	13.14	1.67	1.13	0.33	0.01	1.25	0.06
		3188-3-2	105.10	69.81	38.40	2.04	13.28	3.77	0.19	0.03	3.92	12.65	1.50	0.87	0.34	0.02	0.42	0.05
		3188-3-1	95.68	123.65	58.86	1.07	50.04	6.79	0.21	0.05	3.26	12.00	1.45	1.97	0.28	0.01	1.43	0.06
		3188-1-2	112.76	123.17	58.96	2.06	25.10	4.21	0.26	0.04	11.78	12.75	1.64	4.16	0.30	0.01	3.11	0.57
		3188-1-1	115.71	140.18	192.59	1.79	15.41	8.67	0.56	0.20	5.07	11.50	1.43	1.45	0.29	0.02	0.52	0.03

Таблица 1. Окончание

Table 1. Ending

Разрез		Обр.	Sr	Mn	Al	Zr	Ti	Ba	Li	Rb	Cr	Ni	Co	V	Sc	Th	U	Mo
Исег. карьер – 2014, 2015	C ₁	3162-8	157.88	22.942		1.32	9.25	1.88	0.63	0.44	H.o.	3.64	0.89	2.73	H.o.	0.08	3.89	0.50
		3162-7	105.31	76.47		6.43	32.14	2.82	2.12	0.60	H.o.	4.42	1.26	2.21	0.09	0.30	1.95	0.25
		3162-6	81.61	49.25		0.59	4.80	14.24	0.36	0.12	H.o.	3.29	0.80	3.82	H.o.	0.03	7.57	0.96
		3162-5	86.14	167.71		1.34	15.28	1.99	2.41	0.24	H.o.	4.79	1.11	1.27	0.09	0.24	0.88	0.11
		3162-4	72.02	136.63		3.15	21.74	0.95	0.73	0.63	0.31	4.95	1.02	3.65	H.o.	0.26	1.07	0.40
		3162-4a	73.74	117.74		2.76	4.43	2.03	0.68	0.67	2.16	4.89	0.64	2.99	0.20	0.28	1.10	0.40
		3162-3	95.49	143.90		1.73	8.13	2.22	0.64	0.10	H.o.	5.99	1.15	0.70	H.o.	0.26	1.21	0.12
		3162-2	83.36	108.03		1.07	11.70	1.40	0.57	0.08	22.82	13.76	1.20	1.55	H.o.	0.05	1.42	1.03
		14-2a	88.61	92.87		9.12	70.92	9.28	4.26	4.03	2.13	5.00	1.19	1.84	0.33	1.42	2.76	0.22
		14-2	85.81	85.11		3.56	10.92	4.78	3.49	3.35	1.13	5.22	0.80	1.68	0.49	1.18	2.35	0.17
		14-1	124.62	42.23		2.45	23.40	4.02	1.56	0.99	H.o.	3.40	1.04	1.10	0.11	0.21	0.70	0.03
Исег. карьер – 2016	C ₂	3185-4	396.70	48.52	357.93	0.20	24.32	7.59	17.04	0.56	2.88	16.44	2.21	7.53	0.68	0.00	3.93	0.34
	C ₁	3185-3	205.60	345.29	996.22	2.52	48.21	4.50	4.48	0.43	2.82	16.45	2.77	6.69	0.95	0.05	0.86	0.75
		3185-2	194.42	419.94	1805.85	6.60	75.61	5.80	6.20	1.00	6.95	16.31	4.32	11.00	1.13	0.24	1.27	0.46
		3185-1	210.77	541.27	986.47	2.25	18.15	5.36	5.44	0.65	3.25	19.04	3.71	3.16	1.82	0.26	0.50	0.42
		3185-10	156.76	8.67		0.59	9.61	2.21	3.08	0.07	H.o.	4.89	0.84	3.43	H.o.	0.07	7.43	2.29
		3185-9	44.94	27.09		1.16	12.11	2.27	0.15	0.32	0.29	3.00	0.88	6.27	H.o.	0.07	2.86	0.90
		3185-8	209.72	16.54		1.67	9.25	2.11	0.31	0.25	H.o.	5.09	0.72	4.79	H.o.	0.07	6.18	1.99
Кунара	C ₂	3174-3	95.66	42.58	1740.10	9.02	123.63	7.06	14.77	1.69	24.11	15.03	1.91	14.86	0.97	0.13	6.82	2.46
	C ₁	3175-4	90.19	81.15	344.31	1.56	25.21	2.77	0.96	2.65	26.27	13.44	2.35	11.06	2.55	0.02	0.52	0.17
		3175-3	153.61	208.47	3602.70	13.55	236.77	38.87	6.71	0.29	51.52	26.29	6.24	11.53	0.42	0.57	0.90	0.80
Луговая	C ₂	3176-2-5	276.79	75.34	639.23	3.79	10.30	8.17	16.47	0.36	3.10	16.37	1.27	4.15	0.90	0.18	2.87	0.16
		3176-2-4	235.67	80.65	691.63	4.42	9.50	7.08	11.00	0.51	2.72	15.86	1.26	5.63	1.16	0.13	3.34	0.15
		3176-2-3	228.74	195.79	462.48	1.56	32.71	9.82	3.88	0.46	3.88	15.63	2.40	9.52	0.73	0.01	9.29	0.16
		3176-2-2	201.32	160.46	410.45	2.00	41.20	6.19	3.84	0.48	10.88	16.57	2.40	8.15	0.71	0.02	7.53	0.10
	C ₁	3176-2-1	138.06	182.46	283.43	1.81	20.53	3.70	1.41	0.45	11.81	15.94	2.24	15.65	0.66	0.01	1.69	0.07
		3176-1-9	145.15	152.51	380.12	2.62	26.22	4.89	2.30	0.63	3.20	16.42	2.59	20.11	0.75	0.02	1.81	0.06
		3176-1-8	139.08	119.27	81.12	1.07	6.87	3.34	0.79	0.13	7.47	14.63	1.85	8.86	0.56	0.01	1.57	0.04
		3176-1-7	165.94	125.54	214.67	1.75	16.25	3.79	1.08	0.34	15.61	15.32	2.54	5.95	0.53	0.01	2.08	0.08
		3176-1-6	210.73	126.65	156.48	1.18	9.05	3.35	1.25	0.32	16.84	20.94	2.32	8.85	0.58	0.00	1.78	0.07
		3176-1-5	130.43	145.61	174.61	0.41	10.75	2.99	0.75	0.26	0.84	14.34	1.97	3.28	0.52	0.00	2.15	0.02
		3176-1-4	126.94	91.63	234.74	1.65	25.10	3.24	0.76	0.37	16.89	15.19	2.40	2.12	0.47	0.11	1.31	0.07
		3176-1-3	152.88	100.86	143.94	1.15	10.08	3.22	0.54	0.18	14.29	15.12	2.14	1.76	0.45	0.01	1.42	0.04
		3176-1-2	158.77	86.75	937.38	2.33	37.90	4.03	3.76	0.73	2.01	12.77	1.86	2.43	0.68	0.12	2.48	0.04
Бражка	C ₂	3186-2-4	809.60	11.05	356.96	1.06	17.55	5.72	1.33	0.26	7.94	13.59	1.83	1.98	0.22	0.11	3.13	0.15
		3186-2-3	534.88	12.59	745.91	1.63	39.04	5.50	2.18	0.77	17.84	13.00	2.00	1.93	0.32	0.17	1.75	0.27
		3186-2-2	594.71	15.69	391.87	1.42	22.98	7.33	1.71	0.32	19.53	12.89	2.26	2.48	0.30	0.14	2.91	0.21
		3186-2-1	583.97	16.36	325.33	1.03	14.93	7.88	1.46	0.25	10.84	12.26	2.04	2.39	0.55	0.10	3.98	0.28
	C ₁	3186-1-2	489.58	10.76	145.94	0.64	6.31	6.63	0.71	0.06	10.44	13.76	1.77	0.88	0.22	0.03	0.92	0.12
		3186-1-1	367.29	14.49	157.29	1.00	10.26	7.00	0.72	0.06	9.47	12.29	1.66	1.01	0.23	0.03	0.81	0.19
Аскын	C ₂	3187-4-1	232.17	37.66	216.99	0.71	17.36	1.44	0.25	0.25	7.38	11.13	1.35	2.28	H.o.	0.05	0.89	0.50
	C ₁	3187-3-2	257.10	39.36	71.98	0.85	7.69	1.81	0.26	0.11	7.51	12.23	1.20	1.33	0.28	0.05	0.43	0.09
		3187-3-1	176.26	54.11	59.10	0.93	20.59	1.31	0.17	0.07	2.75	10.33	1.24	1.94	0.28	0.03	0.32	0.07
		3187-2-2	212.04	62.52	93.00	0.77	25.76	2.01	0.25	0.18	7.06	11.37	1.09	2.13	0.31	0.05	0.56	0.19
		3187-1-3	265.34	52.45	68.17	0.46	11.14	1.37	0.32	0.03	1.36	13.09	1.40	1.73	0.35	0.03	0.78	0.14
		3187-1-1	193.55	21.93	235.24	0.75	7.34	2.60	0.58	0.12	1.40	11.93	1.38	1.55	H.o.	0.06	0.58	0.13
Пределы обнаружения. ×10 ⁻³ г/т			3.3	2.8		1.1	50.9	0.1	23.9		31.9	22.6	0.2	28	74	0.01	0.4	7.5

Примечание. Н.о. – не определено, пустые ячейки – измерения содержаний не проводились.

Note. H.o. – not defined, empty cells – no measurements of contents were made.

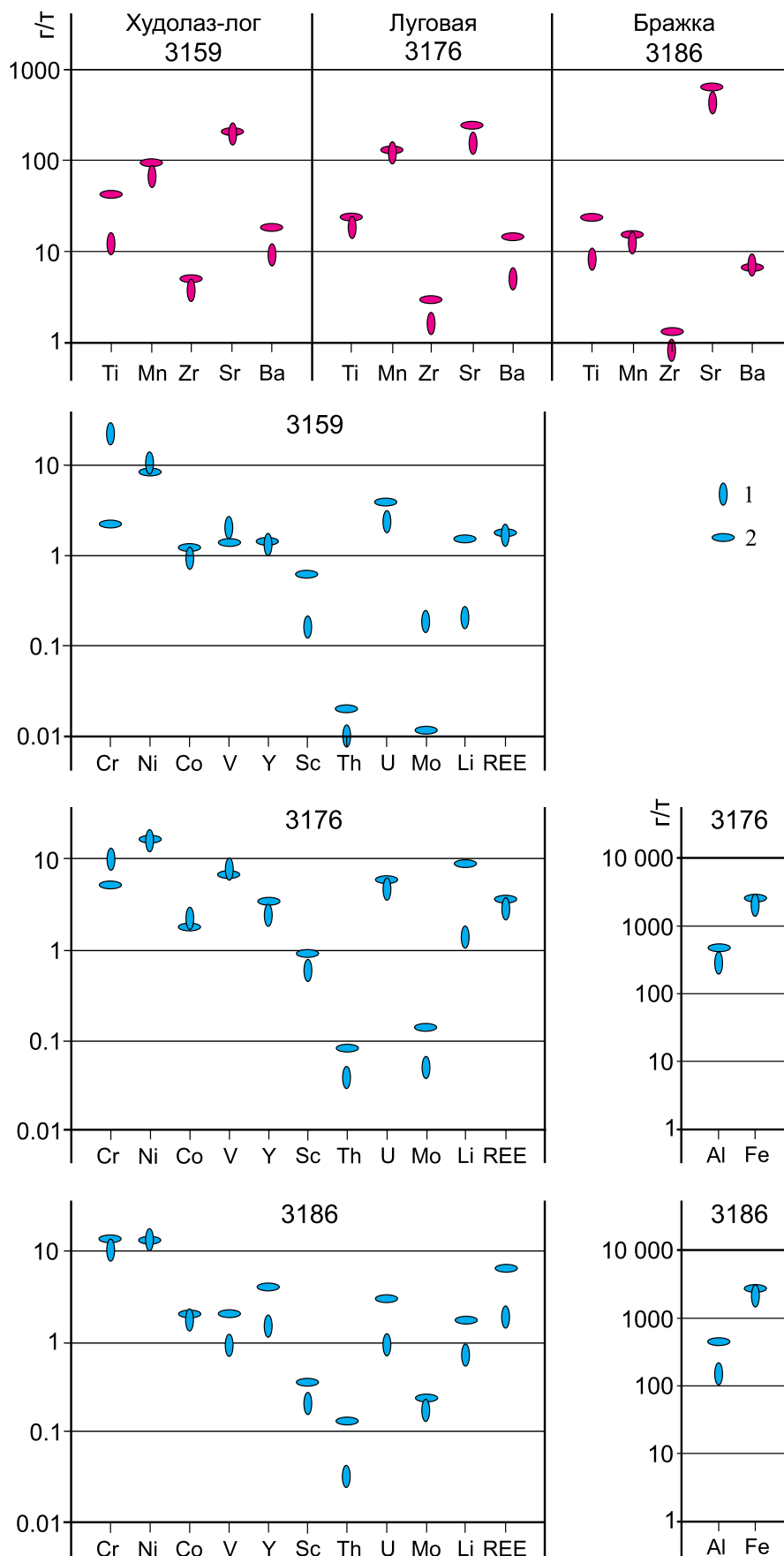


Рис. 2. Среднее (арифметическое) содержание ряда химических элементов в пограничном интервале серпуховского-башкирского ярусов в разрезах, где интервалы опробования наиболее полные и наиболее четко установлена граница: на Южном Урале – Худолаз-лог (3159, восточный склон), на Среднем Урале – Луговая (3176, восточный склон) и Бражка (3186, западный склон).
1 – серпуховский и 2 – башкирский ярусы.

Fig. 2. Average content (arithmetic mean) of some chemical elements in limestones of the Mid-Carboniferous boundary interval of the most complete and well-studied (in biostratigraphy) sections: in Southern Urals – Khudolaz-log (3159, eastern slope), in Middle Urals – Lugovaya (3176, eastern slope) and Brazhka (3186, western slope).
1 – Serpukhovian Stage, 2 – Bashkirian Stage.

(в среднем 563 г/т) на р. Чусовой и 176–265 г/т (в среднем 223 г/т) на р. Аскын. Причем на р. Чусовой в известняках серпуховского яруса содержание Sr – 367–490 г/т, а башкирского – 535–810 г/т.

Распределение марганца в целом менее контрастное (см. табл. 1). На восточном склоне Южного Урала его содержание чаще всего от 7 до 65 г/т (редко до 112 г/т), лишь в нижнекаменноугольных известняках по руч. Таштуй оно несколько выше (70–140 г/т). В то же время на востоке Среднего Урала разброс более существенный. Так, на р. Кунара содержание Mn от 43 до 208 г/т – в разрезе Луговая, 87–182 г/т – в известняках серпуховского яруса и 75–196 г/т – в известняках башкирского. На р. Исеть содержание марганца в неизмененных известняках составляет 9–167 г/т, а в доломитизированных – 345–541 г/т. Для известняков западного склона Урала характерны более низкие содержания этого элемента, особенно на р. Чусовой (11–16 г/т, как у ниже-, так и среднекаменноугольных пород), а на р. Аскын – 22–63 г/т.

Содержание железа в известняках относительно устойчивое по всей изученной территории. Оно, как правило, укладывается в интервал 1400–3800 г/т, встречаются лишь единичные образцы с содержанием его 4800 г/т, а в одном случае (р. Кунара) – 9500 г/т. Только на р. Аскын все образцы содержат железо в пределах 1400–1900 г/т.

Литофильные элементы (Al, Ti, Zr, Ba, Cr, Ni, Co, V, Li, Rb, Sc, Th) в изученных известняках, как правило, характеризуются изменчивым содержанием (см. табл. 1). Тем не менее некоторые закономерности прослеживаются. Так, содержание алюминия в породах Южного Урала (как на восточном, так и на западном склоне) находится в пределах от 11 до 235 г/т, в среднем в разных разрезах – от 80 до 137 г/т. В то же время на Среднем Урале оно существенно выше – средние концентрации варьируют от 290 до 1896 г/т. Причем в разрезах Луговая и Бражка наблюдается заметная разница в содержании этого элемента в известняках нижнего и среднего карбона (см. рис. 2). Соответственно 81–380 (в среднем 290) и 410–692 (в среднем 551) г/т на р. Реж, а в известняках разреза Бражка – 146–157 (в среднем 152) и 325–746 (в среднем 455) г/т.

Сходное распределение характерно для циркония и титана. Так, в южноуральских известняках

(как на восточном, так и на западном склоне) содержание Zr, как правило, не превышает 2 г/т (в среднем по разрезам – 1 г/т), в то время как на Среднем Урале оно колеблется от 0.4 до 9 г/т (в среднем – 2.9 г/т), а на р. Кунара – до 13 г/т. Содержание Ti на Южном Урале колеблется от 1 до 50 (в среднем 11.4), а в среднеуральских известняках – от 4 до 76 (в среднем 19.3) г/т. Только в одном из образцов на р. Кунара содержание Ti 237 г/т. Для обоих этих элементов (Zr и Ti) так же, как и для Al, характерно более высокое содержание в известняках башкирского яруса (но для Zr только на Среднем Урале), а именно: в разрезе Луговая среднее содержание Zr в башкирских известняках – 2.9 г/т, серпуховских – 1.5, в разрезе Бражка соответственно 1.3 и 0.8, в разрезе Худолаз-лог – 0.8 и 0.9 г/т. Среднее содержание Ti в разрезе Луговая – 23.4 и 18.1 г/т, в разрезе Бражка – 23.6 и 8.3, в разрезе Худолаз-лог – 15.1 и 4.0 г/т.

Примерно таким же образом распределены барий, литий, рубидий. В известняках Южного Урала концентрация этих элементов соответственно 1.3–9.4 (средняя 3.2), 0.06–3.5 (средняя 0.7) и 0.01–0.2 (средняя 0.07) г/т. Концентрации их в разрезах Среднего Урала – 2.1–9.8 (средняя 5.6), 0.1–3.8 (средняя 2.9) и 0.07–4.0 (средняя 0.5) г/т. Для этих элементов почти во всех случаях также характерно более высокое содержание в среднекаменноугольных известняках. Так, среднее содержание Ba, Li, Rb в известняках башкирского и серпуховского ярусов на р. Реж соответственно 7.8 и 3.6, 8.8 и 1.4, 0.5 и 0.4 г/т, на р. Бражка – 6.6 и 6.8, 1.7 и 0.7, 0.4 и 0.06 г/т, на р. Худолаз – 4.6 и 2.3, 1.5 и 1.3, 0.05 и 0.05 г/т.

Хром, никель и кобальт (последние два являются не только литофильными, но и халько- и сидерофильными элементами) несколько отличаются характером распределения от описанных выше. Их концентрация в известняках Южного и Среднего Урала близка. Так, средние содержания Cr, Ni и Co на Южном Урале составляют соответственно 5.6, 12.1, 1.6 г/т, а на Среднем Урале – 7.3, 12.4, 1.8 г/т. Кроме того, в ряде случаев в нижнекаменноугольных известняках этих элементов больше, чем в среднекаменноугольных. В частности, в разрезе Худолаз-лог хрома в среднем 15.6 г/т в C₁-интервале и 2.2 г/т в C₂ части разреза, на р. Реж – 9.9 и 5.1 г/т

соответственно, однако на западном склоне (разрез Бражка) содержание этого элемента больше в C_2 -известняках (14.0 г/т) по сравнению с породами нижнего карбона (10.0 г/т). В изменении содержания Ni и Co нет такой строгой закономерности. Никеля в C_1 - и C_2 -известняках соответственно 11.2 и 8.2 г/т (Худолаз-лог), 15.6 и 16.1 г/т (Луговая); кобальта – 1.2 и 1.2 г/т на юге, 2.2 и 1.8 г/т на Среднем Урале. В разрезе Бражка разница в содержании этих двух элементов в отложениях обоих ярусов также незначительная (Ni – 13.0 против 12.9 и Co – 1.7 против 2.0 г/т).

Похожие закономерности характерны и для ванадия, но в упомянутых разрезах восточного склона Урала он в большей степени сконцентрирован в верхней части нижнекаменноугольного интервала, непосредственно вблизи стратиграфической границы (до 7.7 при среднем 1.8 г/т в разрезе Худолаз-лог и до 20.1 при среднем 7.4 г/т в разрезе Луговая). На западном склоне (разрез Бражка) содержание этого элемента выше в C_2 -известняках (в среднем 2.2 г/т) против C_1 -интервала (1.0 г/т).

В изученных известняках фиксируется очень низкое содержание скандия – менее 1 г/т (но оно определялось не во всех образцах) и тория (среднее содержание в породах на Южном Урале – 0.02 г/т, на Среднем – 0.1 г/т).

Наряду с резким изменением содержания некоторых литофильных элементов на границе C_1 - C_2 обращает на себя внимание постепенное снижение их концентрации снизу вверх по южноуральским разрезам. Особенно отчетливо это прослеживается в разрезах на р. Бол. Кизил, где отмечается снижение концентрации Rb, Ti, V, Cr, Co, Ni, но имеет место некоторый рост содержания Li, Sc, $\Sigma PЗЭ$ и Y. Тенденция к увеличению концентрации литофильных элементов снизу вверх проявлена и в разрезе Бражка на р. Чусовой.

Обращают на себя внимание исключительно высокие содержания большинства литофильных элементов в отдельных образцах известняков на р. Кунара.

Уран и молибден. Для известняков изученных разрезов характерна в целом относительно высокая концентрация урана по сравнению с типичными для карбонатных пород значениями в пределах 1.6–2.3 г/т (Смыслов, 1974; Интерпретация..., 2001; Григорьев, 2009). Так, на востоке Южного Урала среднее содержание этого элемента 2.4 г/т с колебаниями в пределах 0.4–6.2 г/т (в одном образце на р. Худолаз даже 10.6 г/т). На востоке Среднего Урала оно почти такое же – 2.8 г/т (колебания 0.5–9.3 г/т). На западном склоне Среднего Урала – 2.2 г/т (колебания 0.8–4.0 г/т), в то время как на юге (р. Аскын) – всего 0.6 г/т (колебания 0.3–0.9 г/т). В известняках C_2 концентрация урана, как правило, выше, чем в породах C_1 . Средняя концентрация на р. Реж соответственно – 5.8 и 1.8 г/т,

на р. Худолаз (Худолаз-лог) – 3.8 и 2.4 г/т, на р. Чусовая – 2.9 и 0.9 г/т.

Среднее содержание молибдена (см. табл. 1) в известняках восточного склона Южного Урала 0.16 г/т (колебания 0.01–0.6 г/т). На восточном склоне Среднего Урала оно 0.33 г/т (колебания в основном 0.02–1 г/т). Лишь у отдельных образцов из разрезов на рр. Исеть и Кунара концентрация этого элемента достигает 2.5 г/т. Существенной разницы в содержании молибдена в породах нижнего и среднего карбона не наблюдается.

Редкоземельные элементы и Y¹. Общее содержание лантаноидов в рассматриваемых известняках (как на Южном, так и на Среднем Урале) чаще всего колеблется в интервале от 0.2 до 8.8 г/т (табл. 2). Лишь в двух разрезах на Среднем Урале встречаются образцы со значительно более высокой концентрацией этих элементов: до – 31.2 г/т в долине р. Исеть, а на р. Кунара в одном образце даже 65.3 г/т, что, вероятнее всего, связано с примесью вулканического пепла. На Южном Урале (р. Худолаз) сумма редкоземельных элементов в известняках C_1 и C_2 примерно одинакова, в то время как на Среднем Урале наблюдается некоторое возрастание среднего суммарного количества РЗЭ на границе нижнего и среднего карбона: с 2.8 до 6.5 г/т в разрезе Луговая и от 1.8 до 6.5 г/т в разрезе Бражка.

При нормировании спектров распределения РЗЭ и Y по постархейскому австралийскому сланцу (РААС) обнаруживается, что углы наклона кривых несколько различаются (рис. 3). Параметр Nd_n/Yb_n , позволяющий оценить этот наклон, в известняках восточного склона Южного Урала варьирует от 0.14 до 0.47 (в среднем 0.25). При этом он практически одинаковый в известняках C_1 и C_2 (средние отношения соответственно 0.25 и 0.22). На восточном склоне Среднего Урала указанное отношение составляет 0.31–0.68 (в среднем 0.48) в разрезе Исетский карьер и 0.2–0.46 (в среднем 0.30) в разрезе Луговая. Обращает на себя внимание, что в разрезе Луговая наклон кривых менее заметный в известняках C_2 (в среднем 0.42), в то время как в породах C_1 он выражен лучше – 0.25. В карбонатных породах, обнажающихся на р. Чусовая (западный склон Среднего Урала), величина Nd_n/Yb_n колеблется от 0.17 до 0.37 (в среднем 0.26), а в породах разреза Аскын – от 0.31 до 0.67 (в среднем 0.45).

Известно, что для морской воды и наследующих ее состав карбонатных фаз рассматриваемая величина изменяется в пределах 0.15–0.5 (Тейлор, Макленнан, 1988; Tostevin et al., 2016; Wallace et al., 2017; Li et al., 2019). Таким образом спектры распре-

¹ По классификации В. Гольдшмидта иттрий относятся к литофильным элементам, но в геохимии карбонатных пород их более целесообразно рассматривать с редкоземельными элементами.

Таблица 2. Содержание редкоземельных элементов и Y в известняках пограничного C₁-C₂ интервала, г/т**Table 2.** REE+Y concentrations in limestones of the Mid-Carboniferous boundary interval, ppm

Разрез		Обр.	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Сумма	Y
Бол. Кизил – северный	C ₂	3158-1-6	0.356	0.303	0.070	0.321	0.076	0.021	0.121	0.018	0.126	0.033	0.125	0.017	0.119	0.018	1.725	1.272
		3158-1-5	0.656	0.407	0.119	0.532	0.112	0.033	0.183	0.029	0.239	0.065	0.222	0.031	0.216	0.033	2.877	2.272
	C ₁	3158-1-4	2.064	0.740	0.342	1.558	0.330	0.079	0.499	0.078	0.541	0.128	0.398	0.056	0.341	0.055	7.208	3.642
		3158-1-3	1.990	0.993	0.365	1.647	0.365	0.097	0.554	0.090	0.651	0.156	0.502	0.070	0.455	0.070	8.006	3.633
		3158-1-2	1.570	0.793	0.252	1.176	0.241	0.062	0.384	0.057	0.400	0.098	0.300	0.041	0.277	0.045	5.696	3.506
		3158-1-1	0.162	0.215	0.030	0.121	0.027	0.010	0.054	0.006	0.056	0.015	0.054	0.006	0.058	0.008	0.823	0.593
Бол. Кизил – южный	C ₁	3157-2-7	0.178	0.231	0.035	0.166	0.028	0.011	0.056	0.007	0.056	0.017	0.069	0.007	0.058	0.010	0.929	0.722
		3157-2-6а	0.126	0.201	0.024	0.104	0.020	0.006	0.035	0.004	0.026	0.008	0.033	0.005	0.027	0.005	0.623	0.366
		3157-2-6	0.117	0.127	0.019	0.087	0.016	0.006	0.033	0.006	0.040	0.011	0.042	0.007	0.038	0.007	0.555	0.669
		3157-2-4	0.115	0.211	0.025	0.103	0.025	0.008	0.034	0.004	0.025	0.007	0.029	0.003	0.028	0.003	0.621	0.333
		3157-2-3	0.127	0.242	0.031	0.129	0.026	0.007	0.035	0.003	0.030	0.006	0.028	0.004	0.025	0.003	0.698	0.298
		3157-2-2	0.099	0.071	0.015	0.064	0.019	0.004	0.040	0.004	0.034	0.010	0.037	0.005	0.032	0.006	0.440	0.714
		3157-2-1а	0.263	0.246	0.041	0.153	0.029	0.009	0.059	0.007	0.057	0.018	0.066	0.008	0.056	0.010	1.022	1.238
		3157-1-1а	0.540	0.185	0.090	0.457	0.128	0.046	0.425	0.043	0.289	0.066	0.209	0.027	0.175	0.027	2.706	2.891
Худолаз и Худолаз-лог	C ₂	3159-10-2	0.279	0.145	0.044	0.190	0.040	0.009	0.060	0.011	0.083	0.020	0.073	0.008	0.071	0.011	1.043	0.656
		3159-10-1	0.469	0.290	0.087	0.421	0.092	0.023	0.142	0.024	0.182	0.049	0.171	0.027	0.174	0.030	2.181	1.795
		3159-8-1	0.397	0.256	0.069	0.288	0.063	0.014	0.098	0.015	0.123	0.028	0.099	0.015	0.090	0.016	1.570	0.931
		3159-6-1	0.537	0.271	0.099	0.466	0.115	0.028	0.166	0.029	0.213	0.061	0.218	0.034	0.214	0.038	2.488	2.164
	C ₁	3159-5-1	0.091	0.198	0.027	0.118	0.035	0.001	0.043	0.008	0.056	0.012	0.040	0.006	0.043	0.006	0.684	0.277
		3159-4-2	0.319	0.211	0.064	0.287	0.061	0.017	0.096	0.015	0.122	0.031	0.118	0.017	0.129	0.021	1.508	1.108
		3159-3-3	0.196	0.329	0.042	0.177	0.035	0.009	0.041	0.007	0.046	0.010	0.034	0.004	0.031	0.006	0.966	0.310
		3159-3-2	0.047	0.047	0.008	0.033	0.009	0.002	0.012	0.002	0.019	0.004	0.016	0.002	0.013	0.003	0.216	0.147
		3159-3-1	0.911	0.376	0.167	0.784	0.170	0.046	0.271	0.044	0.313	0.074	0.256	0.036	0.224	0.035	3.706	2.817
		3159-2-6	0.685	0.306	0.125	0.562	0.130	0.036	0.195	0.031	0.239	0.061	0.193	0.026	0.188	0.029	2.804	2.223
		3159-2-4	0.465	0.295	0.083	0.376	0.082	0.023	0.151	0.022	0.169	0.042	0.135	0.019	0.124	0.019	2.004	1.651
		3159-2-1	0.287	0.145	0.049	0.220	0.040	0.013	0.085	0.014	0.108	0.031	0.103	0.014	0.099	0.015	1.223	1.412
		3159-2-1а	0.349	0.189	0.060	0.253	0.061	0.017	0.103	0.017	0.134	0.036	0.119	0.018	0.113	0.020	1.489	1.746
	C ₁	3160-3-1	0.817	0.346	0.149	0.708	0.154	0.042	0.236	0.037	0.302	0.086	0.293	0.043	0.287	0.048	3.549	2.973
		3160-2-1	0.083	0.085	0.017	0.060	0.019	0.005	0.028	0.004	0.027	0.008	0.029	0.004	0.036	0.006	0.411	0.234
		3160-1-1	0.992	0.410	0.172	0.835	0.185	0.051	0.292	0.044	0.333	0.090	0.277	0.039	0.259	0.041	4.020	3.268
Чернышевский	C ₁	3098-12	0.717	0.578	0.123	0.497	0.105	0.030	0.192	0.026	0.191	0.047	0.141	0.022	0.121	0.019	2.808	1.588
		3098-6	1.311	0.506	0.218	1.004	0.227	0.062	0.430	0.070	0.561	0.147	0.493	0.074	0.492	0.075	5.670	5.291
		3098-5	1.575	0.602	0.270	1.225	0.258	0.069	0.449	0.068	0.522	0.134	0.447	0.061	0.440	0.071	6.193	4.522
		3098-4	2.226	0.671	0.392	1.859	0.406	0.105	0.691	0.095	0.705	0.175	0.552	0.076	0.516	0.080	8.549	5.325
		3098-2	1.244	0.403	0.211	0.954	0.207	0.053	0.330	0.050	0.375	0.095	0.313	0.046	0.281	0.046	4.608	3.451
		3098-1	1.355	0.455	0.217	1.020	0.231	0.057	0.368	0.054	0.399	0.096	0.396	0.042	0.263	0.042	4.994	3.502
Таштуй	C ₁	3188-4-1	0.395	0.145	0.070	0.304	0.062	0.019	0.099	0.017	0.130	0.033	0.110	0.015	0.108	0.018	1.524	1.980
		3188-3-2	0.524	0.169	0.083	0.379	0.084	0.023	0.153	0.024	0.196	0.056	0.193	0.032	0.206	0.033	2.154	3.388
		3188-3-1	0.914	0.131	0.162	0.702	0.121	0.033	0.176	0.028	0.196	0.057	0.184	0.028	0.181	0.026	2.941	3.461
		3188-1-2	0.606	0.259	0.098	0.452	0.104	0.028	0.179	0.027	0.207	0.060	0.225	0.031	0.198	0.034	2.508	3.797
		3188-1-1	0.540	0.331	0.091	0.425	0.100	0.028	0.154	0.022	0.178	0.043	0.138	0.022	0.144	0.019	2.234	2.441

Таблица 2. Окончание

Table 2. Ending

Разрез		Обр.	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Сумма	Y
Исег. карьер – 2014, 2015	C ₁	3162-8	1.556	2.884	0.309	1.184	0.191	0.048	0.252	0.036	0.219	0.051	0.153	0.023	0.182	0.032	7.120	0.924
		3162-7	2.251	2.156	0.479	2.069	0.443	0.099	0.604	0.093	0.618	0.138	0.432	0.062	0.412	0.066	9.923	3.196
		3162-6	0.261	0.283	0.045	0.186	0.040	0.010	0.059	0.008	0.052	0.013	0.042	0.005	0.037	0.006	1.047	0.309
		3162-5	3.717	3.744	0.696	2.816	0.524	0.126	0.720	0.100	0.652	0.143	0.434	0.059	0.375	0.061	14.168	3.330
		3162-4a	2.739	1.754	0.494	2.078	0.413	0.099	0.595	0.084	0.585	0.133	0.417	0.057	0.383	0.062	9.893	3.319
		3162-4	2.429	1.552	0.448	1.883	0.354	0.088	0.507	0.077	0.531	0.122	0.385	0.051	0.342	0.054	8.825	3.315
		3162-3	2.410	1.436	0.376	1.593	0.310	0.076	0.415	0.059	0.395	0.086	0.270	0.035	0.256	0.035	7.753	2.657
		3162-2	1.891	1.177	0.314	1.374	0.269	0.068	0.394	0.058	0.446	0.112	0.375	0.051	0.364	0.057	6.950	3.518
		14-2a	5.338	8.257	1.388	5.487	1.190	0.240	1.441	0.216	1.530	0.342	1.112	0.166	1.157	0.179	28.043	6.792
		14-2	5.220	8.154	1.343	5.427	1.140	0.236	1.380	0.207	1.395	0.308	0.978	0.144	0.983	0.157	27.071	6.118
		14-1	2.740	3.442	0.595	2.432	0.501	0.114	0.688	0.105	0.761	0.188	0.607	0.091	0.618	0.100	12.981	4.064
Исег. карьер – 2016	C ₂	3185-4	0.158	0.247	0.034	0.133	0.028	0.007	0.034	0.004	0.038	0.009	0.029	0.003	0.024	0.004	0.753	0.314
	C ₁	3185-3	3.046	2.339	0.528	2.146	0.448	0.098	0.610	0.090	0.656	0.156	0.508	0.073	0.474	0.076	11.247	7.357
		3185-2	4.077	2.705	0.715	2.946	0.584	0.131	0.766	0.108	0.738	0.169	0.506	0.069	0.413	0.064	13.991	7.115
		3185-1	9.236	5.481	1.689	6.806	1.405	0.326	1.795	0.252	1.640	0.357	1.068	0.141	0.874	0.134	31.204	13.660
		3185-10	0.290	0.505	0.065	0.260	0.048	0.013	0.067	0.008	0.048	0.010	0.032	0.004	0.032	0.004	1.385	0.212
		3185-9	0.364	0.550	0.076	0.322	0.059	0.017	0.091	0.014	0.093	0.021	0.066	0.010	0.057	0.009	1.747	0.512
		3185-8	0.415	0.758	0.096	0.399	0.090	0.013	0.103	0.015	0.084	0.020	0.062	0.009	0.061	0.009	2.133	0.374
Луговая	C ₂	3176-2-5	1.631	1.786	0.328	1.327	0.276	0.055	0.359	0.052	0.366	0.086	0.285	0.039	0.238	0.038	6.866	3.429
		3176-2-4	1.707	1.809	0.337	1.355	0.280	0.058	0.365	0.052	0.374	0.089	0.287	0.040	0.265	0.040	7.056	3.484
		3176-2-3	2.042	1.798	0.326	1.343	0.283	0.065	0.421	0.060	0.435	0.110	0.351	0.052	0.325	0.053	7.665	4.309
		3176-2-2	1.049	1.034	0.218	0.928	0.199	0.045	0.263	0.039	0.260	0.062	0.210	0.029	0.176	0.028	4.541	2.514
	C ₁	3176-2-1	0.584	0.434	0.114	0.483	0.106	0.026	0.145	0.022	0.154	0.038	0.141	0.018	0.123	0.021	2.408	1.769
		3176-1-9	1.040	0.629	0.187	0.802	0.185	0.045	0.272	0.040	0.309	0.078	0.261	0.038	0.254	0.044	4.185	3.618
		3176-1-8	0.588	0.379	0.115	0.519	0.119	0.033	0.197	0.031	0.236	0.061	0.214	0.033	0.215	0.037	2.777	2.743
		3176-1-7	0.572	0.367	0.109	0.491	0.108	0.026	0.155	0.025	0.184	0.051	0.171	0.025	0.166	0.028	2.479	2.308
		3176-1-6	0.605	0.389	0.116	0.507	0.113	0.030	0.184	0.029	0.236	0.062	0.210	0.032	0.215	0.037	2.766	2.690
		3176-1-5	0.596	0.371	0.119	0.527	0.121	0.032	0.192	0.030	0.240	0.060	0.208	0.031	0.197	0.035	2.758	2.289
		3176-1-4	0.424	0.281	0.078	0.335	0.075	0.019	0.108	0.016	0.122	0.032	0.106	0.015	0.100	0.018	1.728	1.386
		3176-1-3	0.475	0.259	0.089	0.380	0.088	0.023	0.140	0.022	0.170	0.043	0.148	0.023	0.155	0.026	2.041	1.969
		3176-1-2	0.846	0.727	0.189	0.857	0.197	0.051	0.259	0.041	0.262	0.067	0.211	0.032	0.220	0.037	3.995	1.980
		Кунара	C ₂	3174-3	0.888	1.441	0.222	0.900	0.200	0.037	0.223	0.032	0.217	0.047	0.146	0.022	0.142	0.022
C ₁	3175-4		0.570	0.828	0.100	0.370	0.067	0.015	0.085	0.011	0.070	0.014	0.043	0.006	0.033	0.005	2.217	22.652
	3175-3		15.824	17.497	3.379	13.118	2.698	0.543	3.202	0.469	3.133	0.702	2.154	0.307	1.942	0.301	65.270	0.492
Бражка	C ₂	3186-2-4	1.850	1.348	0.384	1.806	0.379	0.111	0.630	0.096	0.733	0.188	0.620	0.085	0.519	0.086	8.835	6.108
		3186-2-3	1.609	1.347	0.312	1.362	0.281	0.075	0.413	0.061	0.470	0.119	0.374	0.052	0.309	0.053	6.839	3.780
		3186-2-2	1.006	1.477	0.229	1.012	0.224	0.056	0.283	0.047	0.340	0.096	0.328	0.043	0.282	0.048	5.472	3.125
		3186-2-1	0.932	1.187	0.204	0.880	0.187	0.054	0.268	0.045	0.332	0.088	0.284	0.047	0.278	0.044	4.829	3.215
	C ₁	3186-1-2	0.361	0.413	0.067	0.309	0.064	0.022	0.109	0.019	0.124	0.039	0.145	0.018	0.129	0.020	1.841	1.471
		3186-1-1	0.343	0.317	0.063	0.263	0.054	0.017	0.107	0.017	0.124	0.036	0.206	0.019	0.126	0.021	1.713	1.418
Аскын	C ₂	3187-4-1	1.233	1.960	0.269	1.065	0.237	0.041	0.244	0.036	0.227	0.052	0.167	0.022	0.133	0.020	5.706	1.967
	C ₁	3187-3-2	0.996	1.553	0.232	0.924	0.187	0.035	0.189	0.029	0.206	0.042	0.131	0.019	0.135	0.020	4.698	1.592
		3187-3-1	0.693	0.479	0.120	0.537	0.105	0.028	0.164	0.026	0.181	0.043	0.153	0.020	0.134	0.020	2.702	1.996
		3187-2-2	1.043	1.284	0.199	0.851	0.170	0.045	0.228	0.036	0.248	0.057	0.192	0.029	0.171	0.027	4.580	2.733
		3187-1-3	0.981	0.999	0.214	0.899	0.217	0.053	0.301	0.045	0.326	0.079	0.270	0.039	0.245	0.040	4.709	2.297
		3187-1-1	1.244	1.236	0.269	1.197	0.271	0.067	0.342	0.051	0.352	0.082	0.240	0.039	0.236	0.038	5.664	2.375
Пределы обнаружения. ×10 ⁻³ г/г			0.7	0.9	0.4	0.4	0.5	0.7	0.1	0.1	0.3	0.4	0.3	0.01	0.03	0.1		0.2
Некоторые эталоны	PAAS	38.2	79.6	8.83	33.9	5.55	1.08	4.66	0.774	4.68	0.991	2.85	0.405	2.82	0.433	184.77	27	
	SSW	0.205	0.168	0.044	0.204	0.048	0.014	0.076	0.013	0.096	0.025	0.08	0.012	0.072	0.012	1.07	1.147	

Примечание. Концентрации PЗЭ+Y в PAAS и SSW (морская вода) даны по (Li et al., 2019).

Note. REE+Y concentrations in PAAS and SSW (surface seawater) are given by (Li et al., 2019).

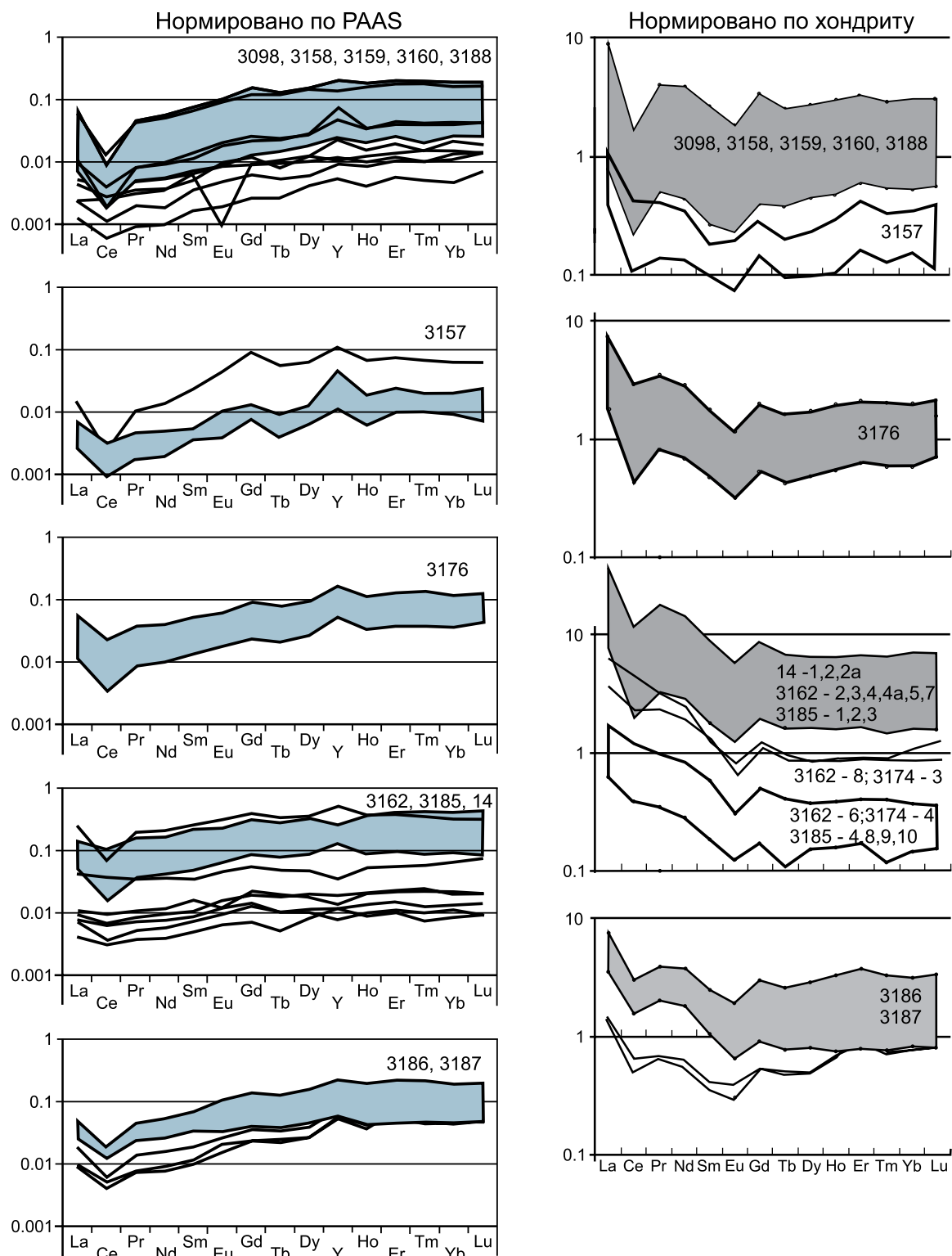


Рис. 3. Нормированные по РААС и хондриту спектры распределения РЗЭ + Y в валовых пробах известняков различных разрезов пограничного ниже-среднекаменноугольного интервала.

Поля с серой заливкой объединяют спектры со сходным характером распределения РЗЭ + Y.

Fig. 3. PAAS and chondrite normalized REE + Y patterns in bulk samples of limestones from different sections of the Mid-Carboniferous boundary interval.

Fields with gray filling combine the similar REE + Y patterns.

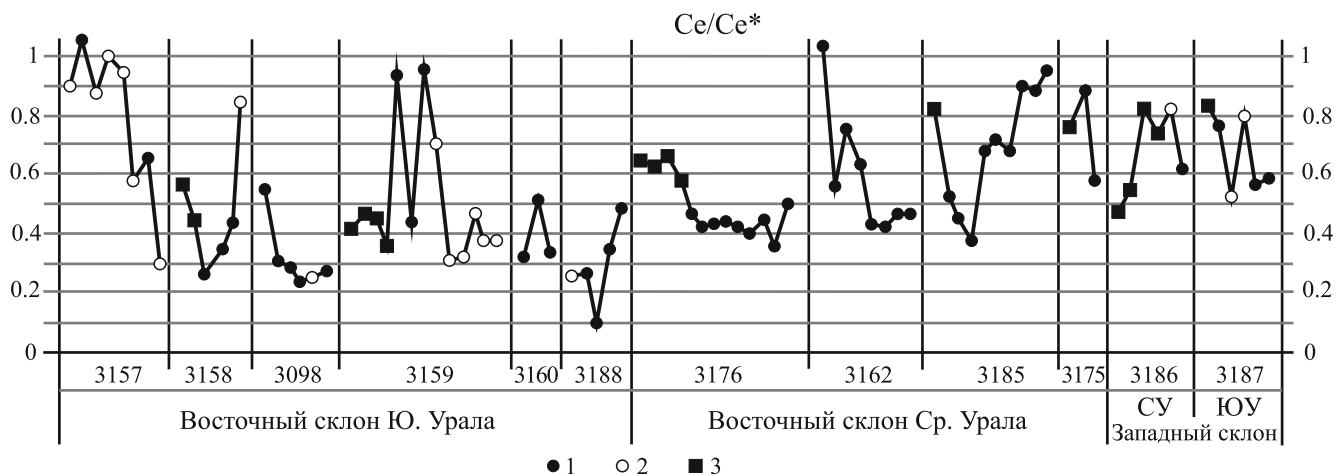


Рис. 4. Величина цериевой аномалии в нормированных по ПААС спектрах распределения РЗЭ.

1, 2 – величина аномалии в отложениях серпуховского яруса: 1 – фазы-носители РЗЭ точно не установлены; 2 – спектры РЗЭ унаследованы от морской воды; 3 – величина аномалии в отложениях башкирского яруса; фазы-носители РЗЭ точно не установлены (СУ – Средний Урал, ЮУ – Южный Урал).

Fig. 4. Magnitude of cerium anomaly by PAAS normalized REE patterns.

1, 2 – magnitude of anomaly in Serpukhovian deposits: 1 – carriers of REE are not fully identified; 2 – distribution of REE corresponds to the seawater pattern; 3 – magnitude of anomaly in Bashkirian deposits, carriers of REE are not fully identified (CY – Middle Urals, IUY – Southern Urals).

деления с преобладанием тяжелых РЗЭ над легкими, типичные для морской воды и образующихся в равновесии с ней карбонатов, более характерны для известняков восточного склона Южного Урала, а также разреза на р. Чусовая и нижнекаменноугольных пород разреза Луговая.

Расчет Се-аномалии в спектрах, нормированных по ПААС, производился по формуле: $Ce/Ce^* = Ce_n / (Pr_n^2 / Nd_n)$ (Lawrence et al., 2006), т.е. без учета содержания La, поскольку для них, как правило, типична положительная аномалия этого элемента (Webb, Kamber, 2000; Ling et al., 2013; Tostevin et al., 2016). Полученные результаты свидетельствуют о том, что отчетливая отрицательная Се-аномалия характерна для известняков всех изученных разрезов (рис. 4). В частности, породы разрезов 3157, 3158, 3159 (восточный склон Южного Урала) характеризуются значительным разбросом данного параметра (0.28–0.90). Глубокие аномалии (0.23–0.55) отмечаются у известняков разрезов 3098 и 3188. Однако для известняков восточного склона Среднего Урала (карьер на р. Исеть, рр. Реж и Кунара) а также западного склона Урала (разрезы Бражка и Аскын) она в целом несколько менее глубокая (0.36–0.90). Лишь у небольшого числа образцов из разрезов восточного склона Южного и Среднего Урала эта аномалия отсутствует или слабо проявлена.

Унаследованные от морской воды спектры распределения нормированных по ПААС лантаноидов в известняках обычно характеризуются положи-

тельной аномалией гадолиния, следовательно, этот элемент не должен учитываться при вычислении величины европиевой аномалии (Webb, Kamber, 2000; Ling et al., 2013; Tostevin et al., 2016), что и отражено в использованном в настоящей работе варианте расчета: $Eu/Eu^* = Eu_n / (Sm_n^2 \times Tb_n)^{1/3}$ (Lawrence et al., 2006). По нему было установлено, что большинство проб полученной выборки обладает положительной европиевой аномалией (рис. 5). Исключение составляют единичные образцы. Но и у них данная аномалия близка к положительной (0.86–0.97). Лишь в одном случае (р. Исеть) была обнаружена аномалия 0.70. Характерно, что у известняков почти всех изученных разрезов разброс аномалии европия небольшой – порядка 0.9–1.3. Пробы с аномалиями в интервале 1.03–1.66 (одна проба 0.94) имеются только на р. Бол. Кизил.

При использовании нормирования спектров по хондриту аномалии церия имеют значения, сходные с теми, которые получены при нормировании по ПААС: подавляющее большинство изученных карбонатов (известняки восточного склона Южного Урала: 3098, 3158, 3159, 3188, а также среднеуральского разреза Луговая) характеризуются существенными отрицательными цериевыми аномалиями (0.2–0.5) – см. рис. 4. Для разрезов Среднего Урала (3162, 3185, 3175), разреза 3157 Южного Урала, а также разрезов западного склона свойственны более пологие аномалии (0.5–0.8).

Eu-аномалия ($Eu/Eu^* = Eu_n / 2(Sm_n + Gd_n)$) при нормировании по хондриту тоже отрицательная.

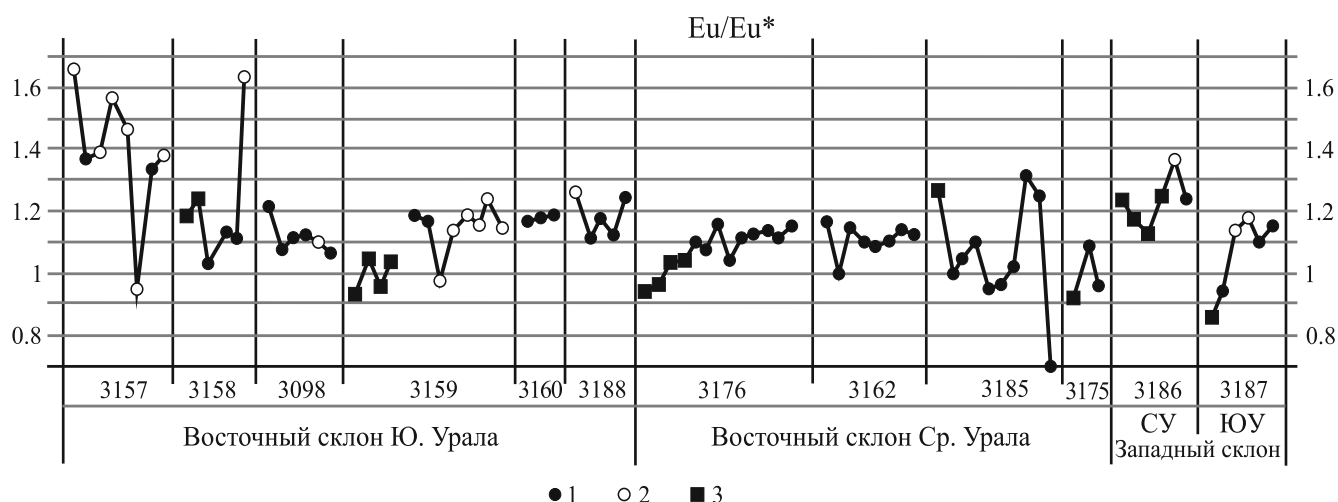


Рис. 5. Величина европиевой аномалии в нормированных по PAAS спектрах распределения РЗЭ.

Условные обозначения – см. рис. 4.

Fig. 5. Magnitude of europium anomaly in PAAS normalized REE patterns.

Legend – see Fig. 4.

Кроме того, для большинства изученных образцов она практически одинаковая (0.6–0.7). Лишь в некоторых разрезах (в основном на востоке Среднего Урала) встречаются еще и более глубокие (до 0.5), и менее выраженные (0.7–0.8) аномалии – см. рис. 3.

ОБСУЖДЕНИЕ

Как известно (Маслов и др., 2018; и др.), редкие и рассеянные элементы попадают в карбонатный осадок как из взвеси, так и непосредственно из морской воды, в которой они находятся в растворенном виде. Оценить вклад того или иного источника можно, используя концентрации этих элементов и соотношения между ними. С этой точки зрения мы проанализировали распределение наиболее характерных элементов, которые могли бы служить индикаторами условий и обстановок осадконакопления для известняков пограничного C_1 – C_2 интервала.

Терригенная и вулканогенная примесь

В качестве индикаторов для оценки состава источников терригенной примеси для рассматриваемых известняков используются элементы, слаборастворимые в морской воде и вследствие этого почти без потерь перемещающиеся из областей сноса в бассейны осадконакопления (Condie, Wronkiewicz, 1990; Condie, 1993; Тейлор, МакЛеннан, 1988; Юдович, Кетрис, 2011; Маслов и др., 2020). Так, высокие содержания Ni, Co, Cr, Sc свидетельствуют (Летни-

кова и др., 2011; Юдович, Кетрис, 2011; Маслов и др., 2018) о том, что почти по всей изученной территории, в том числе и на западном склоне Урала, в известняках имеется примесь частиц магматических пород основного и, вероятно, местами ультраосновного состава. Средние содержания этих элементов в породах восточного склона Южного и Среднего Урала составляют: Ni – 12.8 и 11.8, Co – 1.7 и 1.9, Cr – 6.8 и 9.8, Sc – 0.7 и 0.7 г/т; западного склона: Ni – 11.7 и 13.0, Co – 1.3 и 1.9, Cr – 4.6 и 12.7, Sc – 0.3 и 0.3 г/т (рис. 6). Средние отношения Cr/Zr и Cr/V равны соответственно 7.8–5.0–6.0–11.4 и 4.5–2.0–2.6–7.8. Наблюдается слабая корреляция хрома и кобальта с титаном (0.5 и 0.57) и кобальта с V (0.45) и Al (0.7).

Во всех изученных разрезах хорошо коррелируются между собой средние содержания Ni и Co (0.76), в то время как корреляция хрома с ними слабая (соответственно 0.51 и 0.45). Вероятно, это указывает на незначительное присутствие ультраосновных пород в составе источников терригенного материала. Высокая концентрация хрома имеет место лишь в известняках серпуховского яруса в разрезах Кунара (3174) и Худолаз-лог (3159) – 24 и 51 г/т. Отношение Cr/Ni в этих породах больше единицы (1.0–1.9). Присутствие ультрамафитов в упомянутых источниках сноса можно предположить также по соотношению Cr/Th и Th/Sc (Condie, Wronkiewicz, 1990). Величина Cr/Th в отдельных образцах достигает 1000–3900, а отношение Th/Sc составляет 1.0–1.36. Высокое соотношение Cr/Th встречается также в образцах из разрезов Таштуй и Луговая, но отношение Th/Sc в них низкое (0.03 и ниже), что не предполагает наличия приме-

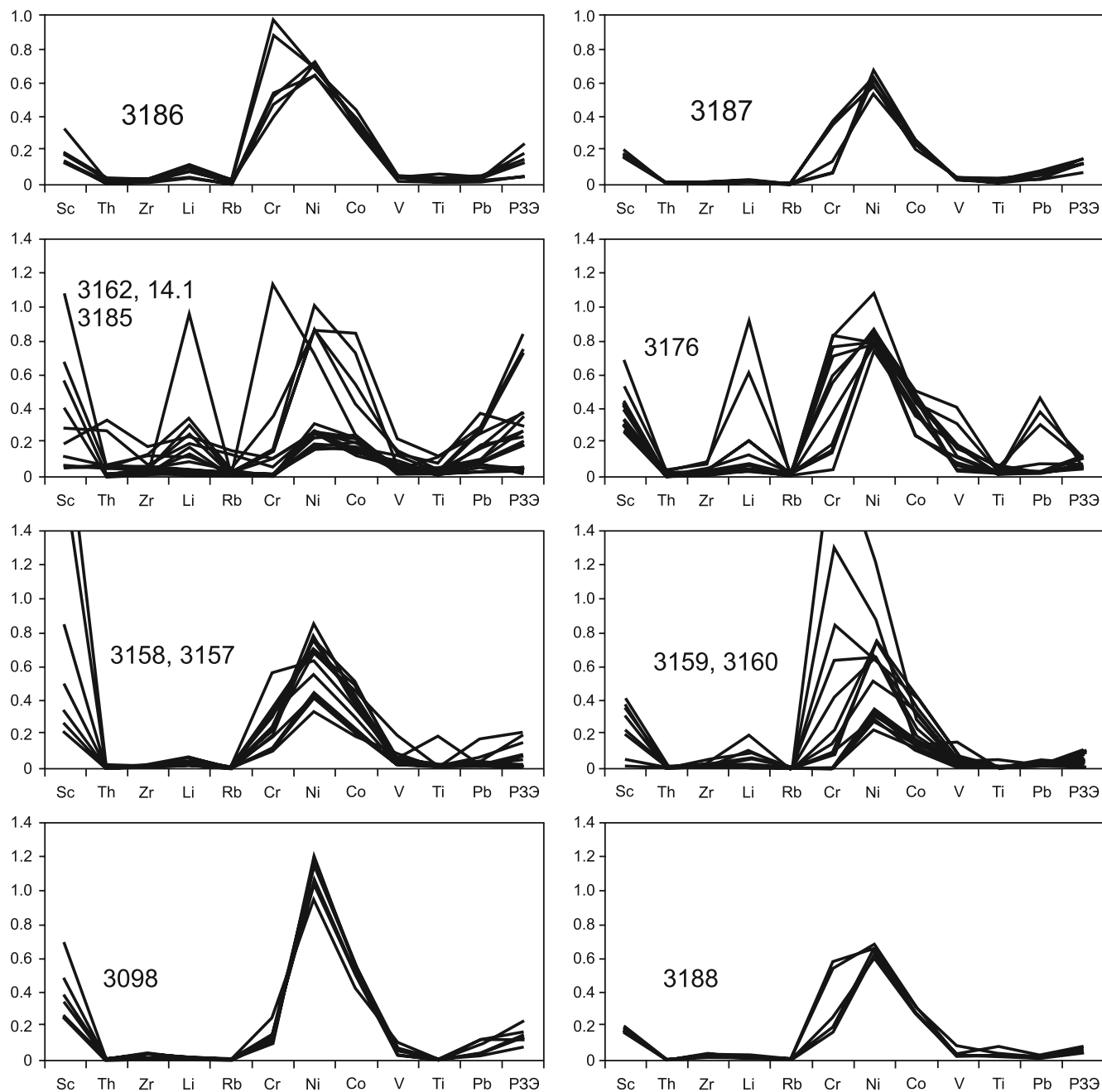


Рис. 6. Спайдер-диаграммы нормированных по кларкам концентраций в известняках (по Н.А. Григорьеву (2009)) ряда литофильных элементов и суммы РЗЭ в валовых пробах из разрезов пограничного нижне-среднекаменноугольного интервала.

Fig. 6. Spider-diagrams of lithophile elements contents and Σ REE values normalized by carbonate concentration clarkes (by N.A. Grigor'ev, 2009) in bulk samples of limestones.

си компонентов ультраосновных пород. В источниках сноса там, скорее всего, преобладали магматиты основного состава (Condie, Wronkiewicz, 1990; Маслов и др., 2020).

По данным, полученным с использованием соответствующих индикаторов, можно сделать вы-

вод, что в известняках восточного склона Среднего Урала источниками терригенной примеси могли быть и магматические породы кислого состава. Средние содержания таких элементов, как Rb, Li, Zr, Σ REE, в этих породах наиболее высокие (соответственно 0.6, 3.3, 2.4, 8.0 г/т), тогда как на вос-

токе Южного Урала концентрация этих элементов составляет 0.07, 0.6, 0.95, 2.6 г/т (рис. 6). О наличии кислых пород в составе источников терригенной примеси свидетельствуют также отношения La/Co , Th/Co , Th/Cr , Th/Sc (Condie, 1993; Интерпретация..., 2001; и др.). На Среднем Урале средние значения этих отношений заметно более высокие (1.6, 0.19, 0.16, 0.86) против 0.44, 0.015, 0.07, 0.08 в известняках Южного Урала. Вероятнее всего, основными поставщиками указанных элементов являлись вулканы, так как в отдельных образцах известняков на рр. Исеть и Кунара наблюдается примесь пирокластического материала. Кроме того, в разрезе на р. Исеть на многих уровнях присутствуют прослои вулканического пепла (Мизенс и др., 2017). На пирокластике указывает и повышенное содержание марганца (Юдович, Кетрис, 2011). Если в известняках Южного Урала его количество в среднем 46 г/т, то на Среднем Урале – 120 г/т (в некоторых образцах из разреза на р. Исеть даже до 400–500 г/т). Такое предположение хорошо согласуется с известной закономерностью, что эксплозивные извержения ассоциируют с лавами кислого состава (Белоусов, 2006; и др.). Обращает на себя внимание, что в разрезе Луговая на Среднем Урале, где имеется хорошо выраженная граница нижнего и среднего карбона, указанные элементы характеризуются несколько более высоким содержанием в известняках башкирского яруса, чем серпуховского (соответственно $\text{Rb} = 0.45$ и 0.38 , $\text{Li} = 8.8$ и 1.4 , $\text{Zr} = 2.9$ и 1.6 ; $\Sigma\text{REE} = 3.5$ и 2.8 г/т) (см. рис. 2). Более высокое содержание в известняках C_2 характерно и для алюминия (в среднем 550 г/т), тогда как в породах C_1 его в среднем 210 г/т. Такая ситуация может указывать и на наличие hiatus, так как во время перерывов в осадконакоплении, как правило, происходят изменения в составе источников сноса (Маслов, 2020).

На востоке Среднего Урала, очевидно, можно предположить еще и наличие вулканического пепла целочного состава. Об этом свидетельствуют такие индикаторы, как Zr , Hf , Nb (Юдович, Кетрис, 2011; и др.). Во многих образцах из разрезов по рр. Исеть, Кунара, а также р. Реж содержание указанных элементов существенно выше, чем в других районах.

Некоторые признаки привноса продуктов разрушения кислых магматических пород имеются и в отложениях на западном склоне Среднего Урала. Здесь средние содержания Rb , Li , Zr , ΣREE также относительно высокие (0.3, 1.4, 1.1, 4.9 г/т), тогда как на юге западного склона – 0.1, 0.3, 0.75, 4.7 г/т. В известняках разреза Бражка, так же как и на восточном склоне, имеет место более высокая концентрация рассматриваемых элементов на уровне башкирского яруса (C_2b и $\text{C}_{1\text{s}}$, соответственно: $\text{Rb} = 0.4$ и 0.06 , $\text{Li} = 1.7$ и 0.7 , $\text{Zr} = 1.3$ и 0.8 , $\Sigma\text{REE} = 6.5$ и 1.8 г/т, $\text{Al} = 455$ и 152 г/т).

На состав терригенной примеси могут указывать и нормированные по хондриту спектры распределения редкоземельных элементов (McLennan et al., 1990; Маслов и др., 2018). Так, о наличии компонентов основных магматических пород в составе примеси свидетельствуют соотношения легких и тяжелых элементов (LPЗЭ/TPЗЭ) менее 4–5 и слабовыраженная отрицательная Eu -аномалия (0.85–0.90 и больше). В то же время на наличие кислых магматических пород в источниках терригенного материала указывает отношение $\text{LPЗЭ/TPЗЭ} > 8$ и отрицательная (< 0.85) Eu -аномалия (McLennan, Taylor, 1991). Однако поставщики терригенного материала в карбонатные отложения карбона Южного и Среднего Урала, скорее всего, не являются однородными, поэтому однозначного вывода (как и по другим индикаторам) получить не удастся. Так, у изученных известняков почти повсеместно отношение $\text{LPЗЭ/TPЗЭ} = 1\text{--}3$, что подтверждает наличие магматических пород основного состава в области размыва. Лишь у нескольких образцов на рр. Исеть и Кунара (Средний Урал), а также на р. Аскын (Южный Урал, западный склон) оно равно 3–4, а в одном даже 5.3. Однако Eu -аномалия у них хорошо выражена (< 0.85). Возможно, это свидетельствует о наличии кислых пород вместе с основными, как это предполагалось выше.

О количестве некарбонатной (в первую очередь терригенной) примеси в известняках может свидетельствовать концентрация тория, так как он практически не встраивается в кристаллическую решетку кальцита. Его носителями в известняках (как и у большинства других осадочных пород) могут быть минералы тяжелой фракции, глинистое вещество и оксигидроксиды (Rogers, Adams, 1969; Смыслов, 1974; Дубинин, Розанов, 2001; Юдович, Кетрис, 2010, 2011). Следовательно, значение параметра $\text{Th/U} < 1$ характерно для чистых осадочных карбонатов (Adams, Weaver, 1958; Фархутдинов и др., 2020). А у всех изученных известняков оно меньше или значительно меньше единицы. Лишь у некоторых образцов с восточного склона Среднего Урала этот индикатор приближается к единице. Таким образом, данное отношение косвенно указывает на удаленность источников терригенного материала.

Климатические условия

Для уточнения палеоклимата на территории источников терригенного материала может быть использовано отношение суммы легких лантаноидов к сумме тяжелых (Шатров, Войцеховский, 2009; Юдович, Кетрис, 2011): $\Sigma\text{PЗЭ}_{\text{Ce}}/\Sigma\text{PЗЭ}_{\text{Y}} = (\text{La} + \text{Ce} + \text{Pr} + \text{Nd} + \text{Sm} + \text{Eu})/(\text{Gd} + \text{Tb} + \text{Dy} + \text{Ho} + \text{Er} + \text{Tm} + \text{Yb} + \text{Lu})$, поскольку чистые карбонаты обогащены тяжелыми PЗЭ относительно глинистых пород, а при гумидизации климата обычно увеличивается поступление алюмосиликокластики с пре-

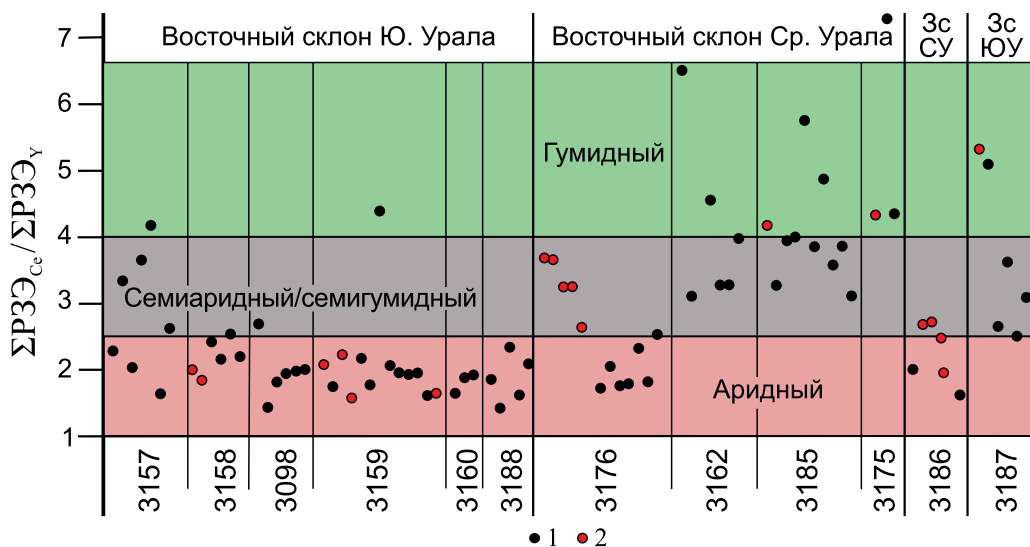


Рис. 7. Положение точек валовых проб ниже- и среднекаменноугольных известняков на диаграмме $\Sigma PЗЭ_{C_e}/\Sigma PЗЭ_Y$, отражающей состояние палеоклимата.

Зс – западный склон, СУ – Средний Урал, ЮУ – Южный Урал; 1 – серпуховский ярус, 2 – башкирский ярус.

Fig. 7. Distribution of data points of bulk samples on $\Sigma PЗЭ_{C_e}/\Sigma PЗЭ_Y$ palaeoclimate diagram.

Зс – western slope, СУ – Middle Urals, ЮУ – Southern Urals; 1 – Serpukhovian Stage, 2 – Bashkirian Stage.

обладанием легких РЗЭ над тяжелыми в область осадконакопления. Для аридного климата это отношение менее 2.5, для семигумидного-семиаридного – 2.5–4.0 для гумидного – больше 4. По данным В.А. Шатрова (2007), оно отражает интенсивность процессов выветривания на суше. При гумидном литогенезе интенсивнее разрушаются полевые шпаты и акцессорные минералы, содержащие цериевые земли, что приводит к увеличению данного отношения, соответственно, при аридном климате оно уменьшается. Предполагается, что в результате выветривания в морской воде рассеиваются глинистые частицы, содержащие фрагменты полевых шпатов и акцессорных минералов. Опыт успешного применения указанного индикатора для карбонатных пород тоже имеется (Лемешко и др., 2017).

Использование данного индикатора для оценки палеоклимата на территории Урала показало, что фигуративные точки почти всех проб известняков восточного склона Южного Урала (разрезы 3157, 3158, 3159, 3160, 3098, 3188) попадают в поле, соответствующее значениям менее 2.5 (рис. 7). Но из разрезов восточного склона Среднего Урала, в поле аридного климата попадают только пробы известняков серпуховского яруса из обнажения 3176 (Луговая), а пробы известняков башкирского яруса оказываются в поле семиаридного/семигумидного климата. В то же время пробы известняков из разрезов 3162, 3185 (р. Исеть) и 3175 (р. Кунара) полностью оказываются в поле семиаридного/семигумидного (некоторые – гумидного) климата. Однако,

возможно, более высокие значения $\Sigma PЗЭ_{C_e}/\Sigma PЗЭ_Y$ в этих породах связаны с присутствием в них примеси вулканического пепла. Неоднозначным является также положение фигуративных точек известняков западного склона Урала. Если на Среднем Урале (разрез Бражка – 3186) они практически все попадают в поле аридного климата, то пробы разреза Аскын (3187) оказываются в поле с более высокими значениями $\Sigma PЗЭ_{C_e}/\Sigma PЗЭ_Y$ (почти все в поле климата семиаридного/семигумидного).

Аналогичные результаты в отношении палеоклимата получаются при использовании марганца в качестве индикатора. А.Б. Ронов и А.И. Ермашкина (1959) впервые установили, что в карбонатных породах, отложенных в условиях гумидного климата, содержание марганца почти на порядок больше, чем у таковых, отложенных в аридных зонах (“климатическая закономерность Ронova–Ермашкиной” (Юдович, Кетрис, 2014)). На этом основании можно предположить, что на востоке Южного Урала и западном склоне на рубеже раннего и среднего карбона (как в серпуховском, так и в начале башкирского времени) преобладал аридный климат (содержание марганца в среднем 46 г/т). На востоке Среднего Урала содержание этого элемента несколько более высокое (в среднем 120 г/т), здесь климат, вероятно, был более влажным, особенно в башкирское время. Однако не исключено, что и в данном случае высокое содержание марганца (как и отношения $\Sigma PЗЭ_{C_e}/\Sigma PЗЭ_Y$) связано с присутствием вулканического пепла, а не с влажным климатом (Юдович, Кетрис, 2011).

Редокс-обстановки в бассейнах седиментации

Анализ распределения редких и рассеянных элементов в каменноугольных известняках позволяет также оценить окислительно-восстановительные условия водной среды бассейнов осадконакопления. В России в качестве индикатора редокс-статуса придонных вод чаще используется отношение Mo/Mn – так называемый “коэффициент стагнации” (Холодов, Недумов, 1991; Гаврилов и др., 2002; Маслов и др., 2018). По данным В.Н. Холодова и Р.И. Недумова, о сероводородном заражении водоема (и, соответственно, о бескислородной среде) можно говорить, если указанное отношение > 0.01 . А среди изученных нами выборок отдельные образцы с такими значениями встречаются. В частности, среди известняков из разреза “Бол. Кизил” имеются три образца с отношением $Mo/Mn = 0.01–0.025$, а также три образца из разреза Худолаз-лог (в пределах $0.01–0.042$). Еще больше их на Среднем Урале – в разрезе Исетский карьер ($0.019, 0.022, 0.033, 0.12, 0.26$) и на р. Кунара (0.058).

В. Эрнстом (1976) в качестве редокс-индикатора было предложено отношение V/Cr . По данным Д. Бонда с соавторами (Bond et al., 2004), значение этого отношения более 5 указывают на аноксидную обстановку, а менее 1 – на оксидную. Подавляющее большинство изученных нами образцов характеризуются параметром $V/Cr < 1$, т.е. обстановки седиментации в основном были кислородными. Лишь среди известняков восточного склона Среднего Урала преобладают образцы с отношением $V/Cr = 1–5$, указывающие на слабокислородную среду, а три образца среди них свидетельствуют об аноксидной (отношение 6.3, 11.8, 21.6). Однако это не те образцы, по которым можно предполагать аноксидные обстановки согласно индикатору Mo/Mn .

Для оценки окислительно-восстановительных обстановок используется также отношение $V/(V + Ni)$. Установлено (Hatch, Leventhal, 1997), что оно варьирует от 0.65–0.7 в осадках, сформировавшихся в умеренно бескислородной обстановке, до почти 1.0 – в аноксидной. Согласно этим данным, в уральских бассейнах, где накапливались изученные отложения, обстановки повсюду были кислородными (указанное отношение 0.55 и меньше).

Очевидно, что указанные редокс-индикаторы дают противоречивые результаты. По всей видимости, отношения Mo/Mn , V/Cr , $V/(V + Ni)$ работают главным образом в отношении терригенных пород. Тогда как при реконструкции обстановок карбонатного осадконакопления относительно надежно об окислительно-восстановительных условиях можно судить по спектру распределения РЗЭ, если установлено, что они унаследованы от морской воды. Одним из наиболее надежных редокс-индикаторов в этом случае является цериевая аномалия в биохемотронных карбонатах (Tostevin et al., 2016; Wallace et al., 2017). По ее величине (в спектре распределения РЗЭ, нормированном по РААС) в чистых известняках можно судить о степени насыщенности вод бассейна кислородом, так как в богатой кислородом среде происходит интенсивное удаление церия из морской воды (Дубинин, 2004), а образующиеся в равновесии с ней карбонатные осадки наследуют спектр распределения растворенных редкоземельных элементов (Webb, Kamber, 2000). Но для этого нужно, чтобы известняки действительно были чистыми и в их составе отсутствовали другие носители РЗЭ (такие как глинистое вещество, фосфаты, минералы тяжелой фракции, оксигидроксиды железа и марганца и другие). Следовательно, для указанной цели нами были использованы пробы, удовлетворяющие одновременно следующим геохимическим критериям: $\Sigma REE < 5$ г/т, $Zr < 1$ г/т, $Y/No = 36–74$, $Nd_n/Yb_n = 0.15–0.5$ (Bau, 1996; Webb, Kamber, 2000; Bolhar, Van Kranendonk, 2007; Tostevin et al., 2016; Wallace et al., 2017; Li et al., 2019). Таким образом, из общей выборки, состоящей из 87 проб, пригодными для интерпретации состояния среды оказались только 18 (7 – из разреза Бол. Кизил, 6 – Худолаз-лог, 2 – Аскын и по одной пробе из разрезов Чернышевский, Таштуй и Бражка) – см. рис. 4. Пробы из разрезов восточного склона Среднего Урала в это число не попали, так как они содержат примеси.

Результаты исследования известняков Южного Урала показали, что выраженная отрицательная цериевая аномалия ($0.30–0.58$) характерна для пород нижних уровней разреза Бол. Кизил и для серпуховских известняков на р. Худолаз ($0.25–0.47$), представленных “фасциелловыми” и полибиокластовыми разностями. Глубокая аномалия (0.26) отмечена также для одного из образцов из разреза Таштуй. Таким образом, среда на этой территории, по-видимому, была насыщена кислородом и характеризовалась активной гидродинамикой. В известняках верхней части разреза Бол. Кизил, бедных макроскопическими органическими остатками и переполненных “кальцисферами” (Kulagina et al., 2009; Дуб и др., 2020), упомянутая аномалия менее глубокая, а на отдельных уровнях практически исчезает ($0.84–1.00$), что свидетельствует о сокращении количества кислорода в бассейне. В образце из разреза на р. Худолаз (3159-3-2), представленном микробиалитом (Дуб и др., 2020), указанная аномалия также выражена относительно слабо (0.70). Очевидно, что падение уровня насыщения среды кислородом находится в тесной взаимосвязи с фациями: эпизоду цианобактериального цветения водоема отвечает наименьшая оксигенизация вод, что согласуется с результатами, полученными с использованием отношения Mo/Mn , а также с литологическими данными, по которым бескисло-

родную среду седиментации можно предполагать только для известняков из карьера на р. Исеть, судя по их темному цвету, присутствию пирита и ориктоценозам на пластовых поверхностях.

На западном склоне Урала в пробе известняков из разреза Бражка, залегающих непосредственно ниже стратиграфической границы C_1 - C_2 , отрицательная Се-аномалия тоже выражена слабо (0.82). В разрезе Аскын ситуация сходная: в одном из образцов аномалия составляет 0.80, а в другом (на несколько более высоком уровне) – 0.52. Следовательно, для эпиплатформенных морей к западу от Урала на рубеже раннего и среднего карбона, скорее всего, нельзя предполагать существенное насыщение вод кислородом.

Следы гидротермальной деятельности

На присутствие в бассейне эксгальационного вещества могло бы указать обогащение рассматриваемых пород элементами-сульфофилами, такими как Cu, Zn, Pb (Юдович и др., 1998; Юдович, Кетрис, 2010, 2011; и др.), но такого обогащения нет. Об отсутствии влияния гидротермальных процессов на Южном Урале свидетельствует и низкое (значительно ниже кларка в карбонатах) содержание Mn и Ba (Гурвич, 1998). Только у отдельных образцов на Среднем Урале содержание марганца доходит до 400–500 г/т, что, скорее всего, связано с примесью пирокластики в составе этих известняков или с их неравномерной доломитизацией.

Между тем, на присутствие гидротермальных источников в пределах бассейна седиментации (Дубинин, 2004; Юдович, Кетрис, 2011; Franchi et al., 2015) может указывать выявленная для большинства отложений положительная аномалия европия (при нормировании по PAAS). При этом можно использовать образцы как абсолютно чистых известняков (18 образцов), так и формально содержащих некоторую примесь. По величине аномалии европия они практически не различаются.

На Южном Урале, в известняках разреза Бол. Кизил величина этой аномалии составляет 1.03–1.66 (и только в одном образце – 0.94), в известняках на р. Худолаз – 0.92–1.23, в образце из разреза Таштуй – 1.11–1.26. Такие аномалии позволяют высказать осторожное предположение, что на заключительных этапах закрытия Уральско-го палеоокеана, в некоторых акваториях еще сохранялась гидротермальная деятельность. В то же время в разрезе Среднего Урала (Исетский карьер) с явными признаками вулканической активности и восстановительной обстановки осадконакопления в бассейнах седиментации, спектр распределения РЗЭ в которых нельзя считать гидрогенным, величина европиевой аномалии примерно такая же (0.95(0.70)–1.31). Возможно, такая картина объясняется неравномерной доломитизацией толщи.

Не совсем ясной остается также положительная европиевая аномалия в известняках разрезов западного склона – Бражка (1.12–1.37) и Аскын (0.93–1.18). Ее нельзя объяснить ни гидротермальной деятельностью, ни выраженными восстановительными условиями: против подобных предположений свидетельствуют крайне низкие концентрации марганца в изученных образцах. Не исключено также, что положительные аномалии в ряде проб являются артефактами (см., например, (Ling et al., 2013, с. 119²)) или же обусловлены катагенетическими преобразованиями пород.

Основные источники РЗЭ в каменноугольных известняках позволяет выявить отношение Y/No, величина которого в пределах 36–74 является характерной для морской воды и для спектров РЗЭ в (био)хемогенных осадках (Bau, 1996; Webb, Kamber, 2000; Bolhar, Van Kranendonk, 2007; Wallace et al., 2017). Более низкие значения (порядка 25–30) могут быть связаны с присутствием в среде седиментации литогенного материала (McLennan, 2001), так как величина этого отношения уменьшается при снижении общей доли гидрогенных РЗЭ. На этом основании были вычислены отношения Y/No в известняках всех изученных разрезов. Было установлено, что в известняках разреза Бол. Кизил (3157, 3158) отношение Y/No варьирует от 28.5 до 71.0 (один образец 23.3), а в породах, обнажающихся на р. Худолаз, этот параметр составляет 29.3–48.5 (один образец 23.1), а на руч. Таштуй – 56.8–63.3. В известняках разреза на р. Исеть величина Y/No изменяется в пределах от 18.1 до 31.4 (несколько образцов 35.0–47.2), а в разрезе Луговая оно колеблется в интервале 29.6–46.6. В известняках западного склона – 31.8–39.4 (Бражка) и 37.8–48.0 (2 образца 29.0) – Аскын.

Следовательно, средние значения отношения Y/No в каменноугольных известняках чаще всего близки к таковым современной морской воды, а фактор, снижающий роль гидрогенных РЗЭ, по-видимому, присутствовал на Среднем Урале (разрез Исеть), где величины отношения Y/No у отдельных образцов варьируют от 18 до 25. Скорее всего, это примесь вулканического пепла, характерная для этих отложений.

Низкие величины отношения Y/No в какой-то степени могут быть связаны и с наличием гидротермальных растворов в бассейне осадконакопления (Nozaki et al., 1997; Franchi et al., 2015). Так, установлено, что присутствие этих растворов приводит к уменьшению отношения Y/No до хондритового (32.0 по (Condie, 1993)). Следовательно, некоторое присутствие их можно предположить в

² Для выявления образцов, в которых европиевая аномалия может оказаться артефактом, указанными авторами был использован критерий $Ba/Nd > 20$. В настоящей работе одна треть проб (6 из 18) также характеризуется столь же высоким Ba/Nd -отношением.

участках бассейна, где на территории современного Южного Урала (обн. 3098, 3159 3158) в серпуховское время формировались карбонатные осадки. У отдельных образцов из этих разрезов отношение Y/No на уровне 23–30. Нельзя полностью исключить поступление гидротермальных растворов и в бассейны на западном склоне Урала, в разрезах которого обнаружены отложения с отношением Y/No порядка 29–32.

Подтвержденная унаследованность некоторых спектров распределения РЗЭ в рассматриваемых известняках от морской воды позволяет использовать коэффициент Eu/Eu^* для оценки влияния глубинных процессов (Шатров, Войцеховский, 2013). При этом аномалия европия, относящаяся к распределению РЗЭ, нормированных по хондриту ($Eu/Eu^* = Eu_N / (Sm_N + Gd_N) / 2$), может свидетельствовать о гидротермальных и вулканических процессах, о флюидомассопереносе (Балашов, 1976; Тейлор, Мак-Леннан, 1988; Гурвич, 1998). Установлено (Балашов, 1985), что среднее значение этой аномалии в целом для осадочных пород фанерозоя составляет 0.61–0.70. С такой величиной в полной мере согласуются и данные по рассматриваемым известнякам (в среднем Южный Урал – 0.64, Средний Урал – 0.61, Западный склон – 0.66). Причем по отдельным разрезам упомянутое среднее значение тоже существенно не меняется. Лишь единичные образцы на востоке Южного Урала и в разрезе Бражка имеют менее выраженные аномалии (0.74–0.84). Следовательно, по величине ее невозможно говорить о заметном влиянии глубинных процессов на ход формирования рассматриваемых известняков, что вполне согласуется с данными других индикаторов (отношением Y/No).

Источники урана

Можно предположить, что повышенная концентрация данного элемента (до 7–9 г/т при кларке³ для карбонатов 2.2 г/т) у некоторых образцов известняков на востоке Среднего Урала (в том числе основания башкирского яруса в разрезе Луговая) связана с присутствием в породах пирокластике (согласно (Юдович, Кетрис, 2010, 2011)). Повышенное содержание этого элемента (до 4–6 г/т, а в одном из образцов на р. Худолаз – 10.5 г/т) наблюдается и в отдельных пробах на восточном склоне Южного Урала (рр. Худолаз, Бол. Кизил), но в данном случае его сложнее объяснить вулканогенным фактором, поскольку активный вулканизм на данной территории имел место только в начале карбона (Салихов, Яркова, 1992; Язева, Бочкарев, 1998; Мизенс, 2002).

Но относительно высокое содержание урана в известняках не обязательно обусловлено вул-

канизмом или эксгальтивными процессами. Так, установлено, что U(VI) подвижен в окислительной обстановке. Находясь в водной среде в составе уранил-иона (UO_2^{2+}), он способен формировать устойчивые карбонатные комплексы (Bell, 1963; Арбузов, Рихванов, 2010) и может входить в состав осаждающихся карбонатных минералов, особенно арагонита (Kitano, Oomori, 1971; Kelly et al., 2003). В то же время в восстановительной среде происходит редукция уранил-иона до степени окисления U^{+4} и осаждение в нерастворимой фазе (Jones, Manning, 1994; Восель, 2015). Осадителями урана могут являться органическое вещество и фосфатные компоненты (Альтгаузен и др., 1975). Таким образом, не прибегая к дифференцированному анализу фаз, входящих в состав породы, невозможно однозначно ответить на вопрос, связаны ли повышенные содержания данного элемента в изученных нами валовых пробах известняков с особыми обстановками осадконакопления или же они обусловлены определенным типом (терригенной или аутигенной) некарбонатной составляющей.

ВЫВОДЫ

Выявленные закономерности распределения редких и рассеянных элементов в известняках пограничного интервала нижнего-среднего карбона на Южном и Среднем Урале подтверждают отсутствие длительного и глубокого перерыва на этом рубеже. Значительного понижения уровня Мирового океана в это время на рассматриваемой территории не зафиксировано. Некоторые изменения как литологических, так и химических характеристик известняков в основном были связаны с локальными тектоническими событиями.

Не обнаружено также признаков существенного похолодания на границе нижнего и среднего карбона в рассматриваемом регионе. Согласно индикаторам (соотношению $\Sigma RZ_{\Sigma C} / \Sigma RZ_{\Sigma Y}$, а также содержанию Mn), на территории современного Южного Урала как в раннем, так и в начале среднего карбона существовал аридный климат. Лишь на востоке Среднего Урала, возможно, преобладал семиаридный/семигумидный, хотя величина указывающих на него индикаторов может быть связана с присутствием в известняках пирокластике.

Для большинства разрезов пограничного интервала характерно постепенное изменение содержания литофильных элементов (увеличение или, реже, уменьшение). Такая ситуация может объясняться как постепенным вовлечением в размыв новых площадей – поставщиков алюмосиликокластике, так и интенсификацией химического выветривания на суше вследствие гумидизации климата.

Почти по всей изученной территории в известняках обнаруживаются примеси компонентов магматических пород основного и, реже, ультраос-

³ По Н.А. Григорьеву (2009).

нового состава, в том числе и на западном склоне Урала. А в известняках Среднего Урала проявляются также следы привноса фрагментов кислых магматических пород, имеются признаки вулканической деятельности. Некоторые следы поступления продуктов размыва кислых магматических пород имеются и на западном склоне Среднего Урала.

Формирование известняков пограничного интервала, скорее всего, происходило в мелководных обстановках, в богатой кислородом среде с высокой гидродинамической активностью вод, но на значительном удалении от суши, в бассейнах с пассивным (преимущественно) тектоническим режимом. Тем не менее, временами на отдельных участках имело место уменьшение насыщения среды кислородом, что, скорее всего, было связано с ослаблением циркуляции вод и эпизодами цианобактериального цветения водоема.

Признаки влияния эксглативных процессов на карбонатные осадки в пределах изученной территории в основном отсутствуют. Некоторое присутствие гидротермальных растворов можно предположить лишь в участках бассейна на территории современного Южного Урала в серпуховское время (обн. 3098, 3158 и 3159).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев А.С. (2000) Типизация фанерозойских событий массового вымирания. *Вестн. МГУ. Сер. 4: Геол.*, (5), 6-14.
- 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. Сборник мат-лов Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения проф. П.А. Софроницкого*. Пермь: Перм. гос. ун-т, 16-18.
- Альтгаузен М.Н., Халезов А.Б., Малышев В.И., Ковалева С.А. (1975) Многостадийное образование экзогенных концентраций урана в палеоруслах. *Геология рудн. месторождений*, 17(1), 105-108.
- Арбузов С.И., Рихванов Л.П. (2010) Геохимия радиоактивных элементов. Томск: ТПУ, 300 с.
- Артюшков Е.В., Чехович П.А. (2011) Изменения уровня моря и быстрые движения земной коры в платформенных областях в среднем карбоне-ранней перми. *Геология и геофизика*, 52(10), 1567-1592.
- Балашов Ю.А. (1976) Геохимия редкоземельных элементов. М.: Наука, 267 с.
- Балашов Ю.А. (1985) Изотопно-геохимическая эволюция мантии и коры Земли. М.: Наука, 224 с.
- Белоусов А.Б. (2006) Эксплозивные извержения вулканов Курило-Камчатского региона: механизм, динамика, закономерности образования отложений. Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. М.: МГУ, 42 с.
- Восель Ю.С. (2015) Геохимия урана в современных карбонатных отложениях малых озер (формы нахождения и изотопные отношения $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$). Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Новосибирск: ИГМ СО РАН, 128 с.
- Гаврилов Ю.О., Щепетова Е.В., Барабошкин Е.Ю., Щербина Е.А. (2002) Аноксический раннемеловой бассейн Русской плиты: седиментология и геохимия. *Литология и полез. ископаемые*, 4, 359-380.
- Григорьев Н.А. (2009) Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. Екатеринбург: УрО РАН, 162 с.
- Гурвич Е.Г. (1998) Металлоносные осадки Мирового океана. СПб: ВНИИОкеангеология, 337 с.
- 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. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2020-20-3-305-327>
- Дубинин А.В. (2004) Геохимия редкоземельных элементов в океане. *Литология и полез. ископаемые*, (4), 339-358.
- Дубинин А.В., Розанов А.Г. (2001) Геохимия редкоземельных элементов и тория в осадках и железомарганцевых конкрециях Атлантического океана. *Литология и полез. ископаемые*, (3), 311-323.
- Иванова Р.М. (1988) Позднесерпуховские фораминиферы восточного склона Среднего и Южного Урала. *Ежегодник ВПО*, 31. Л.: Наука, 5-19.
- Интерпретация геохимических данных. (2001) (Отв. ред. Е.В. Скляров). М.: Интермет Инжиниринг, 288 с.
- Кулагина Е.И., Пазухин В.Н., Кочеткова Н.М., Синицына З.А., Кочетова Н.Н. (2001) Характеристика разрезов. *Стратиграфические и опорные разрезы башкирского яруса карбона Южного Урала*. Уфа: Гилем, 10-54.
- Лемешко М.Н., Поцелуев А.А., Шалдыбин М.В., Лемешко Д.И. (2017) Критерии локального прогноза пород-коллекторов в карбонатных венд-кембрийских отложениях усть-кутского горизонта. *Георесурсы*, 19(2), 122-128. <http://doi.org/10.18599/grs.19.2.6>
- Летникова Е.Ф., Кузнецов А.Б., Вишневская И.А., Терлеев А.А., Константинова Г.В. (2011) Геохимические и изотопные (Sr, C, O) характеристики венд-кембрийских карбонатных отложений хр. Азыр-1528 Тал (Кузнецкий Алатау): хемотратиграфия и обстановки седиментогенеза. *Геология и геофизика*, 52(10), 1466-1487.
- Маслов А.В. (2020) Башкирский мегантиклинорий: позднерифейско-вендские перерывы и возможные трансформации систем питания бассейна тонкой алюмосиликокластикой. *Литосфера*, 20(4), 455-470. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2020-20-4-455-470>
- Маслов А.В., Гражданкин Д.В., Дуб С.А., Мельник Д.С., Парфенова Т.М., Колесников А.В., Чередниченко Н.В., Киселева Д.В. (2019) Укская свита верхнего рифея Южного Урала: седиментология и геохимия (первые результаты исследований). *Литосфера*, 19(5), 659-686. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2019-19-5-659-686>
- Маслов А.В., Мельничук О.Ю., Титов Ю.В., Червяковская М.В. (2020) Реконструкция состава пород питающих провинций. Статья 2. Лито- и изотопно-геохимические подходы и методы. *Литосфера*, 20(1), 40-62. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2020-20-1-40-62>
- Маслов А.В., Школьник С.И., Летникова Е.Ф., Вишневская И.А., Иванов А.В., Страховенко В.Д., Черкашина Т.Ю. (2018) Ограничения и возможности литогеохимических и изотопных методов при изучении

- осадочных толщ. Новосибирск: ИГМ СО РАН, 383 с.
- Махлина М.Х., Алексеев А.С., Горева Н.В., Исакова Т.Н., Друцкой С.Н. (2001) Средний карбон Московской синеклизы (южная часть). Т. 1. Стратиграфия. М.: ПИН РАН, 244 с.
- Мизенс Г.А. (2002) Седиментационные бассейны и геодинамические обстановки в позднем девоне–ранней перми юга Урала. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 190 с.
- 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.
- Пучков В.Н. (2010) Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 280 с.
- Ронов А.Б., Ермишкина А.И. (1959) Распределение марганца в осадочных породах. *Геохимия* (3), 206–225.
- Савельева О.Л., Савельев Д.П., Карташова Е.В. (2015) Известняки Вахильского поднятия (Восточная Камчатка): литологическая и геохимическая характеристика. *Вестн. КРАУНЦ. Науки о земле*. **26**(2), 37–50.
- Салихов Д.Н., Яркова А.В. (1992) Нижнекаменноугольный вулканизм Магнитогорского мегасинклинория. Уфа: УрО РАН, 137 с.
- Смыслов А.А. (1974) Уран и торий в земной коре. Л.: Недра, 231с.
- Степанова Т.И., Кулагина Е.И., Кучева Н.А., Мизенс Г.А., Пазухин В.Н. (2013) Разрез “Чернышевка” на р. Худолаз (Восточный склон Южного Урала). *Тр. ИГГ УрО РАН*. Вып. 160, 32–38.
- Степанова Т.И., Кучева Н.А. (2006) Разрез Худолаз – стратотип горизонтов субрегиональной схемы нижнекаменноугольных отложений восточного склона Урала. *Литосфера*, (1), 45–75.
- Степанова Т.И., Кучева Н.А., Школин А.А. (2001) Новые материалы по стратиграфии и аммоноидеям верхнесерпуховских отложений на р. Исети. Эволюция жизни на Земле. *Мат-лы II Междунар. симпоз.* Томск: Томск. госуниверситет, 233–236.
- Тейлор С.Р., МакЛеннан С.М. (1988) Континентальная кора: ее состав и эволюция. М.: Мир, 384 с.
- Фархутдинов И.М., Соктоев Б.Р., Рихванов Л.П., Фархутдинов А.М., Злобина А.Н., Исмаилов Р.А., Никонов В.Н., Белан Л.Н. (2020) Влияние геологических факторов на распределение урана и тория в солевых отложениях питьевых вод (Республика Башкортостан). *Изв. Томского политехн. университета. Инжиниринг георесурсов*, **331**(4), 16–27.
- Холодов В.Н., Недумов Р.И. (1991) О геохимических критериях появления сероводородного заражения в водах древних водоемах. *Изв. АН СССР. Сер. геол.*, (12), 74–82.
- Шатров В.А. (2007) Лантаноиды как индикаторы обстановок осадкообразования (на основе анализа опорных разрезов протерозоя и фанерозоя Восточно-Европейской платформы). Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. М.: ГИН РАН, 52 с.
- Шатров В.А., Войцеховский Г.В. (2009) Применение лантаноидов для реконструкций обстановок осадкообразования в фанерозое и протерозое (на примере разрезов чехла и фундамента Восточно-Европейской платформы). *Геохимия*, (8), 805–824.
- Эрнст В. (1976) Геохимический анализ фаций. Л.: Недра, 127 с.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П. (2010) Геохимические и минералогические индикаторы вулканогенных продуктов в осадочных толщах. Екатеринбург: УрО РАН, 412 с.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П. (2011) Геохимические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия). Сыктывкар: Геопринт, 742 с.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П. (2014) Геохимия марганца. Сыктывкар: Геопринт, 538 с.
- Юдович Я.Э., Шишкин М.А., Лютиков Н.В., Кетрис М.П., Беляев А.А. (1998) Геохимия и рудогенез черных сланцев Лемвинской зоны Севера Урала. Сыктывкар: Пролог, 340 с.
- Язева Р.Г., Бочкарев В.В. (1998) Геология и геодинамика Южного Урала. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 204 с.
- Adams J.A.S., Weaver C.E. (1958) Thorium-to-uranium ratios as indicators of sedimentary processes: example of concept of geochemical facies. *Bull. Amer. Ass. Petrol. Geol.*, **42**(2), 387–430.
- Alekseev A.S., Kononova L.I., Nikishin A.M. (1996) The Devonian and Carboniferous of the Moscow Syncline (Russian Platform): stratigraphy and sea-level changes. *Tectonophysics*, **268**, 149–168.
- Bau M. (1996) Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: Evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **123**, 323–333.
- Bell K.G. (1963) Uranium in carbonate rocks. USGS Prof. Paper 474-A. 29 p.
- Bolhar R., Van Kranendonk M.J. (2007) A non-marine depositional setting for the northern Fortescue Group, Pilbara Craton, inferred from trace element geochemistry of stromatolitic carbonates. *Prec. Res.*, **155**, 229–250.
- Bond D., Wignall P.B., Racki G. (2004) Extent and duration of marine anoxia during the Frasnian-Famennian (Late Devonian) mass extinction in Poland, Germany, Austria and France. *Geol. Mag.*, **41**(2), 173–193.
- Condie K.C. (1993) Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales. *Chem. Geol.*, **104**, 1–37.
- Condie K.C., Wronkiewicz D.J. (1990) The Cr/Th ratio in Precambrian pelites from the Kaapvaal Craton as an index of craton evolution. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **97**, 256–267.
- Franchi F., Hofmann A., Cavalazzi B., Wilson A., Barbieri R. (2015) Differentiating marine vs hydrothermal processes in Devonian carbonate mounds using rare earth elements (Kess Kess mounds, Anti-Atlas, Morocco). *Chem. Geol.*, **409**, 69–86.
- Grossman E.L., Bruckschen P., Mii H., 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., Joachimski M.M. (2019) The oxygen isotope record for greenhouse-icehouse-greenhouse transitions in the Paleozoic. *Kölner Forum Geol. Paläont.* Abstracts of 19th International Congress on the Carboniferous and Permian (Eds S. Hartenfels, H.-G. Herbig,

- M.R.W. Amler, M. Aretz). Cologne, **23**, 132-133.
- Hatch J.R., Leventhal J.S. (1997) Early diagenetic partial oxidation of organic matter and sulfides in the Middle Pennsylvanian (Desmoinesian) Excello Shale Member of the Fort Scott Limestone and equivalents, northern Midcontinent region, USA. *Chem. Geol.*, **134**, 215-235.
- Jones B., Manning D.A.C. (1994) Comparison of geochemical indices used for the interpretation of paleoredox conditions in ancient mudstones. *Chem. Geol.*, **111**, 111-129.
- Kelly S.D., Newville M.G., Cheng L., Kemner K.M., Sutton S.R., Fenter P., Sturchio N.C., Spötl C. (2003) Uranyl incorporation in natural calcite. *Environ. Sci. Technol.*, **37**, 1284-1287.
- Kitano Y., Oomori T. (1971) The coprecipitation of uranium with calcium carbonate. *J. Ocean. Soc. Jpn.*, **27**, 34-42.
- 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.
- Lawrence M.G., Greig A., Collerson K.D., Kamber B.S. (2006) Rare earth element and yttrium variability in South East Queensland waterways. *Aquat. Geochem.*, **12**, 39-72.
- Li F., Webb G.E., Algeo T.J., Kershaw S., Lu C., Oehlert A.M., Gong Q., Pourmand A., Tan X. (2019) Modern carbonate ooids preserve ambient aqueous REE signatures. *Chem. Geol.*, **509**, 163-177.
- Ling H.-F., Chen X., Li D., Wang D., Shields-Zhou G.A., Zhu M. (2013) Cerium anomaly variations in Ediacaran – earliest Cambrian carbonates from the Yangtze Gorges area, South China: implications for oxygenation of coeval shallow seawater. *Prec. Res.*, **225**, 110-127.
- McLennan S.M. (2001) Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **2**(4), 203-236.
- McLennan S.M., Taylor S.R. (1991) Sedimentary rocks and crustal evolution: tectonic setting and secular trends. *J. Geol.*, **99**, 1-21.
- McLennan S.M., Taylor S.R., McCulloch M.T., Maynard J.B. (1990) Geochemical and Nd-Sr isotopic composition of deep-sea turbidites: crustal evolution and plate tectonic associations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **54**, 2015-2050.
- Mii H., Grossman E. L., Yancey T.E., Chuvashov B.I. (2001) Isotopic records of brachiopod shells from the Russian Platform – Evidence for the onset of mid-Carboniferous glaciation. *Chem. Geol.*, **175**(1), 133-147.
- Mory A.J., Redfern J., Martin J.R. (2008) A review of Permian–Carboniferous glacial deposits in Western Australia. Resolving the Late Paleozoic Ice Age in Time and Space. *Geol. Soc. Amer. Spec. Pap.* (Eds C.R. Fielding, T.D. Frank, J.L. Isbell), **441**, 29-40. doi: 10.1130/2008.2441(02)
- 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). *10th International symposium "Cephalopods – present and past"*. Abstracts. Morocco, 86-87.
- Nozaki Y., Zhang J., Amakawa H. (1997) The fractionation between Y and Ho in the marine environment. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **148**, 329-340.
- Rogers J.J.W., Adams J.A.S. (1969) Thorium. Handbook of Geochemistry (Ed. K.H. Wedepohl), **2**(1). Berlin: Springer, 39 p.
- Ross C.A., Ross J.R.P. (1988) Late Paleozoic transgressive-regressive deposition. *Sea-Level Changes: An Integrative Approach. Soc. Econ. Paleontol. Mineral., Spec. Publ.* (Eds C.K. Wilgus, B.S. Hastings, C.G.S.C. Kendall, H. Posamentier, C.A. Ross, J.C. Van Wagoner), **42**, 227-243.
- 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.
- Tostevin R., Shields G.A., Tarbuck G.M., He T., Clarkson M.O., Wood R.A. (2016) Effective use of cerium anomalies as a redox proxy in carbonate-dominated marine settings. *Chem. Geol.*, **438**, 146-162.
- Wallace M.W., Hood A.V.S., Shuster A., Greig A., Planavsky N.J., Reed C.P. (2017) Oxygenation history of the Neoproterozoic to early Phanerozoic and the rise of land plants. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **466**, 12-19.
- Webb G.E., Kamber B.S. (2000) Rare earth elements in Holocene reefal microbialites: a new shallow seawater proxy. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **64**, 1557-1565.

REFERENCES

- Adams J.A.S., Weaver C.E. (1958) Thorium-to-uranium ratios as indicators of sedimentary processes: example of concept of geochemical facies. *Bull. Amer. Ass. Petrol. Geol.*, **42**(2), 387-430.
- Alekseev A.S. (2000) Typifying Phanerozoic Events of Mass Organism Extinction. *Vestn. Mosk. Univ. Ser. 4: Geol.*, (5), 6-14. (In Russ.)
- Alekseev A.S., Kononova L.I., Nikishin A.M. (1996) The Devonian and Carboniferous of the Moscow Syncline (Russian Platform): stratigraphy and sea-level changes. *Tectonophysics*, **268**, 149-168.
- Alekseev A.S., Reimers A.N. (2010) The climate of the Carboniferous and its dynamics on the East European Platform and the western slope of the Urals. *Geology and petroleum potential of the northern areas of the Ural-Volga region. Materials of All-Russian scientific practical conf. dedicated to 100th anniversary of prof. P.A. Sofronitsky birth*. Perm, Perm State Univ. Publ., 16-18. (In Russ.)
- Althausen M.N., Khalezov A.B., Malyshev V.I., Kovaleva S.A. (1975) Multistage formation of exogenous uranium concentrations in paleoriver-beds. *Geol. Rudn. Mes-torozhd.*, **17**(1), 105-108. (In Russ.)
- Arbuzov S.I., Rikhvanov L.P. (2010) Geochemistry of radioactive elements. Tomsk, TPU, 300 p. (In Russ.)
- Artyushkov E.V., Chekhovich P.A. (2011) Sea level changes and rapid movements of Earth crust in cratonic areas in the Late Paleozoic. *Russ. Geol. Geophys.*, **52**(10), 1236-1255 (Translated from *Geol. Geofiz.*, **52**(10), 1567-1592).
- Balashov Yu.A. (1976) Geochemistry of rare earth elements. Moscow, Nauka Publ., 267 p. (In Russ.)
- Balashov Yu.A. (1985) Isotope-geochemical evolution of the Earth's mantle and crust. Moscow, Nauka Publ., 224 p. (In Russ.)

- Bau M. (1996) Controls on the fractionation of isoivalent trace elements in magmatic and aqueous systems: Evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **123**, 323-333.
- Bell K.G. (1963) Uranium in carbonate rocks. USGS Prof. Paper 474-A. 29 p.
- Belousov A.B. (2006) Explosive eruptions of volcanoes of the Kurilo-Kamchatka region: mechanism, dynamics, regularities of sediment formation. Dr. geol. and. min. sci. diss. Moscow, MGU, 42 p. (In Russ.)
- Bolhar R., Van Kranendonk M.J. (2007) A non-marine depositional setting for the northern Fortescue Group, Pilbara Craton, inferred from trace element geochemistry of stromatolitic carbonates. *Prec. Res.*, **155**, 229-250.
- Bond D., Wignall P.B., Racki G. (2004) Extent and duration of marine anoxia during the Frasnian-Famennian (Late Devonian) mass extinction in Poland, Germany, Austria and France. *Geol. Mag.*, **41**(2), 173-193.
- Condie K.C. (1993) Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales. *Chem. Geol.*, **104**, 1-37.
- Condie K.C., Wronkiewicz D.J. (1990) The Cr/Th ratio in Precambrian pelites from the Kaapvaal Craton as an index of craton evolution. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **97**, 256-267.
- 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. *Lithosphere (Russia)*, **20**(3), 305-327. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2020-20-3-305-327>
- Dubinin A.V. (2004) Geochemistry of rare earth elements in the ocean. *Lithol. Miner. Res.*, **39**(4), 289-307 (Translated from *Litol. Polezn. Iskop.*, (4), 339-358).
- Dubinin A.V., Rozanov A.G. (2001) Geochemistry of rare earth elements and thorium in sediments and ferromanganese nodules of the Atlantic Ocean. *Litol. Polezn. Iskop.*, (3), 311-323. (In Russ.)
- Ernst V. (1976) Geochemical analysis of facies. Leningrad, Nedra Publ., 127 p. (In Russ.)
- Farkhutdinov I.M., Soktoev B.R., Rikhvanov L.P., Farkhutdinov A.M., Zlobina A.N., Ismagilov R.A., Nikonov V.N., Belan L.N. (2020) Influence of geological factors on uranium and thorium distribution in drinking water salt deposits (Republic of Bashkortostan). *Izv. Tomsk. Politekh. Univer. Inzhiniring georesursov*, **331**(4), 16-27. (In Russ.)
- Franchi F., Hofmann A., Cavalazzi B., Wilson A., Barbieri R. (2015) Differentiating marine vs hydrothermal processes in Devonian carbonate mounds using rare earth elements (Kess Kess mounds, Anti-Atlas, Morocco). *Chem. Geol.*, **409**, 69-86.
- Gavrilov Yu.O., Shchepetova E.V., Baraboshkin E.Yu., Shcherbinina E.A. (2002) Early Cretaceous Anoxic Basin of the Russian Plate: Sedimentology and Geochemistry. *Lithol. Polezn. Iskop.* (4), 359-380. (In Russ.)
- Grigor'ev N.A. (2009) Distribution of chemical elements in the upper part of the continental crust. Ekaterinburg, UrO RAN, 162 p. (In Russ.)
- Grossman E.L., Bruckschen P., Mii H., Chuvashov B.I., Yancey T.E., Veizer J. (2002) Carboniferous paleoclimate and global change: isotopic evidence from the Russian platform. *Stratigraphy and Paleogeography of Eurasian Carboniferous*. Ekaterinburg, IGG UrO RAN, 61-71.
- Grossman E.L., Joachimski M.M. (2019) The oxygen isotope record for greenhouse-icehouse-greenhouse transitions in the Paleozoic. *Kölner Forum Geol. Paläont. Abstracts of 19th International Congress on the Carboniferous and Permian* (Eds S. Hartenfels, H.-G. Herbig, M.R.W. Amler, M. Aretz). Cologne, **23**, 132-133.
- Gurvich E.G. (1998) Metalliferous sediments of the World Ocean. St.Petersburg, VNII Okeangeologiya Publ., 337 p. (In Russ.)
- Hatch J.R., Leventhal J.S. (1997) Early diagenetic partial oxidation of organic matter and sulfides in the Middle Pennsylvanian (Desmoinesian) Excello Shale Member of the Fort Scott Limestone and equivalents, northern Midcontinent region, USA. *Chem. Geol.*, **134**, 215-235.
- Interpretation of geochemical data (2001) (Ed. E.V. Sklyarov). Moscow, Internet Inzhiniring Publ., 288 p. (In Russ.)
- Ivanova R.M. (1988) Late Serpukhovian foraminifera of the eastern slope of the Middle and Southern Urals. *Ezhegodnik VPO*, **31**. Leningrad, Nauka Publ., 5-19. (In Russ.)
- Jones B., Manning D.A.C. (1994) Comparison of geochemical indices used for the interpretation of paleoredox conditions in ancient mudstones. *Chem. Geol.*, **111**, 111-129.
- Kelly S.D., Newville M.G., Cheng L., Kemner K.M., Sutton S.R., Fenter P., Sturchio N.C., Spötl C. (2003) Uranyl incorporation in natural calcite. *Environ. Sci. Technol.*, **37**, 1284-1287.
- Kholodov V.N., Nedumov R.I. (1991) On the geochemical criteria for the hydrogen sulfide pollution occurrence in waters of ancient basins. *Izvestiya AN SSSR. Ser. Geol.*, (12), 74-82. (In Russ.)
- Kitano Y., Oomori T. (1971) The coprecipitation of uranium with calcium carbonate. *J. Ocean. Soc. Jpn.*, **27**, 34-42.
- Kulagina E.I., Pazukhin V.N., Kochetkova N.M., Sinityna Z.A., Kochetova N.N. (2001) Characteristics of sections. *Stratotype and reference sections of the Bashkirian Stage on the Southern Urals*. Ufa, Gilem Publ., 10-54. (In Russ.)
- 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.
- Lawrence M.G., Greig A., Collerson K.D., Kamber B.S. (2006) Rare earth element and yttrium variability in South East Queensland waterways. *Aquat. Geochem.*, (12), 39-72.
- Lemeshko M.N., Potseluev A.A., Shaldybin M.V., Lemeshko D.I. (2017) Criteria for local forecast of reservoir formations in carbonate Vendian-Cambrian deposits of the Ust-Kutskian horizon. *Georesursy*, **19**(2), 122-128. (In Russ.) <http://doi.org/10.18599/grs.19.2.6>
- Letnikova E.F., Kuznetsov A.B., Vishnevskaya I.A., Terleev A.A., Konstantinova G.V. (2011) The geochemical and isotope (Sr, C, O) characteristics of the Vendian-Cambrian carbonate deposits of the Azyr-Tal Ridge (Kuznetsk Alatau): chemostratigraphy and sedimentogenesis environments. *Russ. Geol. Geophys.*, **52**(10), 1154-1170 (Translated from *Geol. Geofiz.*, **52**(10), 1466-1487).
- Li F., Webb G.E., Algeo T.J., Kershaw S., Lu C., Oehlert A.M., Gong Q., Pourmand A., Tan X. (2019) Modern carbonate

- oids preserve ambient aqueous REE signatures. *Chem. Geol.*, **509**, 163-177.
- Ling H.-F., Chen X., Li D., Wang D., Shields-Zhou G.A., Zhu M. (2013) Cerium anomaly variations in Ediacaran – earliest Cambrian carbonates from the Yangtze Gorges area, South China: implications for oxygenation of coeval shallow seawater. *Prec. Res.*, **225**, 110-127.
- Maslov A.V. (2020) Bashkirian meganticlinorium: Late Riphean-Vendian hiatuses and possible transformations of basin provenances. *Lithosphere (Russia)*, **20**(4), 455-470. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2020-20-4-455-470>
- Maslov A.V., Grazhdankin D.V., Dub S.A., Mel'nik D.S., Parfenova T.M., Kolesnikov A.V., Cherednichenko N.V., Kiseleva D.V. (2019) Sedimentology and geochemistry of the Uk Formation, Upper Riphean, the Southern Urals. *Lithosphere (Russia)*, **19**(5), 659-686. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2019-19-5-659-686>
- Maslov A.V., Mel'nichuk O.Yu., Titov Yu.V., Chervyakovskaya M.V. (2020) Provenance reconstructions. Article 2. Litho- and isotope-geochemical approaches and methods. *Lithosphere (Russia)*, **20**(1), 40-62. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2020-20-1-40-62>
- Maslov A.V., Shkol'nik S.I., Letnikova E.F., Vishnevskaya I.A., Ivanov A.V., Strakhovenko V.D., Cherkaшина T.Yu. (2018) Limitations and possibilities of litho-geochemical and isotopic methods in the sedimentary strata investigations. Novosibirsk, IGM SO RAN, 383 p. (In Russ.)
- Makhlina M.Kh., Alekseev A.S., Goreva N.V., Isakova T.N., Drutskoy S.N. (2001) Middle Carboniferous of the Moscow Syncline (southern part). V. 1. Stratigraphy. Moscow, PIN RAN, 244 p. (In Russ.)
- McLennan S.M. (2001) Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **2**(4), 203-236.
- McLennan S.M., Taylor S.R. (1991) Sedimentary rocks and crustal evolution: tectonic setting and secular trends. *J. Geol.*, **99**, 1-21.
- McLennan S.M., Taylor S.R., McCulloch M.T., Maynard J.B. (1990) Geochemical and Nd-Sr isotopic composition of deep-sea turbidites: crustal evolution and plate tectonic associations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **54**, 2015-2050.
- Mii H., Grossman E. L., Yancey T.E., Chuvashov B.I. (2001) Isotopic records of brachiopod shells from the Russian Platform - Evidence for the onset of Mid-Carboniferous glaciation. *Chem. Geol.*, **175**(1), 133-147.
- Mizens G.A. (2002) Sedimentary basins and geodynamic settings in the Late Devonian-Early Permian of the southern part of Urals. Ekaterinburg, IGG Uro RAN, 190 p. (In Russ.)
- 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 (Translated from *Dokl. Akad. Nauk*, **477**(1), 61-66).
- 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). *Lithosphere (Russia)*, **4**(4), 107-126. (In Russ.)
- Mory A.J., Redfern J., Martin J.R. (2008) A review of Permian-Carboniferous glacial deposits in Western Australia. *Resolving the Late Paleozoic Ice Age in Time and Space. Geol. Soc. Amer. Spec. Pap.* (Eds C.R. Fielding, T.D. Frank, J.L. Isbell), **441**, 29-40. doi: 10.1130/2008.2441(02).
- 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). *10th International symposium "Cephalopods – present and past"*. Abstracts. Morocco, 86-87.
- Nozaki Y., Zhang J., Amakawa H. (1997) The fractionation between Y and Ho in the marine environment. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **148**, 329-340.
- Puchkov V.N. (2010) Geology of the Urals and Pre-Urals (topical issues of stratigraphy, tectonics, geodynamics and metallogeny). Ufa, DizainPoligraphServis Publ., 280 p. (In Russ.)
- Rogers J.J.W., Adams J.A.S. (1969) Thorium. Handbook of Geochemistry (Ed. K.H. Wedepohl), **2**(1). Berlin: Springer, 39 p.
- Ronov A.B., Ermishkina A.I. (1959) Distribution of manganese in sedimentary rocks. *Geokhimiya* (3), 206-225. (In Russ.)
- Ross C.A., Ross J.R.P. (1988) Late Paleozoic transgressive-regressive deposition. *Sea-Level Changes: An Integrative Approach. Soc. Econ. Paleontol. Mineral., Spec. Publ.* (Eds C.K. Wilgus, B.S. Hastings, C.G.S.C. Kendall, H. Posamentier, C.A. Ross, J.C. Van Wagoner), **42**, 227-243.
- Salikhov D.N., Yarkova A.V. (1992) Lower Carboniferous Volcanism of Magnitogorsk Megasyntclorium. Ufa, UrO RAN, 137 p. (In Russ.)
- Savel'eva O.L., Savel'ev D.P., Kartashova E.V. (2015) Limestones of the Vakhil Rise (Eastern Kamchatka): Lithological and Geochemical Description. *Vestn. KRAUNTs. Nauki o Zemle*, **26**(2), 37-50. (In Russ.)
- Shatrov V.A. (2007) Lantanoides as indicators of sedimentary environments (based on the analysis of the Proterozoic and Phanerozoic reference sections of the East European Platform). Dokt. geol. and. min. sci. diss. Moscow, GIN RAS, 52 p. (In Russ.)
- Shatrov V.A., Voitsekhovskii G.V. (2009) The use of lanthanides for the reconstruction of Phanerozoic and Proterozoic sedimentation environments exemplified by sections in the cover and basement of the East European Platform. *Geochem. Int.*, **47**(8), 758-776 (Translated from *Geokhimiya*, (8), 805-824).
- Smyslov A.A. (1974) Uranium and thorium in the Earth's crust. Leningrad, Nedra, 231p. (In Russ.)
- Stepanova T.I., Kucheva N.A. (2006) Khudolaz Section – the regional substages stratotype of the Lower Carboniferous subregional scheme for the eastern slope of the Urals. *Lithosphere (Russia)*, **1**(1), 45-75. (In Russ.)
- 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. *Evolution of life on Earth*. Tomsk, TGU Publ., 233-236. (In Russ.)
- Stepanova T.I., Kulagina E.I., Kucheva N.A., Mizens G.A., Pazukhin V.N. (2013) Chernyshevka Section on the Khudolaz River (eastern slope of the Southern Urals). *Tr. IGG UrO RAN*. V. 160, 32-38. (In Russ.)
- Teilor S.R., McLennan S.M. (1988) The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Moscow, Mir Publ., 384 p. (In Russ.)

- 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.
- Tostevin R., Shields G.A., Tarbuck G.M., He T., Clarkson M.O., Wood R.A. (2016) Effective use of cerium anomalies as a redox proxy in carbonate-dominated marine settings. *Chem. Geol.*, **438**, 146-162.
- Vosel' Yu.S. (2015) Geochemistry of uranium in modern carbonate deposits of small lakes (forms of occurrence and isotopic ratios of $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$). Cand. geol. and min. sci. diss. Novosibirsk, IGM SO RAN, 128 p. (In Russ.)
- Wallace M.W., Hood A.V.S., Shuster A., Greig A., Planavsky N.J., Reed C.P. (2017) Oxygenation history of the Neoproterozoic to early Phanerozoic and the rise of land plants. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **466**, 12-19.
- Webb G.E., Kamber B.S. (2000) Rare earth elements in Holocene reefal microbialites: a new shallow seawater proxy. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **64**, 1557-1565.
- Yazeva R.G., Bochkarev V.V. (1998) Geology and geodynamics of the Southern Urals. Ekaterinburg, IGG UrO RAN, 204 p. (In Russ.)
- Yudovich Y.E., Ketris M.P. (2010) Geochemical and mineralogical indicators of volcanogenic components in sedimentary strata. Ekaterinburg, UrO RAN, 412 p. (In Russ.)
- Yudovich Y.E., Ketris M.P. (2011) Geochemical indicators of lithogenesis (lithological geochemistry). Syktyvkar, Geoprint Publ., 742 p. (In Russ.)
- Yudovich Y.E., Ketris M.P. (2014) Geochemistry of manganese. Syktyvkar, Geoprint Publ., 538 p. (In Russ.)
- Yudovich Y.E., Shishkin M.A., Lyutikov N.V., Ketris M.P., Belyaev A.A. (1998) Geochemistry and ore genesis of black shale in the Lemvin zone of the Urals northern part. Syktyvkar, Prolog Publ., 340 p. (In Russ.)