

УДК 551.733.3(470.1)

DOI: 10.24930/1681-9004-2022-22-5-599-611

Проявление позднеаэронского события в разрезе силура на западном склоне Приполярного Урала

Т. М. Безносова, В. А. Матвеев

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 167982, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, 54,
e-mail: beznosova@geo.komisc.ru

Поступила в редакцию 22.02.2022 г., принята к печати 25.04.2022 г.

Объект исследования. В статье приводятся результаты изучения следов глобального позднеаэронского биотического и изотопного ($\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$) событий, сохранившихся в новом опорном разрезе нижнего силура на Приполярном Урале. **Материалы и методы.** Образцы осадочных пород, пробы на микрофауну, изотопный анализ и коллекции с остатками бентосной фауны собраны авторами в разные годы во время полевых работ. Исследования подтверждены седиментологическими, биостратиграфическими и хемотратиграфическими авторскими данными. **Результаты.** Событийно-стратиграфический интервал, установленный в верхней части лолашорского горизонта (аэрония) силура, характеризуется усилением регрессивных тенденций, сокращением биоразнообразия, исчезновением конодонтов *Pranognathus tenuis* и брахиопод рода *Pentamerus*, а также $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ -аномалиями, наблюдаемыми в верхней толще лолашорского горизонта. **Выводы.** Полученные данные свидетельствуют об эвстатическом падении уровня моря, крупной экосистемной перестройке и перерыве в осадконакоплении в конце лолашорского времени. Рубеж лолашорского и филиппельского горизонтов (аэрония и теличия) фиксирует резкий отрицательный сдвиг $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$, впервые установленный в разрезе нижнего силура на территории Европейского Северо-Востока России.

Ключевые слова: силур, лландовери, аэрон, телич, Событие Сэндвик, изотопы углерода

Источник финансирования

Исследования проведены в соответствии с темой № 1021062311460-9-1.5.3 государственного задания ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН

Manifestation of the Late Aeronian event in the Silurian section on the western slope of the Subpolar Urals

Tat'yana M. Beznosova, Vladimir A. Matveev

N.P. Yushkin Institute of Geology, Federal Research Centre KSC, UB RAS, 54 Pervomaiskaya st., 167982 Syktyvkar, Russia,
e-mail: beznosova@geo.komisc.ru

Received 22.02.2022, accepted 25.04.2022

Research subject. The article presents the results of studying traces of the global Late Aeronian biotic and isotopic ($\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$) events preserved in a new reference section of the Lower Silurian in the Subpolar Urals. **Materials and methods.** The samples of sedimentary rocks and microfauna, the results of isotope analysis, as well as the collections with remains of benthic fauna collected by the authors in different years during fieldwork were investigated. The studies were confirmed by sedimentological, biostratigraphic and chemostratigraphic data obtained by the authors. **Results.** The event-stratigraphic interval, established in the upper part of the Lolashor stage (Aeronian) of the Silurian, is characterized by increasing regressive tendencies, decreasing biodiversity, disappearance of *Pranognathus tenuis* conodonts and brachiopods of the genus *Pentamerus*, as well as by $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ anomalies in the upper strata of the Lolashor stage. **Conclusions.** The obtained data indicate a eustatic drop in the sea level, a major ecosystem restructuring, and a sedimentation gap at the end of the Lolashor time. The boundary between the Lolashor and Philippel stages (Aeronian and Telychian) records a sharp negative isotopic shift of $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$, which was first observed in the Lower Silurian section in the European Northeast of Russia.

Keywords: Silurian, Llandovery, Aeronian, Telychian, Sandvika Event, carbon isotopes

Для цитирования: Безносова Т.М., Матвеев В.А. (2022) Проявление позднеаэронского события в разрезе силура на западном склоне Приполярного Урала. *Литосфера*, 22(5), 599–611. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-5-599-611>

For citation: Beznosova T.M., Matveev V.A. (2022) Manifestation of the Late Aeronian event in the Silurian section on the western slope of the Subpolar Urals. *Lithosphere (Russia)*, 22(5), 599–611. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-5-599-611>

Funding information

The work was conducted within the framework of the projects No. 1021062311460-9-1.5.3 of the Institute of Geology, Federal Research Centre Komi Scientific Centre UB, RAS

Acknowledgements

The authors are grateful to P. Männik for joint field work, I.V. Smoleva, an engineer of the “Geoscience” laboratory of the Institute of Geology, Komi Science Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences for determining the carbon isotopic composition in carbonate rocks. Special thanks to two anonymous reviewers for constructive comments and suggestions that helped improve this article.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с существующими противоречиями в датировке возраста лолашорского и филиппельского региональных горизонтов и определении рубежа аэрона и телича в разрезах Тимано-Североуральского региона нами был изучен новый разрез нижнего силура (обн. 109), в котором наиболее полно обнажены пограничные отложения лолашорского и филиппельского горизонтов на западном склоне Приполярного Урала (рис. 1). За основу расчленения нижнесилурийских отложений принята унифицированная стратиграфическая схема Урала (Стратиграфические..., 1993; Объяснительная..., 1994) с уточнениями (Безносова и др., 2020а), в которой лолашорский горизонт сопоставлен с аэронским ярусом, а филиппельский горизонт – с теличским ярусом. По стратиграфической полноте, содержанию ископаемых остатков фауны и доступности для изучения этот разрез может рассматриваться в качестве опорного для нижнего силура Североуральского региона.

Строение лолашорского горизонта в обнажении 109 отражает смену обстановок осадконакопления от открытошельфовых до прибрежно-лагунных. Существенные изменения наблюдаются в составе биот нижней и верхней толщ, составляющих горизонт. Нижняя толща включает обильную кораллово-строматопоратовую ассоциацию, а также ракушняки с брахиоподами *Pentamerus oblongus* (Sowerby) и комплекс конодонтов зоны *Pranognathus tenuis*, которые датируют аэронский возраст этой толщи. Верхняя толща горизонта формировалась в условиях постепенного обмеления морского бассейна, сопровождавшегося исчезновением стратиграфически важных видов брахиопод, конодонтов и развитием строматолитообразующей биоты. В этой толще нами установлена положительная аномалия значений изотопов углерода в карбонатах, а также резкий отрицательный экскурс $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$, который, возмож-

но, разделяет отложения лолашорского и филиппельского горизонтов и позволяет предположить присутствие следов глобального события Сэндвик (Sandvika Event) в рассматриваемом разрезе. Этот интервал разреза лолашорского горизонта, возможно, соотносится с позицией биотического события Сэндвик в стратиграфическо-событийной шкале силура – в нижней части конодонтовой зоны *Distomodus staurognathoides* и позднеаэронской граптолитовой зоны *Stimulograptus sedgwickii* (Lehnert et al., 2010, 321, рис. 1).

Событие Сэндвик было описано в Норвегии как крупное событие вымирания граптолитов зональных видов – *Lituigraptus convolutus* и *Stimulograptus sedgwickii* (Aldridge et al., 1993). В тех разрезах, где отсутствуют граптолиты, это событие характеризуется вымиранием определенного состава биоты – конодонтов *Pranognathus tenuis* (Aldridge), брахиопод рода *Pentamerus* и трилобитов, что способствует выявлению событийно-стратиграфического интервала этого глобального события (Johnson, 1989). Это же событие Л. Джеппссон (Jeppsson, 1990, 1996) и Олдридж с соавторами (Aldridge et al., 1993) рассматривали как океаническое, обусловленное климатическими изменениями в течение силура, считая, что основные литологические и фаунистические изменения (на примере разрезов в Скандинавии и странах Балтии), могли возникнуть без значительных изменений глобального уровня моря. Обобщение данных по изотопно-углеродным маркерам, биотическому и океаническому событиям подтвердило корреляцию позднеаэронского изотопного события с биособытием Сэндвик, а также тот факт, что в течение одного и того же временного интервала, предшествующего позднеаэронскому изотопному событию, вымерла глубоководная и мелководная морская фауна в разных регионах (Jeppsson, 1998; Munnecke et al., 2003; Melchin, Holmden, 2006; Loydell, Frýda, 2007; Calner, 2008; Storch, Frýda, 2012; Cooper et al., 2014; Hammarlund et al., 2019; Braun et al., 2021).

Трудности в установлении возрастной оценки рассматриваемого событийного интервала в отложениях нижнего силура западного склона Приполярье Урала обусловлены тем, что эти отложения не содержат ископаемых остатков фауны (например, граптолитов), общих с международными стандартными разрезами.

О возможном присутствии следов биособытия Сэндвик в разрезе лолашорского горизонта на западном склоне Приполярье Урала сделал предположение С.В. Мельников (1999), обнаруживший в нижней части лолашорского горизонта в обн. 217 комплекс конодонтов, характерных для зоны *Pranognathus tenuis*. Интервал разреза, заключающий эти конодонты, был им сопоставлен с эпизодом Джонг Примо (Jong Primo Episodes) + событие Сэндвик (Sandvika Event) (Жемчугова и др., 2001). Обоснованием стратиграфического положения событийного интервала в разрезе послужила последовательность эпизодов и событий, предложенная в работах Джеппссона (Jeppsson, 1990, 1998).

В работе других авторов (Lehnert et al., 2010, с. 321, рис. 1) событие Сэндвик сопоставлено со второй половиной граптолитовой зоны *sedgwicki*, а также с нижней третью конодонтовой зоны *Ozarkodina aldrigei* (или в параллельной конодонтовой шкале с нижней третью зоны *Distomodus stauognathoides*). То есть весь хроностратиграфический интервал конодонтовой зоны *Pr. tenuis* располагается между биотическими событиями Джонг Примо Эпизод (Jong Primo Episodes) и Сэндвик (Sandvika Event). Согласно этим данным, начало события Сэндвика определяется по исчезновению в разрезе конодонтов *Pr. tenuis*.

Положительные экскурсы $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$, обнаруженные в позднем эроне во многих регионах, совпадают с падением уровня моря и сокращением биоразнообразия, вызванными, как считается, оледенением (Azmy et al., 1998; Caputo, 1998; Veizer et al., 1999; Melchin, Holmden, 2006; Loydell, Frýda, 2007; Lehnert et al., 2010; Trotter et al., 2016).

Полученные нами результаты изучения лолашорского горизонта в уральском разрезе позволяют предположить, что интервал разреза в верхней толще горизонта с положительным изотопным экскурсом $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$, характеризующийся эвстатическим падением уровня моря и исчезновением конодонтов зоны *Pr. tenuis*, брахиопод *P. oblongus*, содержит следы глобального позднеазеронского события Сэндвик.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалом для статьи послужили коллекции литологических образцов с остатками фауны и изотопный состав углерода из нижнесилурийских разрезам западного склона Приполярье-



Рис. 1. Схема месторасположения изученных разрезов нижнего силура (Приполярье Урал, р. Кожым).

Fig. 1. Scheme of location of the studied Lower Silurian sections (Subpolar Urals, Kozhym River)

го Урала (обн. 109 и 217). Кроме того, учтены опубликованные результаты изучения разрезов нижнего силура (Опорные..., 1987; Мельников, 1999;

Жемчугова и др., 2001; Безносова, 1994, 2008; Мамвеев, 2013; Соколова, 2012; Männik et al., 2000). Определения остатков фауны из обн. 109 и 217 выполняли: О.В. Богоявленская – строматопороидеи, Н.А. Боринцева – табуляты, В.С. Цыганко – ругозы, Т.М. Безносова – брахиоподы, С.В. Мельников – конодонты (обн. 217), П. Мянник и Л.В. Соколова – конодонты (обн. 109).

Изотопный состав углерода определен в 43 образцах карбонатных пород в обнажении 109. Шаг отбора проб определялся литологическими особенностями толщи и составлял в среднем 0.5 до 5 м и в отдельных случаях увеличивался до 15 м. Определение изотопного состава углерода в карбонатных породах проведено в ЦКП “Геонаука” Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН на масс-спектрометре DELTA V Advantage И.В. Смолевой. Значения изотопных коэффициентов определялись в промилле (‰) по стандартам PDB NBS18 и NBS19 (TS-limestone) для углерода. Погрешность определения обоих коэффициентов не превышала $\pm 0.1\%$.

Коллекции образцов хранятся в Геологическом музее им. А.А. Чернова Института геологии Коми НЦ УрО РАН. Коллекция № 1181 – литологические образцы и шлифы, коллекция № 466 – образцы с остатками брахиопод и другой фауны.

ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДУЕМЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Отложения лолашорского и филипппельского горизонтов нижнего силура в бассейне р. Кожым в обн. 109 хорошо доступны для изучения и послыйного отбора образцов. Общая мощность изученного нами интервала разреза в этом обнажении составляет 208 м. В целях получения более полной информации об условиях формирования и биоистратиграфии лолашорского горизонта был проведен сравнительный анализ толщ, составляющих этот горизонт в обн. 217, расположенном в 45 км вниз по течению от обн. 109 (рис. 1), в котором филипппельский горизонт ранее был выбран в качестве гипостратотипа (Опорные..., 1987). Как сейчас установлено, пограничные отложения лолашорского и филипппельского горизонтов в этом обнажении вскрываются в высоких скальных выходах, обрывающихся в русло реки Кожым и практически недоступны для послыйного отбора образцов и проб.

Разрез лолашорского горизонта в обн. 109 начинается с выходов массивных доломитов на левом береговом склоне вблизи уреза воды (рис. 2) и нарастается вниз по течению реки. Отложения горизонта подразделяются на две толщи. Нижняя толща сложена преимущественно доломитами темно-серыми, массивными, биокластовыми, с желваками и линзами кремней. В основании тол-



Рис. 2. Первые выходы пород лолашорского горизонта. Река Кожым, обн. 109.

Fig. 2. The first rock outcrops of the Lolashor stage. Kozhym River, outcrop 109.

щи залегают ракушняки мощностью до 1.6 м, которые сложены целыми раковинами и отдельными створками брахиопод *Pentamerus oblongus* (Sowerby). Выше лежащие породы представлены чередованием доломитов толсто плитчатых, массивных, с колониями строматопороидей *Cladrodiction* sp. (рис. 3а), табулят *Catenipora gothlandica* (Iabe) с маломощными прослоями доломитов с детритом криноидей, гастропод и доломитов толсто плитчатых с обилием отдельных створок раковин пентамерид и их фрагментов (рис. 3б). Комплекс конодонтов включает в себя *Aspelundia* cf. *expansa* Armstrong, *Oulodus panuarensis* Bischoff, *Panderoodus* cf. *greenlandensis* Armstrong, *Ozarkodina wauoolaensis* Bischoff (Соколова, 2012). Аэронский возраст отложений толщи определяет присутствие в ней остатков брахиопод *P. oblongus* широкого географического распространения (Безносова, 2008; Beznosova, 2014). Эта толща в разрезе лолашорского горизонта отвечает максимальному повышению относительного уровня моря. Мощность толщи 77 м.

Верхняя толща сложена чередованием доломитов вторичных, серых, крупнокристаллических, массивных, доломитов микрослойчатых, строматолитовых и известняков тонко- и толсто плитчатых, светло-серых, афанитовых. В основании толщи доломиты участками брекчированные (рис. 3в, г), перекрываются доломитами массивного сложения, косослоистыми, выше которых в интервале 3.2 м наблюдается тектоническое нарушение. Этот интервал разреза представлен отдельными глыбами (до 1 м) и обломками светло- и темно-серых доломитов, в которых заключены перекристаллизованные фрагменты раковин пентамерид. Слои с

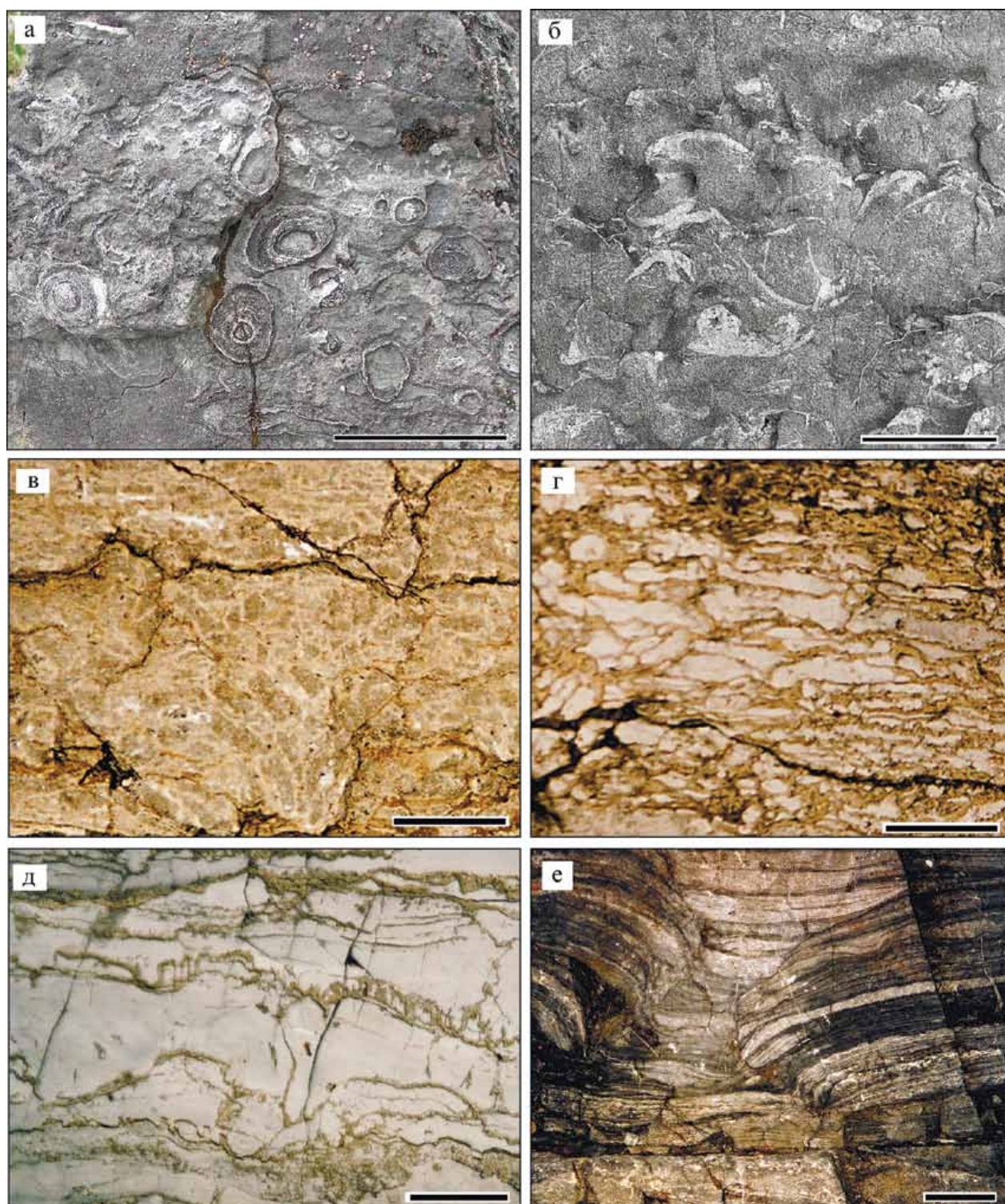


Рис. 3. Литологические типы пород лолашорского и филиппьельского горизонтов в обн. 109.

а – скопления трубчатых колоний строматопоройдей, б – ракушняк с пентамеридами, в – известняковые брекчии, г – брекчии растрескивания (?), д – известняк афонитовый с многочисленными стилолитовыми поверхностями, е – куполовидная строматолитовая постройка. Масштабная линейка – 5 см.

Fig. 3. The lithological rock types of boundary deposits of the Lolashor and the Filipp'el' stages in the outcrop 109.

а – clusters of tubular stromatoporoid colonies, б – shell rock with pentamerides, в – limestone breccias; г – crackle breccias (?), д – afonitic limestone with numerous stylolite surfaces, е – domal stromatolite structure. Scale bar – 5 cm.

конодонтами *Rexroadus* cf. *kentuckyensis* (Branson et Branson) и *Galerodus magalius* Melnikov приурочены преимущественно к нижней половине этой толщи.

Вверх по разрезу наблюдаются признаки изменений условий осадконакопления: постепенно исчезают остатки бентосной фауны, наблюдаются прослои доломитов с плоскогалечными конгломератами, трещинами усыхания осадка и прослоями строматолитов, достигающих мощности 2.2 м. Верхи толщи сложены чередованием доломитов светло-серых афанитовых со стилолитами (рис. 3д), доломитов микрослойчатых с поверхностями перерывов, знаками волновой ряби, следами микроразмывов и доломитов темно-серых, заключающих фрагменты строматопороидей, табулят и раковинный детрит. В кровле пачки залегают доломиты тонкослоистые со знаками волновой ряби, косой слоистостью, трещинами усыхания и с прослоями крупного плоскогалечного конгломерата мощностью (до 0.4 м).

Обмеление бассейна к концу лолашорского времени привело к полному исчезновению бентосных сообществ и, возможно, перерыву в осадконакоплении на рубеже лолашорского и филипппельского времени, который, к сожалению, не датируется палеонтологически, поскольку крайне мелководные отложения не содержат остатков фауны.

Основание филипппельского горизонта составляют доломиты серые, массивные, переслаивающиеся с доломитами микрослойчатыми, строматолитовыми (рис. 3е), с трещинами усыхания осадка, с прослоями плоскогалечного конгломерата.

Мощность верхней толщи составляет 81 м. Общая мощность лолашорского горизонта в этом обнажении – 158 м.

Изотопы углерода

Изучение изотопного состава углерода карбонатов лолашорского горизонта и пограничных с ним отложений филипппельского горизонта в обн. 109 показало широкий разброс значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ – от -7.5 до $+1.2\text{‰}$ (рис. 4).

Нижняя толща разреза характеризуется незначительными изменениями изотопного состава углерода (от $+0.35$ до $+0.8\text{‰}$) и обилием остатков кораллово-строматопоровой фауны и брахиопод, характерных для отложений открытого шельфа. Можно предполагать, что ее формирование происходило преимущественно в зоне нормально-морского бассейна.

Нижнюю и верхнюю толщи разделяет небольшой задернованный интервал в разрезе, выше которого на изотопной кривой отмечается небольшой отрицательный сдвиг $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ с амплитудой до $+0.9\text{‰}$. Этот отрицательный экскурс приходится на интервал разреза с брекчированными породами и косослоистыми текстурами.

В верхней толще разреза на изотопной кривой выделяются два положительных экскурса $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$. Первый экскурс со значениями $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ от -1.8 до $+1.1\text{‰}$, второй – от -1.1 до $+1.2\text{‰}$. Возможно, что отклонения изотопной кривой как в сторону положительных, так и в сторону отрицательных значений в этой толще обусловлены сменой условий седиментации, которые отразились на составе пород. Положительные экскурсы $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$, установленные в верхней толще лолашорского горизонта, совпадают с понижением уровня моря, во время которых накапливались доломиты, включающие редкие остатки бентосной фауны. Возможно, в этом интервале уральского разреза сохранились следы позднеазэронского изотопного события и биособытия Сэндвик.

Положительные аномалии $\delta^{13}\text{C}$ в позднем аэроне обнаружены во многих частях мира: в Шотландии (Melchin, Holmden, 2006), США (McAdams et al., 2017; Waid, Cramer, 2017), в Арктической Канаде (Melchin, Holmden, 2006), Новой Шотландии (Melchin et al., 2014; Braun et al., 2021), Богемии (Storch, Frýda, 2012), Дании (Hammarlund et al., 2019). В большинстве регионов они совпадают с падением уровня моря и сокращением биоразнообразия (Melchin, Holmden, 2006; Loydell, Frýda, 2007). Значительные положительные аномалии изотопов углерода отмечаются как в карбонатах, так и в органическом веществе (Hammarlund et al., 2019; Braun et al., 2021). С-изотопные кривые в каждом регионе имеют свои характерные особенности, что свидетельствует о влиянии региональных факторов на распределение изотопов углерода (Braun et al., 2021).

В изученном уральском разрезе наиболее крупным элементом на изотопно-углеродной кривой является отрицательный экскурс $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ с амплитудой до -7.5‰ , который, возможно, фиксирует рубеж лолашорского и филипппельского горизонтов (азэона и телича). Отрицательный экскурс $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ на этом стратиграфическом уровне коррелирует с аналогичным экскурсом на рубеже азэона и телича и перерывом в осадконакоплении, установленным в морских карбонатах формации Румба Эстонии (до -3.4‰) (Kaljo, Martma, 2000).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ лито-, биостратиграфических данных и первые результаты изучения изотопного состава углерода в разрезе лландовери на западном склоне Приполярного Урала показали возможность уточнения стратиграфического положения лолашорского и филипппельского горизонтов.

Нижняя толща лолашорского горизонта в изученном разрезе включает преимущественно крупные целые раковины брахиопод *Pentamerus oblongus* одной возрастной группы особей.

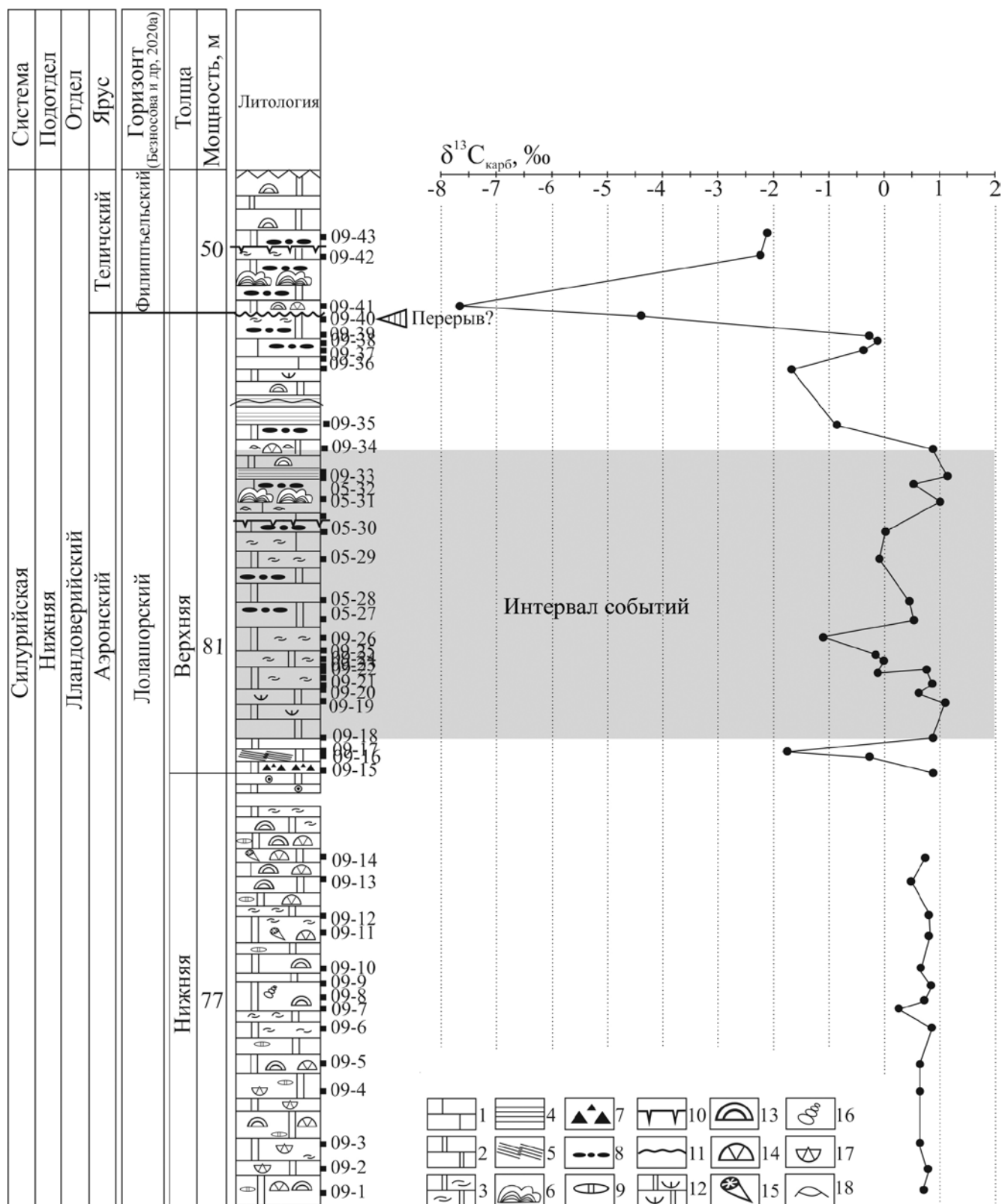


Рис. 4. Литолого-стратиграфическая колонка и распределение изотопов углерода в обн. 109.

1 – известняк, 2 – доломит, 3 – детритовый доломит, 4 – микрослойчатый доломит, 5 – косая слоистость, 6 – строматолиты, 7 – брекчии, 8 – плоскогалеchnый конгломерат, 9 – окремнение, 10 – трещины усыхания, 11 – знаки волновой ряби, 12 – фрагменты раковин пентамерид, 13 – строматопороидеи, 14 – табуляты, 15 – ругозы, 16 – гастпроподы, 17 – целые раковины брахиопод пентамерид, 18 – остракоды.

Fig. 4. Lithological-stratigraphic column and distribution of carbon isotopes in the outcrop 109.

1 – limestone, 2 – dolomite, 3 – detrital dolomite, 4 – microlayered dolomite, 5 – oblique bedding, 6 – stromatolitic, 7 – breccias, 8 – flat pebble conglomerate, 9 – silification, 10 – mud cracks, 11 – wave ripple mark, 12 – pentamerid shells, 13 – stromatoporoidea, 14 – tabulates, 15 – rugoses, 16 – gastropods, 17 – Pentamerida brachiopods, 18 – ostracods.

Известно, что ассоциации *P. oblongus* батиметрически относятся к третьему бентосному комплексу (БК 3) (Boucot, 1975). Считается, что эта ассоциация брахиопод занимала пространство на морском дне выше штормовой волновой базы (Johnson, 2006). В западноуральских разрезах распространение этого вида охватывает нижнюю часть лолашорского горизонта (Опорные..., 1987; Безносова, 2008; Beznosova, 2014). Полученные результаты изучения условий седиментации и развития биоты в лlandoверии позволяют сделать предположение, что формирование рифогенных толщ на Приполярном и Северном Урале, которое сопровождалось крупной перестройкой экосистем, происходило в лолашорское, а не в филиппельское время, как это принято считать (Опорные..., 1987; Антошкина, 2003; Безносова, 2008). Постепенное сокращение биоразнообразия, связанное с началом обмеления бассейна в среднелолашорское время, продолжалось в позднелолашорское и в филиппельское время. Логично предположить, что сообщества рифолюбивых брахиопод *Harpidium angustum* Kirk (Полярный Урал), *Pseudoconchidium kozhimicum* Nikiforova и *Virgianella vaigatshensis* Nikiforova (Приполярный и Северный Урал), которые так же, как и сообщество ровного дна *Pentamerus oblongus*, принадлежат к БК 3 (Boucot, 1975), существовали в одно и то же лолашорское время в североуральском морском бассейне, и отложения, заключающие эти виды, представляют собой синхронные биофашии (Безносова, 2008, с. 137, 167; Beznosova, 2014). Важным доказательством возраста толщ, заключающих эти брахиоподы, является установленный факт залегания слоев с *V. vaigatshensis* непосредственно на сланцах с граптолитами зоны *Demirastrites convolutus* среднего лlandoверии в бассейне р. Колымы (Николаев и др., 1975; Сапельников, Безносова, 1980). Традиционно рифогенные толщи лlandoверии в западноуральских разрезах относились к филиппельскому горизонту (теличу) на основании находок конодонтов *Icriodella malvernensis* Aldridge, которые обнаружил С.В. Мельников в обн. 196 на Приполярном Урале (Объяснительная..., 1994; Опорные..., 1987; Безносова, Мянник, 2005; Безносова, 2008; Männik et al., 2000).

Результаты вновь проведенного изучения разрезов показали, что условия формирования рифогенных отложений с ракушняковыми банками брахиопод пентамерид, принадлежащих к БК 3, были благоприятными для существования в раннелола-

шорское время. Первое вымирание пентамерид в силуре – *Pentamerus oblongus* – было обусловлено падением уровня моря и климатическими изменениями в позднем аэроне. Второе событие вымирания пентамерид, как известно, произошло во время глобального события Лау по сходному сценарию (Talent et al., 1993; Jeppsson, 1998; Jeppsson, Aldridge, 2000; Calner et al., 2004; Lehnert et al., 2007; Безносова и др., 20206).

Конодонтовая последовательность, установленная С.В. Мельниковым в западноуральских разрезах и скважинах нижнего силура Тимано-Печорского нефтегазоносного бассейна, представлена преимущественно эндемичными региональными таксонами (Мельников, 1999). Исключение составляют конодонты *Pronognathus tenuis* (Aldridge), которые, как и зональный вид брахиопод *Pentamerus oblongus* (Sowerby), наиболее значимы для определения аэронского возраста заключающих их толщ в Тимано-Североуральских разрезах (Безносова, 2008).

В силурийских разрезах Европейского Северо-Востока накопление крайне мелководных отложений филиппельского горизонта, точнее, его нижней части, где преобладающим типом пород являются строматолитовые микрослоистые доломиты с трещинами усыхания осадка, со следами перерывов и микроразмывов, соотносится со значительной лlandoверийской регрессией. Падение относительного уровня моря в западных, еще более мелководных, территориях Тимано-Североуральского палеобассейна, обусловило прекращение осадконакопления (Жемчугова и др., 2001). Перерыв в осадконакоплении на рубеже лолашорского и филиппельского горизонтов в Тимано-Печорской провинции отмечали В.А. Жемчугова, С.В. Мельников и В.Н. Данилов в скв. Возей-205 (Жемчугова и др., 2001, с. 75, рис. 73). Уровень резкого обмеления и перерыв в осадконакоплении были установлены в разрезах среднего лlandoверии Эстонии, Литвы, Подолии. Это обстоятельство позволило Р. Эйнасто (1986) сделать вывод, что перерыв в осадконакоплении в среднелlandoверийское время распространен на всей западной территории Восточно-Европейской платформы.

Резкий отрицательный сдвиг С-изотопной кривой, разделяющий лолашорский и филиппельский горизонты, впервые установленный нами на исследуемой территории (см. рис. 4), коррелирует с аналогичным биостратиграфически датированным отрицательным экскурсом и перерывом

в осадконакоплении на рубеже азрона и телича в формации Румба Эстонии (Kaljo, Martma, 2000; Kaljo et al., 2003). Значительная отрицательная изотопная аномалия (до -7.5‰) в основании филиппельского горизонта, может послужить хеомстратиграфическим маркером рубежа лолашорского и филиппельского горизонтов, при условии, что будет прослежена и в других североуральских разрезах.

Перерывы в осадконакоплении, обоснованные в том числе и изотопными данными, известны во многих разрезах мира (Kaljo et al., 2003; Braun et al., 2021). Фациальные и фаунистические изменения могли быть вызваны оледенением в азроне (Azmy et al., 1998; Veizer et al., 1999; Lehnert et al., 2010; Trotter et al., 2016; Caputo, 1998), которое, возможно, обусловило падение уровня моря как во всем мире, так и локально. Несмотря на довольно хорошую изученность, до сих пор нет единого мнения о причинах этого отклонения. Негативные аномалии изотопов углерода связывают с гумидным климатическим интервалом, сопровождаемым повышением уровня океана и возможным влиянием легкого $\delta^{13}\text{C}$, высвобожденного из-за вулканической активности в позднем азроне (Kaljo, Martma, 2000). Другой причиной этого отклонения может быть низкая биопродуктивность или сокращение захоронения органического вещества (Cramer, Saltzman, 2005, 2007), а также постседиментационные изменения карбонатных пород (Hammarlund et al., 2019).

Результаты изучения биостратиграфического распространения основных групп фауны в отложениях лолашорского горизонта в обн. 109 и 217 показали, что событие вымирания биоты соотносится с интервалом разреза верхней половины лолашорского горизонта. В обн. 109 этот интервал разреза характеризуется увеличением значений изотопов углерода до $+1.2\text{‰}$ (см. рис. 4).

Первые полученные вариации изотопного состава углерода в этом разрезе нижнего силура, возможно, приблизят к решению проблемы уточнения стратиграфического положения лолашорского и филиппельского горизонтов в разрезах и скважинах Тимано–Североуральского региона и их корреляции с Общей стратиграфической шкалой нашей страны. Эти же результаты позволяют считать неубедительными сопоставления лолашорского горизонта с рудданом, а филиппельского горизонта – с азроном (Antoshkina et al., 2000; Männik et al., 2000; Состояние изученности..., 2008, приложение № 4).

Выявленные в изученном разрезе интервалы с С-изотопными аномалиями имеют отчетливые фациально-седиментологические характеристики и компенсируют недостатки биостратиграфического метода, связанного с экологическим контролем распространения организмов.

ВЫВОДЫ

Впервые полученные данные по изотопному составу углерода, а также стратиграфическое распространение основных групп фауны в отложениях лолашорского горизонта указывают на возможное присутствие следов глобальных событий, сопоставимых с позднеазронским изотопным положительным событием и биособытием Сэндвик.

Карбонатная толща верхней части разреза лолашорского горизонта Приполярного Урала, которая характеризуется усилением регрессивных тенденций, вымиранием бентосной фауны и развитием строматолитообразующей биоты, свидетельствует о крупной экосистемной перестройке на рубеже лолашорского и филиппельского горизонтов.

Полученные вариации изотопного состава углерода позволяют предположить, что значительная отрицательная изотопная аномалия углерода (до -7.5‰) в основании филиппельского горизонта, может рассматриваться как хеомстратиграфический маркер рубежа лолашорского и филиппельского горизонтов и в дальнейшем, по мере получения новых данных, послужить надежным инструментом для региональных и глобальных корреляционных построений.

Благодарности

Мы благодарим П. Мянника за совместные полевые работы на Приполярном Урале, И.В. Смолеву – инженера ЦКП “Теонаука” Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН за определение изотопного состава углерода в карбонатных породах. Особая благодарность двум анонимным рецензентам за конструктивные замечания и предложения, которые помогли улучшить эту статью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антошкина А.И. (2003) Рифообразование в палеозое (север Урала и сопредельные области). Екатеринбург: УрО РАН, 303 с.
- Безносова Т.М. (1994) Биостратиграфия и брахиоподы силура Европейского Северо-Востока России. СПб.: Наука, 128 с.
- Безносова Т.М., Мянник П. (2005) Граница лландовери и венлока на севере палеоконтинента Балтия. Докл. АН, **401**(5), 655-658.
- Безносова Т.М. (2008) Сообщества брахиопод и биостратиграфия верхнего ордовика, силура и нижнего девона северо-восточной окраины палеоконтинента Балтия. Екатеринбург: УрО РАН, 217 с.
- Безносова Т.М., Матвеев В.А., Пучков В.Н., Силаев В.И. (2020б) Перерыв в осадконакоплении на границе лудлова и пржидола в разрезе силура на Приполярном Урале. Литосфера, **20**(6), 791-807. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-6-791-807
- Безносова Т.М., Матвеев В.А., Шамсутдинова Л.Л. (2020а) Новые данные по стратиграфии и обновленная схема корреляции верхнего ордовика и силура Тимано-Печорской нефтегазоносной провин-

- ции и севера Урала. *Известия Коми научного центра УрО РАН. Серия "Науки о Земле"*, 6(46), 75-89. DOI: 10.19110/1994-5655-2020-6-75-89
- Жемчугова В.А., Мельников С.В., Данилов В.Н. (2001) Нижний палеозой Печорского нефтегазоносного бассейна (строение, условия образования, нефтегазонасность). М.: Изд-во Академии горных наук, 110 с.
- Матвеев В.А. (2013) Основные морфотипы и микроструктура лlandoверийских строматолитовых построек на западном склоне Приполярного Урала. *Вестн. ИГ Коми НЦ УрО РАН*, (2), 17-20.
- Мельников С.В. (1999) Конодонты ордовика и силура Тимано-Североуральского региона. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургской картограф. фабрики ВСЕГЕИ, 136 с.
- Николаев А.А., Орадовская М.М., Преображенский Б.В., Абушик А.Ф., Мягкова Е.И. Обут А.М., Соболевская Р.Ф., Ковехов В.В. (1975) Полевой атлас силурийской фауны Северо-Востока СССР. Магадан: Магаданское кн. изд-во, 283 с.
- Объяснительная записка к стратиграфическим схемам Урала (докембрий, палеозой). (1994) (Отв. ред. Н.Я. Анцыгин). Екатеринбург: "Уральская геологосъемочная экспедиция". 152 с.
- Опорные разрезы верхнего ордовика и нижнего силура Приполярного Урала. (1987) (Под. ред. В.С. Цыганко, В.А. Чермных). Сыктывкар: Коми фил. АН СССР, 94 с.
- Сапельников В.П., Безносова Т.М. (1980) Некоторые руководящие формы ашгиллских и силурийских пентамерид Печорского Урала. *Нов. мат-лы по пентамеридам Урала*. Свердловск: Изд-во УНЦ АН СССР, 3-24.
- Соколова Л.В. (2012) Зональное расчленение лlandoверийских отложений р. Кожым (западный склон Приполярного Урала) по конодонтам. *Вестн. ИГ Коми НЦ УрО РАН*, (2), 24-27.
- Состояние изученности стратиграфии докембрия и фанерозоя России. Задачи дальнейших исследований. Постановления Межведомственного стратиграфического комитета и его постоянных комиссий. (2008). Вып. 38. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 131 с.
- Стратиграфические схемы Урала (докембрий, палеозой). (1993) (Ред. Анцыгина Н.Я., Попова Б.А., Чувашова Б.И. и др.). Екатеринбург: Урал. геол.-съем. экспедиция, 152 л.
- Эйнасто Р. (1986) Основные стадии развития и фацialsные модели силурийского краевого бассейна Балтики. Теория и опыт экстратиграфии. Таллинн: Валгус, 37-54.
- Aldridge R.J., Jeppsson L., Doming K.J. (1993) Early Silurian oceanic episodes and events. *J. Geol. Soc. Lond.*, (150), 501-513.
- Antoshkina A.I., Beznosova T.M., Männik P., Matukhin R.G., Menner V.V., Modzalevskaya T.L. (2000) Correlation of the Silurian sequence of the Timan-Northern Ural Region with the Baltic sections and with the International standard. *Pan-Arctic Paleozoic tectonics, Evolution of basin and faunas. Ikhtiolith Issue, Spec. Publ.* 6, Syktyvkar, 17-21.
- Azmy K., Veizer J., Bassett M.G., Copper P. (1998) Oxygen and carbon isotopic composition of Silurian brachiopods: Implications for coeval seawater and glaciations. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, (110), 1499-1512.
- Beznosova T.M. (2014) Evolutionary history of Pentamerids (brachiopoda) in the Timan-North Ural Basin. *Paleontol. J.*, 48(1), 47-52.
- Boucot A.J. (1975) Evolution and Extinction Rate Controls. Elsevier, Amsterdam. 427 p.
- Braun M.G., Daoust P., Desrochers A. (2021) A sequential record of the Llandovery $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ excursions paired with time-specific facies: Anticosti Island, eastern Canada. *Palaeogeogr., Palaeoclimat., Palaeoecol.*, (578), 110566. DOI: 10.1016/j.palaeo.2021.110566
- Calner M. (2008) Silurian global events-at the tipping point of climate change. Elewa A.M.T. (Ed.) *Mass Extinction*. Springer Book, 21-57.
- Calner M., Jeppsson L., Munnecke A. (2004) The Silurian of Gotland – part I: review of the stratigraphic framework, event stratigraphy, and stable carbon and oxygen isotope development. Munnecke A., Servais T., Schulbert C. (eds.) *Early Palaeozoic Palaeogeography and Palaeoclimate (IGCP 503)*. Abstracts and Field Guides. Erlanger geologische Abhandlungen, Sonderband, (5), 113-131.
- Caputo M.V. (1998) Ordovician-Silurian glaciations and global sea-level changes. Landing E., Johnson M.E. (Eds.) *Silurian cycles: linkages of dynamic stratigraphy with atmospheric, oceanic and tectonic changes*. New York State Museum Bull., (491), 15-25.
- Cooper R.A., Sadler P.M., Munnecke A., Crampton J.S. (2014) Graptoloid evolutionary rates track Ordovician-Silurian climate change. *Geol. Mag.*, (151), 349-364. DOI: 10.1017/S0016756813000198
- Cramer B.D., Saltzman M.R. (2005) Sequestration of C-12 in the deep ocean during the early Wenlock (Silurian) positive carbon isotope excursion. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, (219), 333-349.
- Cramer B.D., Saltzman M.R. (2007) Fluctuations in epeiric sea carbonate production during Silurian positive carbon isotope excursions: a review of proposed paleoceanographic models. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, (245), 37-45.
- Jeppsson L. (1990) An oceanic model for lithological and faunal changes. *J. Geol. Soc. Lond.*, (147), 663-674.
- Jeppsson L. (1996) Recognition of a probable secundo-primo event in the Early Silurian. *Lethaia*, (29), 311-315.
- Jeppsson L. (1998) Silurian oceanic events: summary of general characteristics. *Silurian cycles: Linkages of Dynamic Stratigraphy with Atmospheric, Oceanic, and Tectonic Changes*. Eds E. Landing and M.E. Johnson. New York State Museum Bulletin, 491, 239-257.
- Jeppsson L., Aldridge R.J. (2000) Ludlow (late Silurian) oceanic episodes and events. *J. Geol. Soc. Lond.*, (157), 1137-1148. DOI: org/10.1144/jgs.157.6.1137
- Johnson M.E. (1989) Tempestites recorded as variable *Pentamerus* layers in the Lower Silurian of Southern Norway. *J. Paleontol.*, (63), 195-205.
- Johnson M.E. (2006) Relationship of Silurian sea-level fluctuations to oceanic episodes and events. *GFF*, (128), 115-121. DOI: 10.1080/11035890601282115
- Hammarlund E.U., Loydell D.K., Nielsen A.T., Schovbo N.H. (2019) Early Silurian $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ excursions in the foreland basin of Baltica, both familiar and surprising. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, (526), 126-135. DOI: 10.1016/j.palaeo.2019.03.035
- Kaljo D., Martma T. (2000) Carbon isotopic composition of Llandovery rocks (East Baltic Silurian) with environmental interpretation. *Proc. Eston. Acad. Sci. Geol.*, 49(4), 267-283.
- Kaljo D., Martma T., Männik P., Viira V. (2003) Implica-

- tions of Gondwana glaciations in the Baltic late Ordovician and Silurian and a carbon isotopic test of environmental cyclicity. *Bull. Soc. Geol. Fr.*, (174), 59-66. DOI: org/10.2113/174.1.59
- Lehnert O., Eriksson M.J., Calner M., Joachimski M., Bug-gisch W. (2007) Concurrent sedimentary and isotopic indications for global climatic cooling in the Late Silurian. *Acta Palaeontol. Sinica*, (46), 249-255.
- Lehnert O., Männik P., Joachimski M.M., Calner M., Fryda J. (2010) Palaeoclimate perturbations before the early Sheinwoodian glaciation: a trigger for extinctions during the "Ireviken Event". *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, (296), 320-331. DOI: 10.1016/j.palaeo.2010.01.009
- Loydell D.K., Fryda J. (2007) Carbon isotope stratigraphy of the upper Telychian and lower Sheinwoodian (Llandovery–Wenlock, Silurian) of the Banwy River section, Wales. *Geol. Mag.*, (144), 1015-1019. DOI: org/10.1017/s0016756807003895
- Männik P., Antoshkina A.I., Beznosova T.M. (2000) The Llandovery–Wenlock boundary in the Russian Arctic. *Proc. Eston. Acad. Sci. Geol.*, **49**(2), 104-111.
- McAdams N.E.B., Bancroft A.M., Cramer B.D., Witzke B.J. (2017) Integrated carbon isotope and conodont chemostratigraphy of the Silurian (Aeronian–Telychian) of the east-central Iowa Basin, Iowa, USA. *Newsl. Stratigr.*, (50), 391-416. DOI: 10.1127/nos / 2017/0375
- Melchin M.J., Holmden C. (2006) Carbon isotope chemostratigraphy of the Llandovery in Arctic Canada: implications for global correlation and sea-level change. *GFF*, (**128**), 173-180. DOI: 10.1080/11035890601282173
- Melchin M.J., MacRae K.-D., Bullock P. (2014) A multi-peak organic carbon isotope excursion in the late Aeronian (Llandovery, Silurian): evidence from Arisaig, Nova Scotia, Canada. *Palaeoworld*, (24), 191-197. DOI: 10.1016/j.palwor.2014.12.004
- Munnecke A., Samtleben C., Bickert T. (2003) The Ireviken Event in the lower Silurian of Gotland, Sweden - relation to similar Palaeozoic and Proterozoic events. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, (195), 99-124. DOI: 10.1016/s0031-0182(03)00304-3
- Štorch P., Fryda J. (2012) The late Aeronian graptolite *sedgwickii* Event, associated positive carbon isotope excursion and facies changes in the Prague Synform (Barrandian area, Bohemia). *Geol. Mag.*, (149), 1089-1106. DOI: doi.org/10.1017/s001675681200026x
- Talent J.A., Mawson R., Andrew A.S., Hamilton P.J., Whitford D.J. (1993) Middle Palaeozoic extinction events: faunal and isotopic data. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, (104), 139-152.
- Trotter J.A., Williams I.S., Barnes C.R., Männik P., Simpson A. (2016) New conodont $\delta^{18}\text{O}$ records of Silurian climate change: implications for environmental and biological events. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **443**, 34-48. DOI: 10.1016/j.palaeo.2015.11.011
- Veizer J., Ala D., Azmy K., Brukschen P., Buhl D., Bruhn F., Carden G.A.F., Diener A., Ebner S., Goddérís Y., Jasper T., Korte C., Pawellek F., Podlaha O.G., Straus H. (1999) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater. *Chem. Geol.* (161), 59-88.
- Waid C.B.T., Cramer B.D. (2017) Global chronostratigraphic correlation of the Llandovery Series (Silurian System) in Iowa, USA, using high-resolution carbon isotope ($\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$) chemostratigraphy and brachiopod and conodont biostratigraphy. *Bull. Geosci.*, (93), 373-390. DOI: 10.3140/bull.geosci.1657

REFERENCES

- Aldridge R.J., Jeppsson L., Doming K.J. (1993) Early Silurian oceanic episodes and events. *J. Geol. Soc. Lond.*, (150), 501-513.
- Antoshkina A.I. (2003) Reef formation in the Paleozoic (the northern part of the Urals and adjacent areas. Ekaterinburg, UB RAS, 303 p. (In Russ)
- Antoshkina A.I., Beznosova T.M., Männik P., Matukhin R.G., Menner V.V., Modzalevskaya T.L. (2000) Correlation of the Silurian sequence of the Timan–Northern Ural Region with the Baltic sections and with the International standard. *Pan-Arctic Paleozoic tectonics, Evolution of basin and faunas. Ikhtyolith Issue, Spec. Publ.*, **6**, Syktyvkar, 17-21.
- Azmy K., Veizer J., Bassett M.G., Copper P. (1998) Oxygen and carbon isotopic composition of Silurian brachiopods: Implications for coeval seawater and glaciations. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, (110), 1499-1512.
- Beznosova T.M. (1994) Biostratigraphy and brachiopods of Silurian European North East of Russia). St.Petersburg, Nauka Publ., 128 p. (In Russ.)
- Beznosova T.M., Männik P. (2005) The Llandovery–Wenlock Boundary in the northern part of the Baltica paleocontinent. *Dokl. Akad. Nauk*, **401**(5), 655-658. (In Russ.)
- Beznosova T.M. (2008) Brachiopod communities and biostratigraphy of Upper Ordovician, Silurian and Lower Devonian of North-Eastern margin of Baltica paleocontinent. Ekaterinburg Publ., 218 p. (In Russ.)
- Beznosova T.M. (2014) Evolutionary history of Pentamerids (brachiopoda) in the Timan-North Ural Basin. *Paleontol. J.*, **48**(1), 47-52.
- Beznosova T.M., Matveev V.A., Puchkov V.N., Silaev V.I. (2020) A gap in sedimentation in the Silurian section of the Subpolar Urals at the Ludlow-Pridoli boundary. *Lithosphere*, **20**(6), 791-807. (In Russ.) DOI: doi.org/10.24930/1681-9004-2020-20-6-791-807 (In Russ.)
- Beznosova T.M., Matveev V.A., Shamsutdinova L.L. (2020a) New data on stratigraphy and an updated correlation scheme of the upper Ordovician and Silurian of the Timan-Pechora oil and gas province and the North of the Urals. *Izvestiya Komi nauchnogo tsentra UrO RAN. Seriya "Nauki o Zemle"*, **6** (46), 75-89. DOI: 10.19110/1994-5655-2020-6-75-89. (In Russ.)
- Boucot A.J. (1975) Evolution and Extinction Rate Controls. Elsevier, Amsterdam. 427 p.
- Braun M.G., Daoust P., Desrochers A. (2021) A sequential record of the Llandovery $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ excursions paired with time-specific facies: Anticosti Island, eastern Canada. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, (578), 110566. DOI: 10.1016/j.palaeo.2021.110566
- Calner M. (2008) Silurian global events at the tipping point of climate change. Elewa A.M.T. (Ed.) *Mass Extinction*. Springer Book, 21-57.
- Calner M., Jeppsson L., Munnecke A. (2004) The Silurian of Gotland – part I: review of the stratigraphic framework, event stratigraphy, and stable carbon and oxygen isotope development. Munnecke A., Servais T., Schulbert C. (eds.) *Early Palaeozoic Palaeogeography and Palaeoclimate (IGCP 503). Abstracts and Field Guides*. Erlanger geologische Abhandlungen, Sonderband, (5), 113-131.

- Caputo M.V. (1998) Ordovician–Silurian glaciations and global sea-level changes. Landing E., Johnson M.E. (Eds.) *Silurian cycles: linkages of dynamic stratigraphy with atmospheric, oceanic and tectonic changes*. New York State Museum Bulletin, (491), 15–25.
- Cooper R.A., Sadler P.M., Munnecke A., Crampton J.S. (2014) Graptoloid evolutionary rates track Ordovician–Silurian climate change. *Geol. Mag.*, (151), 349–364. DOI: 10.1017/s0016756813000198
- Cramer B.D., Saltzman M.R. (2005) Sequestration of C-12 in the deep ocean during the early Wenlock (Silurian) positive carbon isotope excursion. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, (219), 333–349.
- Cramer B.D., Saltzman M.R. (2007) Fluctuations in epeiric sea carbonate production during Silurian positive carbon isotope excursions: a review of proposed paleoceanographic models. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, (245), 37–45.
- Einasto R. (1986) Main stages of development and facies models of the East Baltic Silurian pericontinental basin. Theory and experience of ecostratigraphy. Tallinn, Valgus, 37–54.
- Explanatory note to Ural stratigraphic maps. (1994) (Ed. N.Ya. Antsygin). Ekaterinburg: AOOT Publ., 95 p. (In Russ.)
- Hammarlund E.U., Loydell D.K., Nielsen A.T., Schovsbo N.H. (2019) Early Silurian $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ excursions in the foreland basin of Baltica, both familiar and surprising. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, (526), 126–135. DOI: 10.1016/j.palaeo.2019.03.035
- Jeppsson L. (1990) An oceanic model for lithological and faunal changes. *J. Geol. Soc. Lond.*, (147), 663–674.
- Jeppsson L. (1996) Recognition of a probable secundo–primo event in the Early Silurian. *Lethaia*, (29), 311–315.
- Jeppsson L. (1998) Silurian oceanic events: summary of general characteristics. *Silurian cycles: Linkages of Dynamic Stratigraphy with Atmospheric, Oceanic, and Tectonic Changes*. (Ed. E. Landing and M.E. Johnson). New York State Museum Bulletin, (491), 239–257.
- Jeppsson L., Aldridge R.J. (2000) Ludlow (late Silurian) oceanic episodes and events. *J. Geol. Soc. Lond.*, (157), 1137–1148. DOI: org/10.1144/jgs.157.6.1137
- Johnson M.E. (1989) Tempestites recorded as variable *Pentamerus* layers in the Lower Silurian of Southern Norway. *J. Paleontology*, (63), 195–205.
- Johnson M.E. (2006) Relationship of Silurian sea-level fluctuations to oceanic episodes and events. *GFF*, (128), 115–121. DOI: 10.1080/11035890601282115
- Kaljo D., Martma T. (2000) Carbon isotopic composition of Llandovery rocks (East Baltic Silurian) with environmental interpretation. *Proc. Eston. Acad. Sci. Geol.*, (49), 267–283.
- Kaljo D., Martma T., Männik P., Viira V. (2003) Implications of Gondwana glaciations in the Baltic late Ordovician and Silurian and a carbon isotopic test of environmental cyclicity. *Bulletin de la Société Géologique de France*, (174), 59–66. doi: org/10.2113/174.1.59
- Lehnert O., Eriksson M.J., Calner M., Joachimski M., Bugisch W. (2007) Concurrent sedimentary and isotopic indications for global climatic cooling in the Late Silurian. *Acta Palaeontol. Sinica*. (46), 249–255.
- Lehnert O., Männik P., Joachimski M.M., Calner M., Fryda J. (2010) Palaeoclimate perturbations before the early Sheinwoodian glaciation: a trigger for extinctions during the “Ireviken Event”. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, (296), 320–331. DOI: 10.1016/j.palaeo.2010.01.009
- Loydell D.K., Frýda J. (2007) Carbon isotope stratigraphy of the upper Telychian and lower Sheinwoodian (Llandovery–Wenlock, Silurian) of the Banwy River section, Wales. *Geol. Mag.*, (144), 1015–1019. DOI: org/10.1017/s0016756807003895
- Männik P., Antoshkina A.I., Beznosova T.M. (2000) The Llandovery–Wenlock boundary in the Russian Arctic. *Proc. Eston. Acad. Sci. Geol.*, (49), 104–111.
- Matveev V.A. (2013) Llandoveryan stromatolites on the western slope of the Polar Urals: main morphotypes, microstructure. *Vestn. IG Komi NTs UrO RAN*, (2), 17–20. (In Russ.)
- McAdams N.E.B., Bancroft A.M., Cramer B.D., Witzke B.J. (2017) Integrated carbon isotope and conodont biochemostratigraphy of the Silurian (Aeronian–Telychian) of the east-central Iowa Basin, Iowa, USA. *Newsl. Stratigr.*, (50), 391–416. DOI: 10.1127/nos/2017/0375
- Melchin M.J., Holmden C. (2006) Carbon isotope chemostratigraphy of the Llandovery in Arctic Canada: implications for global correlation and sea-level change. *GFF*, (128), 173–180. DOI: 10.1080/11035890601282173
- Melchin M.J., MacRae K.-D., Bullock P. (2014) A multi-peak organic carbon isotope excursion in the late Aeronian (Llandovery, Silurian): evidence from Arisaig, Nova Scotia, Canada. *Palaeoworld*, (24), 191–197. DOI: 10.1016/j.palwor.2014.12.004
- Mel'nikov S.V. (1999) Conodonts of the Ordovician and Silurian of the Timan-Northern Ural region. St. Petersburg: Izdatel'stvo Sankt-Peterburgskoi kartograficheskoi fabрики VSEGEI, 136 p. (In Russ.)
- Munnecke A., Samtleben C., Bickert T. (2003) The Ireviken Event in the lower Silurian of Gotland, Sweden - relation to similar Palaeozoic and Proterozoic events. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, (195), 99–124. DOI: 10.1016/s0031-0182(03)00304-3
- Nikolaev A.A., Oradovskaya M.M., Preobrazhenskiy B.V., Abushik A.F., Myagkova Ye.I., Obut A.M., Sobolevskaya R.F., Kovekhov V.V. (1975) Brachiopods. Field Atlas of the Silurian fauna of the North-East of the USSR. Magadan: Magadanskoe knizhnoe izdatelstvo, 60–128. (In Russ.)
- Reference sections of Upper Ordovician and Lower Silurian of Subpolar Urals. (1987) (Eds. Tsyganko V.S., Chernykh V.A.) Syktyvkar, Komi branch of AS USSR, Publ., 94 p. (In Russ.)
- Sapelnikov V.P., Beznosova T.M. (1980) Some Reference Forms of Ashgillian and Silurian pentamerids of the Pechora Urals. *Novye materialy po pentameridam Urala*, Sverdlovsk, UNTs AN SSSR, 3–24. (In Russ.)
- Sokolova L.V. (2012) Conodont zonation Llandovery strata on the Kozhym River (Western slope Subpolar Urals). *Vestnik IG Komi NTs UrO RAN*, (2), 24–27. (In Russ.)
- Štorch P., Frýda J. (2012) The late Aeronian graptolite *sedgwickii* Event, associated positive carbon isotope excursion and facies changes in the Prague Synform (Barrandian area, Bohemia). *Geol. Mag.*, (149), 1089–1106. DOI: doi.org/10.1017/s001675681200026x
- Stratigraphic diagrams of the Urals (Precambrian, Paleozoic). (1993) (Eds N.Ya. Antsygin, B.A. Popov, B.I. Chuvashov). Ekaterinburg, UGSE Publ., 152 p. (In Russ.)
- Talent J.A., Mawson R., Andrew A.S., Hamilton P.J., Whit-

- ford D.J. (1993) Middle Palaeozoic extinction events: faunal and isotopic data. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, (104), 139-152.
- The State of Precambrian and Phanerozoic Stratigraphic Study in Russia. Objectives for Further Investigations. Resolutions of the Interdepartmental Stratigraphic Committee and Its Standing Commissions. (2008) VSEGEI Publ., St. Petersburg, (38), 131 p. (In Russ.)
- Trotter J.A., Williams I.S., Barnes C.R., Männik P., Simpson A. (2016) New conodont $\delta^{18}\text{O}$ records of Silurian climate change: implications for environmental and biological events. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 443, 34-48. DOI: 10.1016/j.palaeo.2015.11.011
- Veizer J., Ala D., Azmy K., Brukschen P., Buhl D., Bruhn F., Carden G.A.F., Diener A., Ebner S., Goddérès Y., Jasper T., Korte C., Pawellek F., Podlaha O.G., Straus H. (1999) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater. *Chem. Geol.*, (161), 59-88.
- Waid C.B.T., Cramer B.D. (2017) Global chronostratigraphic correlation of the Llandovery Series (Silurian System) in Iowa, USA, using high-resolution carbon isotope ($\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$) chemostratigraphy and brachiopod and conodont biostratigraphy. *Bull. Geosci.*, (93), 373-390. DOI: 10.3140/bull.geosci.1657
- Zhemchugova V.A., Mel'nikov S.V., Danilov V.N. (2001) Lower Paleozoic of the Pechora oil basin: structure and conditions of formation. Moscow: Akademii gornykh nauk Publ., 109 p. (In Russ.)