

Палеоширотный градиент содержания углекислоты в атмосфере Северного полушария в серпуховском веке

Журавлев А. В.

ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН,
г. Сыктывкар
micropalaeontology@gmail.com

Аннотация

Исследование посвящено реконструкции пространственного распределения CO_2 в атмосфере Северного полушария в начале позднепалеозойского ледникового периода (раннекаменноугольная эпоха, серпуховский век, фаза ziegleri). Использован изотопный анализ карбонатов и конodontов для преодоления ограничений существующих моделей, оперирующих средними значениями $p\text{CO}_2$. Результаты указывают на наличие палеоширотного градиента с максимумом в тропической зоне. Среднее значение $p\text{CO}_2$ составляет 582 ppm, сопоставимое с моделью COPSE. Работа подчеркивает важность учета пространственных вариаций содержания углекислоты в палеоклиматических реконструкциях.

Ключевые слова:

углекислый газ, атмосфера, климат, каменноугольный период, палеогеография

Углекислота – один из основных парниковых газов, содержание которого в атмосфере существенно влияет на климат Земли за счет так называемого парникового эффекта. Этот эффект известен с XIX в. [1] и рассматривается в качестве основного драйвера климатических изменений в геологическом прошлом и настоящем [2, 3]. По этой причине многие палеоклиматические реконструкции базируются на восстановлении содержания CO_2 в атмосфере ($p\text{CO}_2$ atm) на основе моделей углеродного цикла. Из наиболее разработанных моделей следует отметить GEOCARB [4], GEOCARBSULF [5], COPSE [6], GEOCARB_NET, SCION, GEOCLIM [7]. Они позволяют реконструировать среднее содержание углекислоты в атмосфере с довольно высокой детальностью (от 10 до 0,5 млн лет). При этом практически не учитываются пространственные вариации, в том числе обусловленные локальными источниками углекислоты. К последним относятся области эндогенной активности, обширных лесных пожаров и выветривания обогащенных углеродом пород (углей, горючих сланцев). Локальное снижение $p\text{CO}_2$ atm за счет поглощения углекислоты из атмосферы может быть связано с зонами интенсивного выветривания силикатов, а также повышенной биопродук-

Paleolatitudinal gradient of carbon dioxide content in the Serpukhovian atmosphere of the Northern Hemisphere

Zhuravlev A. V.

Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS,
Syktyvkar
micropalaeontology@gmail.com

Abstract

This study focuses on reconstructing the spatial distribution of carbon dioxide in the atmosphere ($p\text{CO}_2$) of the Northern Hemisphere during the Early Carboniferous (Serpukhovian, ziegleri Zone) – a time marking the onset of the Late Paleozoic Ice Age. The isotopic analysis of carbonates and conodont elements are used to overcome limitations of existing paleoclimate models, which primarily operate with average $p\text{CO}_2$ values. The obtained results indicate the presence of a paleolatitudinal gradient with a maximum in the tropical belt. The average $p\text{CO}_2$ value is 582 ppm, comparable to the COPSE model. This work highlights the importance of considering spatial variations of carbon dioxide in paleoclimate reconstructions.

Keywords:

carbon dioxide, atmosphere, climate, Carboniferous, paleogeography

тивности фотосинтезирующих и карбонат-выделяющих организмов.

Другой подход к реконструкции содержания углекислоты в атмосфере опирается на фактические данные по прокси-параметрам, косвенно связанным с $p\text{CO}_2$ atm [8]. К таким параметрам относятся изотопный состав углерода фитопланктона [9], планктонных фораминифер, конodontов [10] и карбонатов почв, а также морфологические признаки наземной растительности (устычный индекс), изотопный состав бора биогенных карбонатов и др. (см. обзоры в [7, 8]). Для палеозоя все указанные параметры, за исключением изотопного состава углерода планктонных фораминифер, в разной степени доступны для изучения [7]. Реконструкции среднего уровня CO_2 по прокси-параметрам, в целом, хорошо согласуются с результатами моделирования. Несмотря на то, что абсолютные значения могут сильно отличаться, в модельных и прокси-данных, как правило, отмечаются общие тренды (рис. 1).

Помимо реконструкции средних значений, интерес представляет восстановление пространственных вариаций содержания углекислоты в атмосфере, особенно для временных интервалов, отвечающих глобальным потепле-

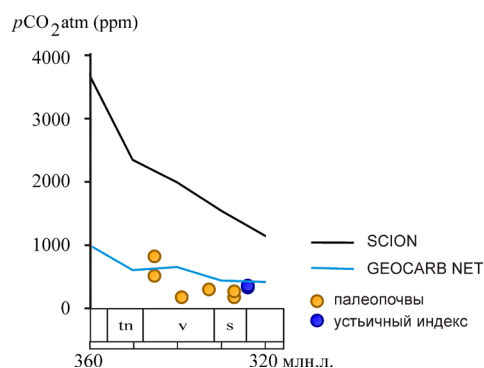


Рисунок 1. Динамика содержания углекислоты в атмосфере в поздневизейско-серпуховское время по результатам моделирования и прокси-параметрам (по [7]).

Условные обозначения. Здесь и на рис. 4: tn – турнейский век; v – визейский век; s – серпуховский век.

Figure 1. The dynamics of atmospheric carbon dioxide content during the Late Viséan-Serpukhovian based on the modeling results and proxy parameters (according to [7]).

Keys. Here and in Fig. 4: tn – Tournaisian Stage; v – Viséan Stage; s – Serpukhovian Stage.

ниям или похолоданиям. Один из эпизодов значительной трансформации климата, известный как начало позднепалеозойского ледникового периода, приурочен к самому концу позднего девона и раннему карбону [11, 12]. Максимальное похолодание во время позднепалеозойского ледникового периода соответствует поздневизейско-серпуховскому и средне-позднекаменноугольному времени [13], а на ранний серпухов (фаза ziegleri) приходится межледниковье [14, 15].

Цель данной работы – реконструкция палеоширотных вариаций содержания углекислоты в атмосфере для начала серпуховского века (фаза ziegleri) в Северном полушарии.

Материалы и методы

Материалом для исследования послужили данные, полученные из пяти разрезов Восточной Европы: скважина Падимейская-6 (Падимейская ступень Воркутинского поперечного поднятия, север Печорской плиты), разрезы на реках Миссиссиппка (Приполярный Урал), Изьяю (юг поднятия Чернышева), в бассейне р. Кожвы (юг Печоро-Кожвинского поднятия Печорской плиты) и карьере Полотняный Завод (юго-запад Московской синеклизы Восточно-Европейской платформы). Палеогеографически эти разрезы приурочены к восточной части палеоконтинента Лавруссия и характеризуют значительный палеоширотный диапазон от 6° до 25° с. ш. (рис. 2).

Стратиграфическую основу составили биостратиграфические (по конодонтам) и изотопно-стратиграфические данные. Во всех рассматриваемых разрезах установлен интервал, отвечающий конодонтовой зоне ziegleri (примерно соответствует тарусскому и стешевскому горизонтам) [15]. Из этого интервала сделаны изотопные анализы углерода и кислорода карбонатов и углерода конодонтовых элементов [10, 15].

В качестве базового прокси-признака использована разница изотопного состава углерода карбонатов и коно-

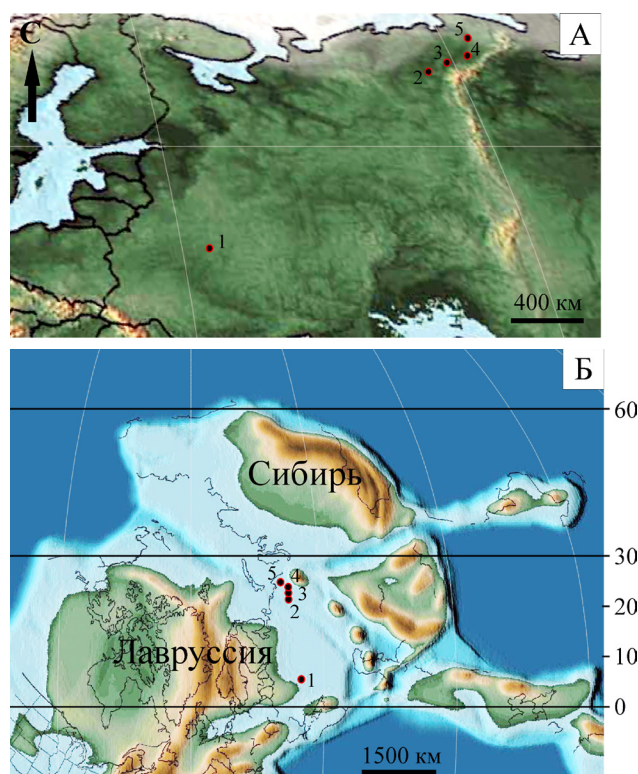


Рисунок 2. Современное (А) и палеогеографическое (Б) (по [16]) положения рассматриваемых разрезов.

Условные обозначения. 1 – Полотняный Завод; 2 – Кожва и Каменка; 3 – Изьяю; 4 – Миссиссиппка; 5 – Падимейская-6.

Figure 2. Present-day (A) and paleogeographic (B) (according to [17]) positions of the studied sections.

Keys. 1 – Polotnyany Zavod; 2 – Kozhva and Kamenka; 3 – Izayyu; 4 – Mississippi; 5 – Padimeyskaya-6.

донтовых элементов (DELTA_C, ‰ VPDB). Предполагается, что эта величина обратно пропорциональна содержанию углекислоты в атмосфере [10]. Данная зависимость носит статистический характер и позволяет реконструировать pCO_2 atm с некоторыми погрешностями. Реконструкции проведены двумя способами – по уравнениям регрессии [там же] и с помощью модели на основе машинного обучения.

Первый способ был описан ранее [там же]. Установлены параметры линейной регрессии для двух крупных групп конодентов – отрядов Ozarkodinida и Prioniodinida. Для озаркодинид зависимость выглядит следующим образом:

$$pCO_2 \text{ atm} = -71.6 \cdot \text{DELTA}_C + 2744.6 \text{ (ppm)},$$

а для приониодинид –

$$pCO_2 \text{ atm} = -66.2 \cdot \text{DELTA}_C + 2465.7 \text{ (ppm)}.$$

При этом ошибка определения pCO_2 atm относительно данных [8] достигает 220 ppm.

Для реализации второго способа на исходных данных из [10], дополненных значениями $\delta^{18}O_{carb}$, была построена модель на основе алгоритма Random Forest. В качестве обучающей выборки использовали данные по наиболее вероятному содержанию углекислоты [7, 8] и средние данные по изотопному составу кислорода карбонатов и углерода карбонатов и конодонтовых элементов (отдельно для представителей отрядов Ozarkodinida и Prioniodinida) [10].

Средние значения вычисляли для временных интервалов, отвечающих конодонтовым зонам, в диапазоне от раннего франа до позднего серпухова. Поскольку представители конодентов семейства *Cavusgnathidae* (*Cavusgnathus*, *Mestognathus*) характеризуются утяжеленным изотопным составом углерода по сравнению с другими таксонами раннекаменноугольных конодентов (разница может составлять несколько промилле), они были исключены из рассмотрения. Обучение модели осуществляли с использованием утилиты Create ML и фреймворка Core ML для MacOS (Apple Inc., 2019–2024). Выбор в качестве платформы MacOS обусловлен высокой степенью ее программно-аппаратной оптимизации для решения задач машинного обучения. Среднеквадратичная ошибка полученной модели составляет 97 ppm, а максимальная – 380 ppm.

Из-за статистического характера связи DELTAC и содержания углекислоты в атмосфере проведенные реконструкции $p\text{CO}_2\text{atm}$ являются полуколичественными. Этим,

в частности, объясняется отклонение получаемых значений от реконструированных по другим прокси-признакам [8, 9] и результатов моделирования [13]. Значительные отклонения некоторых реконструированных значений, вероятно, обусловлены действием других факторов, влияющих на изотопный состав углерода конодонтовых элементов. К таким факторам, например, относятся локальные особенности состава пищевой базы, температура воды, уровень первичной биопродуктивности, индивидуальные особенности метаболизма [16].

Результаты и их обсуждение

Реконструкции содержания углекислоты для конодонтовой зоны *ziegleri* проведены по средним значениям $\delta^{18}\text{Ocarb}$, $\delta^{13}\text{Ccarb}$, $\delta^{13}\text{Ccon}$ для пяти местонахождений (скважина 6-Падимейская, разрезы на реках Миссисиппка, Изьяю, Каменка и Кожва (бассейн р. Кожвы)

Исходные значения и результаты реконструкции содержания углекислоты в атмосфере для раннего серпухова (фаза *ziegleri*)

Initial values and results of reconstruction of carbon dioxide content in the Early Serpukhovian atmosphere (*ziegleri* Zone)

Разрез	Палео-широта (° с. ш.)	Таксон конодентов	Отряд	$\delta^{18}\text{O carb}$ ‰	$\delta^{13}\text{C carb}$ ‰	$\delta^{13}\text{C con}$ ‰	$p\text{CO}_2$ ppm	
							ML	Reg
Изьяю 4	22,5	<i>Lochriea ziegleri</i>	Ozarkodinida	25,4	2,2	-31,5	640	336
Изьяю 4	22,5	S-element	Ozarkodinida	26,7	2,5	-26,8	596	653
Изьяю 4	22,5	<i>Gnathodus girtyi</i>	Ozarkodinida	29,8	1,7	-27,2	402	677
Изьяю 4	22,5	<i>Gnathodus girtyi</i>	Ozarkodinida	29,8	1,7	-26,3	276	743
Изьяю 4	22,5	<i>Idioprioniodus</i> sp.	Prioniodinida	29,8	1,7	-25,3	740	681
Изьяю 4	22,5	<i>Gnathodus bilineatus</i>	Ozarkodinida	27,4	1,7	-27,0	316	695
Изьяю 4	22,5	<i>Gnathodus praebilineatus</i>	Ozarkodinida	27,4	1,7	-27,9	421	627
Изьяю 4	22,5	<i>Gnathodus</i> sp.	Ozarkodinida	27,4	1,7	-27,5	425	658
Изьяю 4	22,5	<i>Hindeodus spiculus</i>	Ozarkodinida	27,4	1,7	-28,1	387	610
Изьяю 4	22,5	<i>Idioprioniodus</i> sp.	Prioniodinida	27,4	1,7	-25,7	461	655
Изьяю 4	22,5	<i>Kladognathus</i> sp.	Prioniodinida	27,4	1,7	-26,1	319	625
Изьяю 4	22,5	<i>Vogelgnathus campbelli</i>	Ozarkodinida	27,4	1,7	-27,7	410	642
Изьяю 4	22,5	<i>Idioprioniodus</i> sp.	Prioniodinida	27,4	1,7	-26,3	313	617
Изьяю 4	22,5	<i>Gnathodus</i> sp.	Ozarkodinida	25,6	2,7	-27,0	707	622
Изьяю 4	22,5	<i>Hindeodus</i> sp.	Ozarkodinida	25,6	2,7	-26,9	707	625
Изьяю 4	22,5	<i>Hindeodus cristulus</i>	Ozarkodinida	23,2	3,0	-25,8	595	689
Изьяю 4	22,5	<i>Gnathodus bilineatus</i>	Ozarkodinida	28,0	3,1	-26,7	546	612
Изьяю 4	22,5	<i>Gnathodus bilineatus</i>	Ozarkodinida	28,0	3,1	-26,1	513	656
Изьяю 4	22,5	<i>Kladognathus</i> sp.	Prioniodinida	27,7	3,1	-27,6	371	435
Изьяю 4	22,5	<i>Lochriea</i> sp.	Ozarkodinida	27,7	3,1	-27,9	411	529
Изьяю 4	22,5	<i>Gnathodus bilineatus</i>	Ozarkodinida	28,4	2,8	-27,0	477	612
Изьяю 4	22,5	S-element	Ozarkodinida	27,8	3,2	-24,9	497	733
Изьяю 4	22,5	<i>Gnathodus bilineatus</i>	Ozarkodinida	26,9	3,3	-25,7	597	671
Изьяю 4	22,5	fragment	Ozarkodinida	24,6	2,7	-26,1	619	680
Изьяю 4	22,5	S-element	Ozarkodinida	24,5	2,9	-25,9	642	684
Изьяю 4	22,5	S-element	Ozarkodinida	24,5	2,9	-29,4	546	435
Кожва 125	21,5	<i>Gnathodus bilineatus</i>	Ozarkodinida	26,4	-0,4	-26,4	920	887
Кожва 125	21,5	<i>Idioprioniodus</i> sp.	Prioniodinida	26,4	-0,4	-24,5	1007	871
Кожва 125	21,5	<i>Gnathodus bilineatus</i>	Ozarkodinida	28,1	-0,8	-26,4	988	916
Кожва 125	21,5	<i>Idioprioniodus</i> sp.	Prioniodinida	24,5	-1,8	-27,1	947	793
Кожва 125	21,5	M-element	Ozarkodinida	28,7	0,5	-26,0	851	851
Каменка 99	21,5	<i>Idioprioniodus</i> sp.	Prioniodinida	30,3	0,9	-26,8	274	634
Каменка 99	21,5	<i>Lochriea</i> sp.	Ozarkodinida	30,3	0,9	-27,3	284	722

Кожва 5С	21,5	M-element	Ozarkodinida	23,9	0.2	-27,1	593	788
Миссиссипка	23,5	S-element	Ozarkodinida	23,9	1.1	-27,3	520	709
Падимей-6	25	<i>Idioproniodus</i> sp.	Prioniodinida	22,2	2.9	-25,8	577	570
Падимей-6	25	<i>Gnathodus</i> sp.	Ozarkodinida	22,2	2.9	-29,3	497	444
Падимей-6	25	S-element	Ozarkodinida	22,2	2.9	-27,4	576	575
Падимей-6	25	fragment	Ozarkodinida	24,4	3.2	-26,3	729	632
Полотняный Завод	5,8	<i>Lochriea commutata</i>	Ozarkodinida	25,6	1.3	-27,2	628	701
Полотняный Завод	5,8	<i>Gnathodus</i> sp.	Ozarkodinida	27,4	1.2	-24,2	1015	921
Полотняный Завод	5,8	<i>Idioproniodus</i> sp.	Prioniodinida	24,8	1.0	-23,8	1109	824

Условные обозначения. ML – реконструкция с помощью модели машинного обучения; Reg – реконструкция с помощью уравнений регрессии.

Keys. ML – reconstruction obtained using the machine learning model; Reg – reconstruction obtained using regression equations.

и в карьере Полотняный Завод) (рис. 2; таблица). Местонахождения, согласно палеогеографической реконструкции для серпуховского века [17], характеризуют палеоширотный интервал от 6° до 25° в Северном полушарии (рис. 2). В таблице приведены результаты реконструкции двумя описанными методами. Следует отметить, что оба метода показывают сходный палеоширотный тренд значений $p\text{CO}_2$ atm. Максимальные значения реконструированы для низких широт (разрез Полотняный Завод), а минимальные – для широт 23–25°. Наиболее существенное снижение $p\text{CO}_2$ atm отмечается на палеошироте около 22° (рис. 3), т. е. на границе тропического и субтропического поясов. Среднее реконструированное значение $p\text{CO}_2$ atm для Северного полушария по изученным разрезам составляет от 582 (реконструкция с помощью модели машинного обучения) до 668 (реконструкция с помощью уравнений регрессии) ppm.

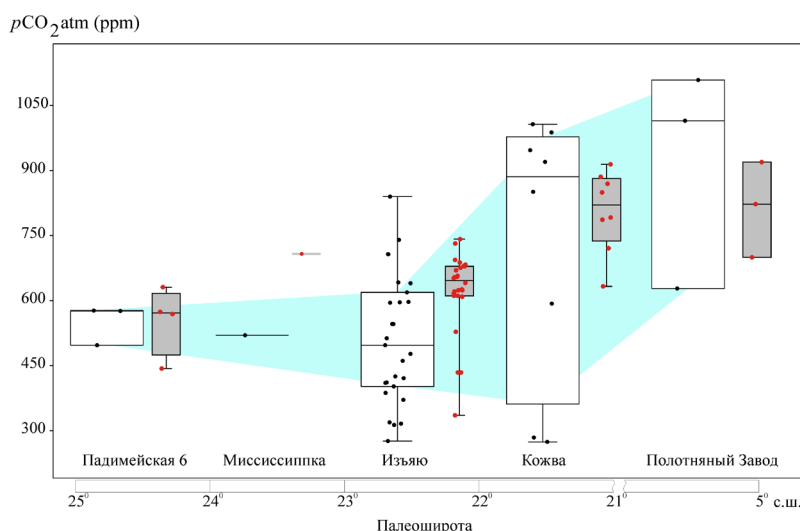


Рисунок 3. Реконструированный палеоширотный градиент содержания углекислоты в атмосфере (серпуховский век, фаза ziegleri). Для результатов реконструкции кватили 25–75 % обозначены прямоугольниками, горизонтальная линия внутри прямоугольника отвечает медиане. Минимальные и максимальные значения показаны с помощью линий с засечками. Точки соответствуют реконструированным значениям для отдельных образцов. Красным цветом обозначены значения реконструкции содержания углекислоты в атмосфере с помощью уравнений регрессии, а черным – с помощью модели машинного обучения.

Figure 3. The reconstructed paleolatitudinal gradient of atmospheric carbon dioxide content (Serpukhovian, ziegleri Zone). For reconstruction results, the 25–75 % quartiles are shown as rectangles, with the horizontal line inside each rectangle representing the median. Minimum and maximum values are shown by whiskered lines. Points correspond to reconstructed values for individual samples. Red points indicate the atmospheric carbon dioxide reconstructions obtained using regression equations, and black points indicate the reconstructions obtained using the machine learning model.

Среднее реконструированное значение $p\text{CO}_2$ atm для Северного полушария (582 ppm) ближе всего к среднему значению, полученному моделью COPSE при параметре чувствительности климата к содержанию углекислоты равном 4,5 [13] (рис. 4). При этом в Северном полушарии отмечается палеоширотный градиент с максимумом в тропической зоне (рис. 3). Полученная разница в содержании углекислоты в атмосфере между субтропической и тропической зонами достигает 300–400 ppm, что мало реалистично. Учитывая значительную ошибку в реконструкции абсолютных значений уровня CO_2 (около 100 ppm), можно предположить, что реальный градиент был меньше. В любом случае оценки носят полуколичественный характер, и имеет смысл анализировать только общий характер пространственных вариаций $p\text{CO}_2$ atm.

Наличие положительной аномалии в тропической области может быть объяснено действием нескольких факторов. Во-первых, это могло быть связано с эмиссией углекислоты в пределах Кольско-Днепровской магматической провинции и/или Уральской вулканической островной дуги и последующим перераспределением повышенных содержаний углекислого газа за счет атмосферной

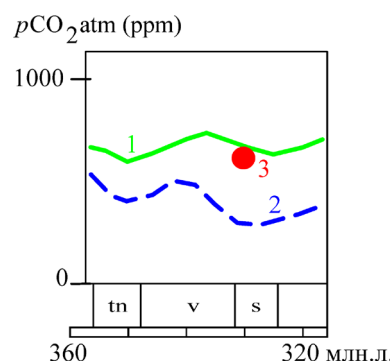


Рисунок 4. Реконструкция содержания углекислоты в атмосфере в раннем карбоне.

Условные обозначения. 1 – модель COPSE [13]; 2 – среднее значение по прокси-параметрам [там же]; 3 – среднее значение для восточной части Лавруссии по данным из настоящей работы.

Figure 4. Reconstruction of atmospheric carbon dioxide content in the Early Carboniferous.

Keys. 1 – COPSE model [13]; 2 – mean value based on proxy parameters [see above]; 3 – mean value for the eastern part of Laurussia based on data from the present study.

циркуляции в пределах тропической зоны конвергенции. Масштабы эмиссии могли быть значительными, особенно в случае наличия карбонатных пород в области магматической активности [18]. Вторым фактором мог выступать значительный температурный градиент в приповерхностном слое воды, что обуславливало поглощение углекислоты в приполярных районах и ее эмиссию в тропической области. Подобный механизм известен в современных океанах, хотя и играет незначительную роль в перераспределении углекислого газа в атмосфере. В среднем палеозое температурный градиент мог быть выше [19], а соответствующий эффект – значительней. Еще одним фактором могло быть крайне неравномерное распределение биопродуктивности и соответствующая разница в поглощении углекислоты при фотосинтезе как наземными, так и морскими экосистемами, а также карбонат-продуцирующими организмами в пределах тропического и субтропического поясов. Не исключено также совместное действие этих и других факторов (см. [13]) при невысокой интенсивности атмосферной циркуляции на низких широтах.

Приуроченность максимального градиента значений $p\text{CO}_2$ atm к границе тропического и субтропического поясов (примерно 22° с. ш. в древних координатах), вероятно, отражает структуру глобальной атмосферной циркуляции в раннесерпуховское время. Наличие такого градиента свидетельствует о сохранении отчетливой климатической дифференциации в эпоху раннесерпуховского межледникова [14].

Выводы

Полученные результаты позволяют предположить, что в первой половине позднепалеозойского ледникового периода (конец раннекаменноугольной эпохи) в Северном полушарии в восточной части Лавруссии существовал широтный градиент в содержании углекислоты в атмосфере с максимумом в тропической области. Предполагается, что наибольшие изменения содержания углекислоты были приурочены к границе тропического и субтропического поясов.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Источники и литература / References

1. Foote, E. N. Circumstances affecting the heat of sun's rays / E. N. Foote // *American Journal of Science and Arts*. – 1856. – Vol. XXII (LXVI). – P. 382–383.
2. McKenzie, N. R. Earth's outgassing and climatic transitions: The slow burn towards environmental 'catastrophes'? / N. R. McKenzie, H. Jiang // *Elements*. – 2019. – Vol. 15, № 5. – P. 325–330. – DOI: 10.2138/gselements.15.5.325.
3. Crowley, J. K. CO_2 and climate change / J. K. Crowley, R. A. Berner // *Science*. – 2001. – Vol. 292. – P. 870–872. – DOI: 10.1126/science.1061664.
4. Berner, R. A. GEOCARB III: A revised model of atmospheric CO_2 over Phanerozoic time / R. A. Berner, Z. Kothavala // *American Journal of Science*. – 2001. – Vol. 301, № 2. – P. 182–204. – DOI: 10.2475/ajs.301.2.182.

5. Error analysis of CO_2 and O_2 estimates from the long-term geochemical model GEOCARBSULF / D. L. Royer, Y. Donnadieu, J. Park [et al.] // *American Journal of Science*. – 2014. – Vol. 314, № 9. – P. 1259–1283.
6. Lenton, T. M. COPSE reloaded: An improved model of biogeochemical cycling over Phanerozoic time / T. M. Lenton, S. J. Daines, B. J. W. Mills // *Earth-Science Reviews*. – 2018. – Vol. 178. – P. 1–28. – DOI: 10.1016/j.earscirev.2017.12.004.
7. User-friendly carbon-cycle modelling and aspects of Phanerozoic climate change / T. H. Torsvik, D. L. Royer, C. M. Marcilly, S. C. Werner // *Applied Computing and Geosciences*. – 2024. – Vol. 23, Art. 100180. – DOI: 10.1016/j.acags.2024.100180.
8. Foster, G. Future climate forcing potentially without precedent in the last 420 million years / G. Foster, D. Royer, D. Lunt // *Nature Communications*. – 2017. – Vol. 8, Art. 14845. – DOI: 10.1038/ncomms14845.
9. Molecular fossils from phytoplankton reveal secular $p\text{CO}_2$ trend over the Phanerozoic / C. R. Witkowski, J. W. H. Weijers, B. Blais [et al.] // *Sci. Adv.* – 2018. – № 4. – eaat4556.
10. Zhuravlev, A. V. Reconstruction of CO_2 levels in the Late Devonian-Mississippian on the basis of decoupling of C-isotope composition of conodont elements and host carbonates / A. V. Zhuravlev // *Open Palaeontology*. – 2026. – Vol. 3, № 1. – DOI: 10.26034/la.opal.2026.7198.
11. Fielding, C. R. The late Paleozoic ice age – A review of current understanding and synthesis of global climate patterns / C. R. Fielding, T. D. Frank, J. L. Isbell // In: Fielding, C. R., Frank, T. D., Isbell, J. L. (Eds.). *Resolving the Late Paleozoic Ice Age in Time and Space*. – Geological Society of America. – 2008. – P. 343–354. – DOI: 10.1130/2008.2441(24).
12. Montañez, I. P. The Late Paleozoic Ice Age: an evolving paradigm / I. P. Montañez, C. J. Poulsen // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. – 2013. – Vol. 41. – P. 24.1–24.28. – DOI: 10.1146/annurev.earth.031208.100118.
13. Marcilly, C. M. Late Paleozoic climate transition from a long-term carbon cycle modeling perspective / C. M. Marcilly, T. H. Torsvik, M. J. Jones // *Global and Planetary Change*. – 2025. – Vol. 253, Art. 104984. – DOI: 10.1016/j.gloplacha.2025.104984.
14. Timing of the Late Palaeozoic glaciation in western Gondwana: New ages and correlations from Paganzo and Parana basins / V. Valdez Buso, J. P. Milana, M. di Pasquo [et al.] // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2020. – Vol. 544, Art. 109624. – DOI: 10.1016/j.palaeo.2020.109624.
15. Late Mississippian (early Serpukhovian) carbon isotope record of northern Laurussia: A proposal for the Viséan/Serpukhovian boundary / A. V. Zhuravlev, Y. A. Vevel, D. A. Gruzdev, A. V. Erofeevsky // *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. – 2023. – Vol. 40, № 1. – P. 35–43. – DOI: 10.22201/cgeo.20072902e.2023.1.1722.
16. Zhuravlev, A. V. Carbon isotope study of conodont elements: Applications and limitations / A. V. Zhuravlev // *Marine Micropaleontology*. – 2023. – Vol. 178, Art. 102200. – DOI: 10.1016/j.marmicro.2022.102200.

17. Scotese, C. R. PALEOMAP PaleoAtlas for GPlates and the PaleoDataPlotter program / C. R. Scotese // Geological Society of America Abstracts with Programs. – 2016. – Vol. 48. – № 5.
18. CO₂ fluxing and carbon assimilation by arc melts during magma–limestone interaction / F. M. Deegan, M. Capriolo, V. R. Troll [et al.] // Chemical Geology. – 2026. – Vol. 704, Art. 123264. – DOI: 10.1016/j.chemgeo.2026.123264.
19. Spatial biases in oxygen-based Phanerozoic seawater temperature reconstructions / A. Pohl, T. W. Wong Hearing, A. Brayard [et al.] // Earth and Planetary Science Letters. – 2025. – Vol. 663, Art. 119418. – DOI: 10.1016/j.epsl.2025.119418.

Благодарность (госзадание)

Исследования проводились в рамках госзадания по теме 122040600008-5.

Автор признателен рецензенту за конструктивные замечания, позволившие улучшить статью.

Acknowledgements (state task)

The study was conducted within the framework of the state task on the topic 122040600008-5.

The author is grateful to the reviewer for constructive comments that improved the article.

Информация об авторе:

Журавлев Андрей Владимирович – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, Scopus Author ID 7101701945, ORCID 0000-0003-4043-6303; SPIN-код: 4383-5600 (167000, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 54; e-mail: micropalaeontology@gmail.com).

About the author:

Andrey V. Zhuravlev – Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Senior Researcher at the Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Scopus Author ID 7101701945, ORCID 0000-0003-4043-6303; SPIN-code 4383-5600 (54 Pervomaiskaya st., Syktyvkar, Komi Republic, 167982, Russian Federation; e-mail: micropalaeontology@gmail.com).

Для цитирования:

Журавлев, А. В. Палеоширотный градиент содержания углекислоты в атмосфере Северного полушария в серпуховском веке / А. В. Журавлев // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Науки о Земле». – 2026. – № 4 (89). – С. 5–10.

For citation:

Zhuravlev, A. V. Paleoshirotnyj gradient sodержaniya uglekisloty v atmosfere Severnogo polushariya v serpuhovskom veke [Paleolatitudinal gradient of carbon dioxide content in the Serpukhovian atmosphere of the Northern Hemisphere] / A. V. Zhuravlev // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series "Earth Sciences". – 2026. – № 4 (89). – P. 5–10.

Дата поступления рукописи: 03.03.2026

Прошла рецензирование: 11.03.2026

Принято решение о публикации: 15.04.2026

Received: 03.03.2026

Reviewed: 11.03.2026

Accepted: 15.04.2026