
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГЕОСФЕР

УДК 551.248.1

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ЛЕТОПИСЬ ЭВСТАТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ И НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ СТРАТИГРАФИЧЕСКОЙ КОРРЕЛЯЦИИ

П.А. Чехович¹

Невозможность надёжной корреляции эвстатических циклов 3-го порядка связана с рядом причин. К ним относятся недостаточная разрешающая способность биостратиграфического метода, дискретность геологического времени, нестационарная природа процесса осадконакопления, а также диахронный характер поверхностей, ограничивающих секвенции. Приведены наглядные примеры, показывающие несостоятельность попыток использовать схему глобальных эвстатических циклов (кривая Вейла) для целей межбассейновой корреляции. Эти циклы могли фиксироваться в осадочной летописи только в периоды крупных материковых оледенений. В отличие от этого воздействие региональных тектонических факторов на динамику заполнения бассейнов и в целом на осадочную летопись было перманентным и намного более сильным. Корреляция циклов 3-го порядка возможна с помощью хемостратиграфических маркеров. Одним из перспективных методов является изотопная хроностратиграфия.

Ключевые слова: эвстазия, секвентная стратиграфия, стратиграфическая корреляция, биостратиграфия, изотопные маркеры, стратиграфические перерывы.

GEOLOGICAL RECORDS OF EUSTATIC FLUCTUATION. SOME ISSUES IN STRATIGRAPHIC CORRELATION

*P.A. Chekhovich, Dr.Sci (Geol.),
Lomonosov Moscow State University (Earth Science Museum)*

According to the author, reliable correlation of third-order eustatic cycles has not been possible due to a number of reasons. These include the following: insufficient resolution of biostratigraphic age determination, discreteness of geological time, non-stationary nature of sedimentation, and diachronous character of the sequences boundaries. This study provides illustrative examples that demonstrate inconsistency of some attempts to use the

¹ Чехович Пётр Андреевич – д.г.-м.н., зав. сектором минералогии и истории Земли Музея земледования МГУ, p.chekhovich@gmail.com.

global-eustasy model (Vail curves) for intrabasinal correlations. These cycles could only be observed during widespread glaciations. In contrast, the impact of regional tectonics on the basin-fill dynamics and on sedimentary record as a whole, was permanent and much stronger. Third-order cycles correlation is only possible by means of chemostratigraphic markers with isotopic chronostratigraphy being one of the most promising ways.

Keywords: *eustasy, sequence stratigraphy, stratigraphic correlation, biostratigraphy, isotopic markers, discontinuities.*

Введение. Идея глобальной эвстазии была сформулирована 130 лет назад Эдвардом Зюссом. В заключительной главе II-го тома капитального труда «Das Anlitz der Erde» [32] (рис. 1) он трактовал глобальную смену трансгрессий и регрессий как следствие периодического изменения объёма океанических впадин. Долгое время обсуждение этой гипотезы носило исключительно теоретический характер, оставаясь в рамках академических дискуссий между противоборствующими геологическими школами XIX – начала XX-го века (нептунизм–плутонизм, катастрофизм–униформизм, гипотезы контракции–пульсации). Позднее, когда содержание дебатов переместилось в область современных теоретических представлений (фиксизм–мобилизм), фундаментальное значение понятия «эвстазия» приобрело более предметную окраску. Стали обсуждаться конкретные физические механизмы эвстатических эффектов – изменение общей массы воды в океанах вследствие обмена с континентальными ледниками (гляциоэвстазия), изменение объёма океанских вод (без изменения массы) за счёт вариаций температуры и солёности (термогалинный эффект) или изменение суммарного объёма океанических впадин из-за вариаций скорости спрединга (тектонэвстазия). Предложены также и другие механизмы. Гипотеза о глобальной эвстазии стала активно использоваться сторонниками обеих научных концепций в качестве аргументации своих взглядов.

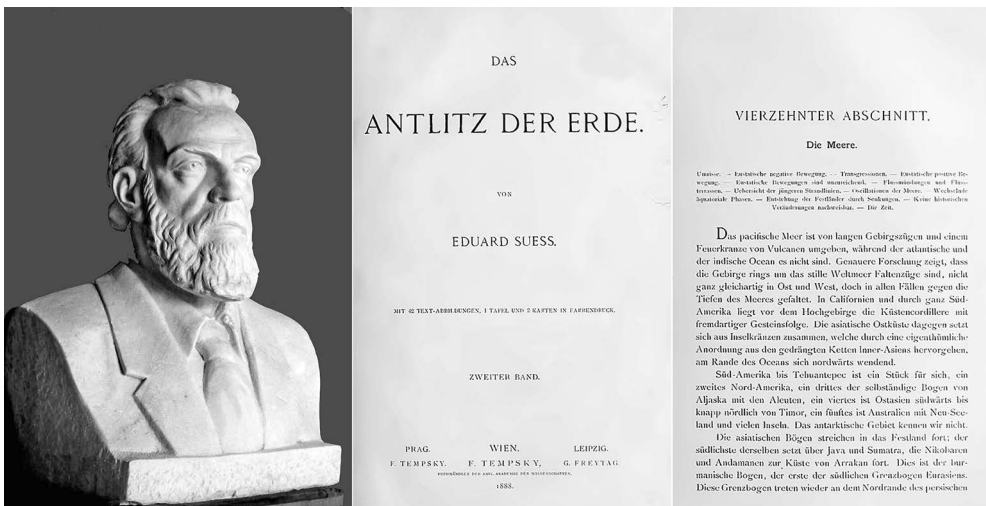


Рис. 1. Австрийский геолог Эдвард Зюсс – основоположник учения об эвстазии. Скульптурный портрет (мрамор, скульптор Борис Королев, собрание Музея землеведения МГУ). Справа – титульный лист второго тома монографии «Das Anlitz der Erde», посвященного геологии морей, и начало 14-й главы, в которой изложены основы учения об эвстазии. Оцифрованная версия издания 1888 г. размещена в электронном архиве отделения наук о Земле университета Торонто (<http://www.archive.org/details/dasanlitzderer02sues>).

По мере того, как тектоника плит становилась ведущей концепцией в геологической науке, стало очевидным важное прикладное значение идеи Э. Зюсса о глобальных эвстатических циклах. В конце 60-х – начале 70-х годов прошлого века выяснилось, что разведанные мировые запасы на месторождениях, связанных с циклично построенными осадочными комплексами, составляют от нескольких миллионов до сотен миллионов тонн нефти и газа в нефтяном эквиваленте. Исследовательские коллективы добывающих компаний, осваивавших шельфовые акватории, где развиты современные и/или погребённые циклически построенные толщи, развернули активные работы по проблеме эвстатических колебаний уровня Мирового океана.

Как хорошо известно, геологические данные и методы, с помощью которых эти колебания могут быть реконструированы, чрезвычайно разнообразны, но ключевое значение в этом вопросе по-прежнему, как и во времена Э. Зюсса, принадлежит биостратиграфии. Вместе с тем, понимание этого оказалось теперь во многом утраченным из-за того, что прорыв в данной области геологии в последние десятилетия был обеспечен достижениями технологически продвинутых («инновационных») дисциплин – сеймостратиграфии, секвентной стратиграфии, радиометрического датирования и др. В частности, разработка геологами корпорации «EXXON» схемы глобальных эвстатических циклов (кривая П. Вейла) [17, 33] породила сомнительную практику использования её в качестве шаблона для стратиграфической корреляции. Биостратиграфическим датировкам при этом отводится подчинённая роль: они либо используются в качестве подтверждения справедливости «глобального стандарта», если согласуются с ним, либо игнорируются (или искажаются), когда такая согласованность отсутствует.

Несмотря на то, что «экссоновский» подход к стратиграфической корреляции уже давно подвергается аргументированной критике [2, 3, 4, 14, 15, 16, 26, 31], он до сих пор находит применение, а сам «глобальный стандарт» часто используется в качестве ориентира в тектонических палеореконструкциях. Цель этой статьи – привлечь внимание к некоторым проблемам стратиграфической корреляции, которые могут служить источником неопределённостей и ошибок при восстановлении истории колебаний уровня моря. Эти проблемы хорошо известны, но в силу своей специфики часто остаются вне поля зрения специалистов, использующих в своих исследованиях синтез тектонических и седиментологических реконструкций.

Циклы 3-го порядка. Проблемы корреляции. Главной теоретической основой экссоновского подхода является положение о том, что глобальная осадочная летопись контролируется преимущественно эвстатическими изменениями уровня моря, эпизодически повторяющимися с интервалами продолжительностью от 1 до 10 млн лет (так называемые циклы третьего порядка). Это будто бы даёт основание рассматривать глобальные циклы в качестве геохронологических единиц [33]. Между тем, исходная логическая посылка обсуждаемой гипотезы остаётся недоказанной, и нет никаких убедительных свидетельств того, что во многих пространственно разобщённых бассейнах действительно существуют серии глобально коррелируемых эвстатических циклов такого масштаба. На экссоновской кривой лишь очень немногие события подтверждаются хроностратиграфическими данными. Большинство же достоверных исследований продемонстрировало сильные отклонения от глобального эвстатического стандарта [1, 2, 4, 14, 16 и др.].

Недостаточная разрешающая способность биостратиграфических датировок. Важное обстоятельство, исключающее возможность осуществления межбассейновой корреляции циклов третьего порядка, состоит в том, что их продолжительность находится на пределе биостратиграфического разрешения. Если при этом учесть чрезвычай-

но высокую плотность событий, показанных на кривой Вейла и всех её более поздних модификациях, то каждый из сегментов этих кривых вполне может быть скоррелирован с любой произвольной последовательностью, построенной на основе генератора случайных чисел. Такая возможность была продемонстрирована в несложном корреляционном эксперименте [25] на примере мелового отрезка глобального стандарта, насчитывающего до 40 «эвстатических» событий. Смоделированные «случайные» последовательности содержали от 77 до 89 % (!) событий, коррелируемых с экссонским стандартом (рис. 2).

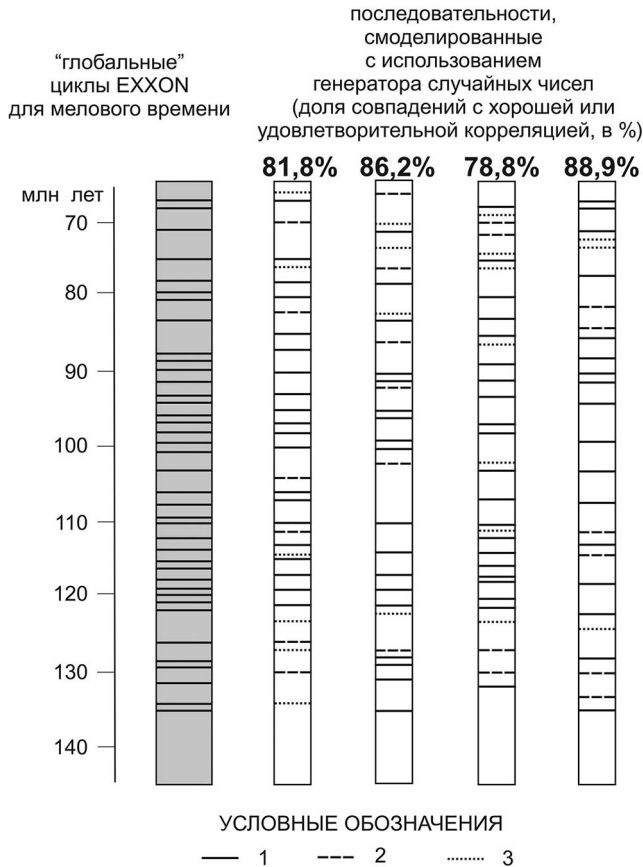


Рис. 2. Реально установленные циклы для мелового периода (левая колонка) совпадают практически с любой случайной последовательностью (четыре правые колонки) [25, с изменениями]. Этот эксперимент наглядно показывает, что высокочастотные циклы 3-го порядка продолжительностью 1–3 млн лет не могут надёжно коррелироваться между разобшёнными бассейнами из-за недостаточной разрешающей способности биостратиграфических методов: 1 – хорошая корреляция ($\pm 0,5$ млн лет); 2 – удовлетворительная корреляция (0,5–1 млн лет); 3 – отсутствие корреляции (более 1 млн лет).

Проблема скрытых перерывов. Самое серьёзное препятствие, стоящее перед попытками скоррелировать циклы третьего порядка, заключается в дискретном характере геологического времени. Стратиграфические секвенции (sequences), соответствующие этим циклам, разделены поверхностями несогласий, продолжительность которых до-

стоверно почти никогда не определяется. Хорошо известно, что даже в наиболее полных и считающихся «номинативно непрерывными» разрезах запечатлено не более половины «физического» времени, т. е. времени, разделяющего моменты формирования первой и последней слоистой единицы рассматриваемой последовательности. Имеются и более радикальные оценки длительности «чистого» времени, зафиксированного в осадочных разрезах. Так, Т. Альджео и Б. Уилкинсон [12] полагают, что в осадках запечатлена примерно 1/13 часть всего времени. Подобные выводы основываются на хорошо известном свойстве всех мелководных карбонатных разрезов [7, 22, 29, 30]. Оно состоит в том, что средняя скорость осадконакопления R_{sed} , рассчитанная из соотношения

$$R_{sed} = h(t_1 - t_2)^{-1} \quad (1)$$

(где h – мощность интервала разреза с датированными подошвой и кровлей, t_1 и t_2 – датировки кровли и подошвы соответственно), постепенно убывает по мере увеличения продолжительности временных промежутков, для которых выполняются измерения. Это убывание наиболее резко выражено для тех обстановок, где суммарная доля пробелов (хиатусов) оказывается максимальной. Сказанное несложно проиллюстрировать на примере сейсмо-

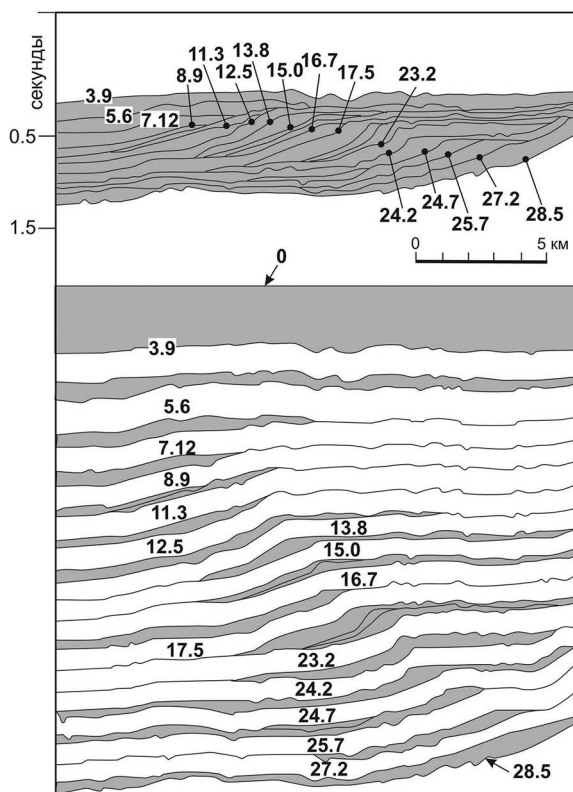


Рис. 3. Западный шельф Большой Багамской банки (с изменениями по [23]). Неогеновые секвенции, соответствующие циклам 3-го порядка, разделены поверхностями несогласий. Суммарная доля пробелов на некоторых участках профиля составляет более половины от общего хроностратиграфического объёма последовательности. Цифры на профиле – датировки границ секвенций (млн лет).

стратиграфических профилей, где имеются надежные биостратиграфические датировки поверхностей, разделяющих секвенции. На рис. 3 приведён один из таких «хрестоматийных» разрезов, выполненных в 80-х годах прошлого века в ходе сейсмического профилирования на западном шельфе Большой Багамской банки.

Дискретность геологического времени отчётливо видна также при детализации хроностратиграфического расчленения. Увеличение дробности выделяемых единиц разреза приводит к тому, что изучаемая последовательность постепенно распадается на серию «непрерывных» фрагментов, разделённых поверхностями перерывов (рис. 4). Тем самым доля времени, «выпавшего» из осадочной летописи, неуклонно возрастает. Поэтому корреляция единиц, разделённых временными пробелами неизвестной продолжительности, может вносить дополнительную неопределённость.

Нестационарный характер осадконакопления. Сильно осложняет проблему и чрезвычайно

неравномерная скорость седиментации, которая может варьировать на 11 порядков величины (от 10^{-4} до 10^7 м/тыс. лет) [5, 21, 30]. Таким образом, седиментационные паузы между предположительно непрерывными последовательностями могут занимать промежутки времени, гораздо более длительные, чем обычно полагают. Это означает, что секвенции, отложившиеся в промежутках между паузами, могут быть в действительности некоррелируемы.

Диахронные границы секвенций. Возможность осуществить корреляцию оставляет непосредственное (от разреза к разрезу) прослеживание поверхностей, ограничивающих секвенции, но такой способ по вполне понятным причинам трудно осуществить в пространственно разобщённых бассейнах. К тому же, в действительности эти поверхности нередко оказываются диахронными, что также накладывает существенные ограничения на корреляцию даже в пределах одного бассейна. Один из примеров сказанному – возрастное скольжение основания лудфордско-пржидольской («гребенской») секвенции в литоральном комплексе силурийско-девонских осадков в Урало-Новоземельской области [6]. С севера на юг (от Новой Земли и Приполярного Урала до широты Уфимского амфитеатра) нижняя граница названной секвенции, маркированная базальной песчано-алевролитовой пачкой, сечёт типовую брахиоподовую подзону *Collarothyris canaliculata canaliculata* (верхний лудфорд), смещаясь от её подошвы к кровле. Учитывая данные по калибровке геохронологических подразделений силура [8, 19], омоложение нижней границы секвенции, фиксируемое в западноуральских разрезах, можно оценить не менее чем в 1 млн лет, что сопоставимо с длительностью циклов 3-го порядка.

Возможные решения – хемостратиграфия. Более определённые надежды можно связывать с небиостратиграфическими методами корреляции, в частности, с использованием данных по изотопному составу углерода в морских карбонатах. Короткопериодные вариации этого параметра контролируются глобальным океаническим балансом масс органического и карбонатного углерода и поэтому надёжно датированные изотопные сдвиги вполне могут играть роль маркеров для межбассейновой корреляции циклов третьего порядка. Такие маркеры уже давно установлены для мезозойско-кайнозойского отрезка хронеостратиграфической шкалы. Впоследствии они были выявлены и в палеозойских разрезах [9, 28]. Хорошим примером может служить изотопный сдвиг, которым отмечена граница силура и девона. Он установлен в литоральных и в пелагических фациях на Урале [10, 36], в Баррандиене [18], на островах

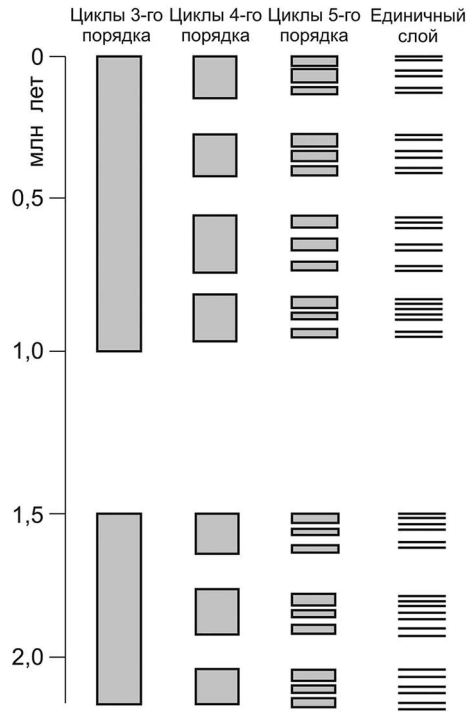


Рис. 4. Хронеостратиграфическая детализация наглядно демонстрирует дискретность геологического времени, что создает неопределённость при попытках коррелировать циклические единицы.

Канадского арктического архипелага [24]. Такой же чёткий изотопный маркер выявлен внутри верхнелудловской (лудфордской) секвенции (рис. 5) в Тимано-Печорском регионе, в Прибалтике, в Австралии [11] и в канадской Арктике [24]. Циклы, имеющие такие метки, по всей вероятности, являются глобально коррелируемыми.

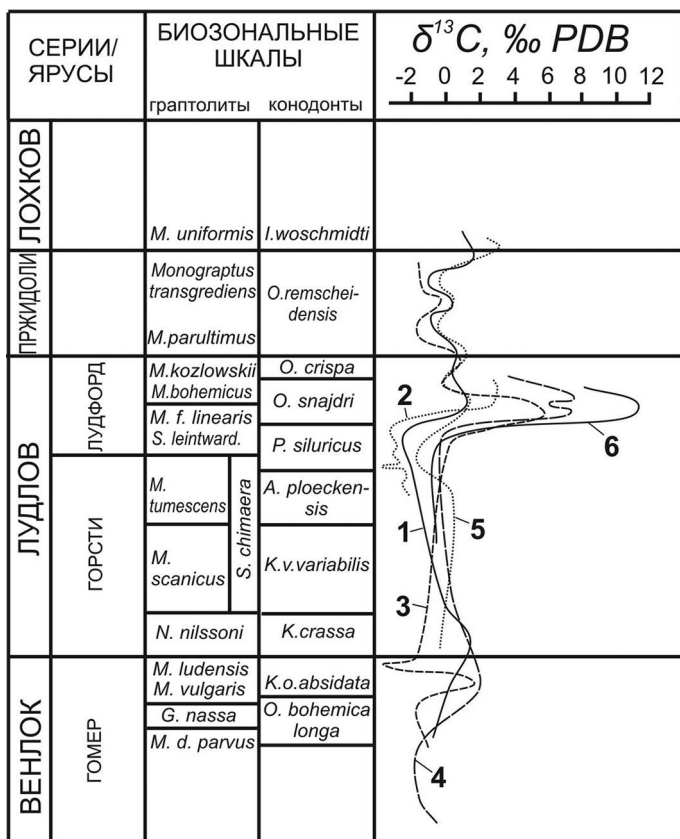


Рис. 5. Положительный изотопный сдвиг в верхнесилурийских карбонатных последовательностях, зафиксированный в различных регионах мира («среднелудфордский сигнал»). Циклы 3-го порядка, имеющие такие изотопные метки, могут быть глобально коррелируемыми (с дополнениями по [27]): 1 – Большеземельская тундра [27], 2 – Средний Урал [11], 3 – Эстония [20], 4 – о. Готланд [35], 5 – Карнийские Альпы [34], 6 – Австралия [13].

Заключение. Экссоновская модель глобальных эвстатических циклов представляет собой типичный пример стихийно сформировавшегося убеждения, когда определённые идеи принимаются без рационально-критического обоснования, проверки и объяснения. Эта модель должна быть заменена другой схемой, в которой наряду с региональными циклами, отражающими локальную тектонику отдельных бассейнов, будут фигурировать эвстатические циклы, не столь масштабные по амплитуде и не столь многочисленные. Возможность их идентификации остаётся весьма туманной, однако сочетание биостратиграфического и хемотратиграфического методов корреляции открывает неплохие перспективы на этом пути. Приоритет при этом должен всё же оставаться за биостратиграфическими данными.

Представленный здесь краткий анализ показывает также, что история развития седиментационных бассейнов на континентальной коре и формирование заполняющих их стратиграфических секвенций в большей мере контролировались тектоническими движениями (поднятиями и погружениями) и практически не зависели от эвстатических событий. На примере детально изученных разрезов нижнего палеозоя Сибирской платформы [2, 3, 8], среднего и верхнего палеозоя Восточно-Европейской и Северо-Американской платформ [4 и др.] можно уверенно говорить о существовании высокочастотных тектонических вариаций в диапазоне 1–3 млн лет, сопоставимых по длительности с эвстатическими циклами 3-го порядка и многократно превышающих их по амплитуде. Элементарные циклы в осадочном выполнении этих бассейнов в силу своей природы, как правило, не обладают регулярной периодичностью. По этой причине корреляционный потенциал образуемых ими последовательностей (в т. ч. секвенций 3-го порядка) чрезвычайно низок.

Результаты исследований, представленные в этой статье, получены в ходе реализации научной программы по госзаданию АААА-А16-116042010088-5 «Эволюция геодинамических обстановок и глобальные природные процессы».

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев А.С. Проект «Эвстатические колебания уровня моря в фанерозое и реакция на них морской биоты» и его основные результаты // Эвстатические колебания уровня моря в фанерозое и реакция на них морской биоты. Мат. сов. М.: Палеонтологический институт РАН, 2007. С. 3–9.
2. Артюшков Е.В., Чехович П.А. Природа изменений глубины моря в эпиконтинентальных осадочных бассейнах. Восточная Сибирь в силуре // Геология и геофизика. 2004. Т. 45, № 11. С. 1273–1291.
3. Артюшков Е.В., Тесаков Ю.И., Чехович П.А. Флуктуации уровня океана в ордовике. Быстрые изменения скорости погружения земной коры в Восточной Сибири и Балтоскандии // Геология и геофизика. 2008. Т. 49, № 9. С. 841–861.
4. Артюшков Е.В., Чехович П.А. Изменения уровня моря и быстрые движения земной коры в платформенных областях в позднем палеозое // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 10. С. 1567–1592.
5. Кукал З. Скорость геологических процессов. М.: Мир, 1987. 246 с.
6. Модзалевская Т., Мярсс Т. О возрасте подошвы гребенского горизонта Урала // Изв. АН Эстонии. Геол. 1991. Т. 40 (3). С. 100–103.
7. Наливкин Д.В. Проблемы перерывов // Этюды по стратиграфии. М.: Наука, 1974. С. 10–21.
8. Тесаков Ю.И., Предтеченский Н.Н., Лопушинская Т.В., Хромых В.Г., Базарова Л.С., Бергер А.Я., Ковалевская Е.О. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Силур Сибирской платформы. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 2000. 403 с.
9. Чехович П.А. Карбонатные платформы в раннепалеозойских осадочных бассейнах. Седиментационные характеристики и методы изучения // Жизнь Земли. 2010. Т. 32. С. 104–132.
10. Чехович П.А., Живкович А.Е., Медведевская Н.И., Степанова Н.А. Изотопные реперы в палеозойских разрезах Урала // Докл. АН СССР, 1990. Т. 313, № 2. С. 423–426.
11. Чехович П.А., Живкович А.Е., Медведевская Н. И. Изотопно-углеродная летопись силура и нижнего девона в опорных разрезах на Среднем Урале // Доклады Академии наук. 1994. Т. 338, № 4. С. 514–516.
12. Algeo T.J., Wilkinson B.H. Periodicity of mesoscale Phanerozoic sedimentary cycles and the role of Milankovitch orbital modulation // J. of Geology. 1988. V. 96. P. 313–322.
13. Andrew A.S., Hamilton P.J., Mawson R., Talent J.A., Whitford D.J. Isotopic correlation tools in the Mid-Palaeozoic and their relation to extinction events // APEA J. 1994. V. 34. P. 268–277.
14. Artyushkov E.V., Chekhovich P.A. The East Siberian Basin in the Silurian: Evidence for no large-scale sea-level changes // Earth and Planetary Sciences Letters. 2001. V. 193 (1–2). P. 183–196.
15. Artyushkov E.V., Chekhovich P.A. Silurian sedimentation in East Siberia: evidence for variations in the rate of tectonic subsidence occurring without any significant sea-level changes // Tracing Tectonic Deformation Using the Sedimentary Record. Spec. Publ. Geol. Soc. London. 2003. V. 208. P. 321–350.

16. *Hancock J.M.* Comments on the EXXON cycle chart for the Cretaceous system // Cuadernos de Geologia Iberica, Madrid. 1993. № 12. 50 p.

17. *Haq B.U., Hardenbol J., Vail P.R.* Mesozoic and Cenozoic chronostratigraphy and eustatic cycles // Wilgus C.K. et al. (eds). Sea level research – An integrated approach, Soc. Econ. Paleontol. Mineral., Spec. Pub.1988. 42. P. 71–108.

18. *Hladikova J., Hladil, J., Křibek B.* Carbon and oxygen isotope record across Pridoli to Givetian stage boundaries in the Barrandien basin (Czech Republic) // Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol. 1997. V. 132. P. 225–241.

19. *Jepsson L., Calner M.* The Silurian Mulde Event and a scenario for secundo–secundo events // Trans. R. Soc. of Edinburgh: Earth Sci. 2003. V. 93. P. 135–154.

20. *Kaljo D., Kiipli T., Martma T.* Carbon isotope event markers through the Wenlock–Pridoli sequence at Ohesaare (Estonia) and Priekule (Latvia) // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 1997. V. 132. P. 211–223.

21. *Kaljo D., Einasto R., Martma T., Märss T., Nestor V., Viira V.* A bio-chemostratigraphical test of the synchronicity of biozones in the upper Silurian of Estonia and Latvia with some implications for practical stratigraphy // Estonian Journal of Earth Sciences, 2015. V. 64 (4). P. 267–283. DOI 10.3176/earth.2015.33.

22. *Korvin G.* Fractal models in the earth sciences. Amsterdam: Elsevier, 1992. 396 p.

23. *Ladd J.W., Sheridan R.E.* Seismic Stratigraphy of the Bahamas // AAPG Bulletin, 1987. V. 71 (6). P. 719–736. DOI: 10.1306/94887898-1704-11D7-8645000102C1865D.

24. *Märss T., Caldwell M.W., Gagnier P.-Y., Goujet D., Männik P., Martma T., Wilson M.* Distribution of Silurian and Lower Devonian vertebrate microremains and conodonts in the Baillie-Hamilton and Cornwallis Island Sections, Canadian Arctic // Proc. of the Estonian Ac. of Sci. Geology. 1998. V. 47. P. 51–76.

25. *Miall A.D.* Exxon global cycle chart: an event for every occasion? // Geology, 1992. V. 20 (9). P. 787–790.

26. *Miall A.D.* Sequence Stratigraphy and Chronostratigraphy: Problems of Definition and Precision in Correlation, and Their Implications for Global Eustasy // Geoscience Canada, 1995. 21 (1). P. 1–26.

27. *Modzalevskaia T.L., Wenzel B.* Biostratigraphy and geochemistry of Upper Silurian brachiopods from the Timan-Pechora region (Russia) // Acta Geologica Polonica, 1999. V. 49 (2). P. 145–157.

28. *Racki G., Baliński A., Wrona R., Małkowski K., Drygant D., Szaniawski H.* Faunal dynamics across the Silurian–Devonian positive isotope excursions ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$) in Podolia, Ukraine: Comparative analysis of the Ireviken and Klonk events // Acta Palaeontologica Polonica. 2012. V. 57 (4). P. 795–832.

29. *Reineck H.-E.* Über Zeitlücken in rezenten Flachsee Sedimenten // Geologische Rundschau, 1960. V. 49. P. 149–161.

30. *Sadler P.M.* Sedimentation rates and the completeness of stratigraphic sections // Journal of Geology, 1981. V. 89. P. 569–584.

31. *Sloss L.L.* Tectonic episodes of cratons: conflicting North American concepts // Terra Nova, 1992. № 4. P. 320–328.

32. *Suess E.* Das Antlitz der Erde, Band II. 1888. F. Tempsky, Prag and Wien, and G. Freytag, Leipzig, IV + 704 p.

33. *Vail P.R., Mitchum R.M., Jr., Todd R.G., Widmier J.M., Thompson S. III, Sangree J.B., Bubb J.N., Hatlelid W.G.* Seismic stratigraphy and global changes of sea-level // Payton C.E. ed., Seismic stratigraphy — Applications to carbon exploration. Amer. Assoc. Petrol. Geol., 1977. Mem. 26. P. 49–212.

34. *Wenzel B.* Isotopenstratigraphische Untersuchungen an silurischen Abfolgen und deren paläozoographische Interpretation. Erlanger Geologische Abhandlungen, Erlangen. 1997. V. 129. 117 p.

35. Wenzel B., Joachimski M.M. Carbon and oxygen isotopic composition of Silurian brachiopods (Gotland/Sweden): paleoceanographic implications // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 1996. V. 122. P. 143–166.

36. Yur'eva Z.P., Deulin Yu. V., Beznosova T.M., Tsyganko V.S., Mannik P., Martma T. Calcareous sequences in the Silurian–Devonian boundary beds in the Timan-Northern Ural region // *Геология девонской системы: Мат. Межд. сим. Сыктывкар: Геопринт*, 2002. 334 с.

REFERENCES

1. Alekseev A.S. (Ed.). *Eustatic fluctuations of sea-level in Phanerozoic and reaction on its by marine biota*. Materials of meeting. P. 3–9 (Moscow: Paleontological Institute of RAS, 2007) (in Russian).
2. Artyushkov E.V., Chekhovich P. . Mechanisms of sea-depth changes in Silurian epeiric basins of East Siberia. *Russian Geology and Geophysics*. **45** (11), 1219–1236. DOI 10.13140/2.1.2695.1365 (2004).
3. Artyushkov E.V., Tesakov Y.I., Chekhovich P.A. Ordovician sea-level change and rapid change in crustal subsidence rates in East Siberia and Baltoscandia. *Russian Geology and Geophysics*. **49** (9), 633–647. DOI org/10.1016/j.rgg.2007.11.015 (2008).
4. Artyushkov E. ., Chekhovich P.A. Sea level changes and rapid crustal movements in cratonic areas in the Late Paleozoic. *Russian Geology and Geophysics*. **52** (10), 1236–1255. DOI 10.1016/j.rgg.2011.09.014 (2011).
5. Kukul Z. *Rychlost geologických procesů* (The rate of geological processes). 280 p. (Praha: Academia, 1983).
6. Modzalevskaya T.L., Märss T. On the age of the lower boundary of the Greben Regional Stage of the Urals. *Proc. of the Estonian Academy of Sciences, Geology*. **40** (3), 100–103 (1991) (in Russian).
7. Nalivkin D.V. The problems of hiatuses. *Sketches on stratigraphy*. P. 10–21 (Moscow: Nauka Publishers, 1974) (in Russian).
8. Tesakov Yu.I., Predtechensky N.N., Lopushinskaya T.V., Khromykh V.G., Bazarova L.S., Berger A.Ya., Kovalevskaya E.O. *Stratigraphy of oil and gas basins of Siberia. Silurian of Siberian Platform*. 403 p. (Novosibirsk: Izd. SO RAN, 2000) (in Russian).
9. Chekhovich P.A. Carbonate platforms in the early Paleozoic sedimentary basins. Features and methods. *Zhizn' Zemli* (The Life of the Earth). **32**, 104–132 (2010) (in Russian).
10. Chekhovich P.A., Zhivkovich A.Ye., Medvedovskaya N.I., Stepanova N.A. Isotope reference points (for isotope chronostratigraphy) in paleozoic sections of the Urals. *Doklady of the Academy of Sciences of the USSR. Earth Science Sections*. **313** (4), 124–126 (1990) (in Russian).
11. Chekhovich P.A., Zhivkovich A.Y., Medvedovskaya N.I. Carbon isotope calendar for the Silurian and Early Devonian in Middle Urals type sections. *Doklady Earth Sciences*. **341** (3), 118–121 (1996).
12. Algeo T.J., Wilkinson B.H. Periodicity of mesoscale Phanerozoic sedimentary cycles and the role of Milankovitch orbital modulation. *J. of Geology*. **96**, 313–322 (1988).
13. Andrew A.S., Hamilton P.J., Mawson R., Talent J.A., Whitford D.J. Isotopic correlation tools in the Mid-Palaeozoic and their relation to extinction events. *APEA J*. **34**, 268–277 (1994).
14. Artyushkov E.V., Chekhovich P.A. The East Siberian Basin in the Silurian: Evidence for no large-scale sea-level changes. *Earth and Planetary Sciences Let.* **193** (1–2), 183–196 (2001).
15. Artyushkov E.V., Chekhovich P.A. Silurian sedimentation in East Siberia: evidence for variations in the rate of tectonic subsidence occurring without any significant sea-level changes. *Tracing Tectonic Deformation Using the Sedimentary Record*. Spec. Publ. Geol. Soc. London. **208**, 321–350 (2003).
16. Hancock J.M. Comments on the EXXON cycle chart for the Cretaceous system. *Cuadernos de Geologia Iberica*. **12**, 50 (Madrid, 1993).
17. Haq B.U., Hardenbol J., Vail P.R. Mesozoic and Cenozoic chronostratigraphy and eustatic cycles. *Sea Level Changes: An integrated approach*, Soc. Econ. Paleontol. Mineral., Spec. Pub. **42**, 71–108 (1988).

18. Hladikova J., Hladil, J., Křibek B. Carbon and oxygen isotope record across Pridoli to Givetian stage boundaries in the Barrandien basin (Czech Republic). *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* **132**, 225–241 (1997).
19. Jeppsson L., Calner M. The Silurian Mulde Event and a scenario for secundo–secundo events. *Trans. R. Soc. of Edinburgh: Earth Sci.* **93**, 135–154 (2003).
20. Kaljo D., Kiipli T., Martma T. Carbon isotope event markers through the Wenlock–Pridoli sequence at Ohesaare (Estonia) and Priekule (Latvia). *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* **132**, 211–223 (1997).
21. Kaljo D., Einasto R., Martma T., Märss T., Nestor V., Viira V. A bio-chemostratigraphical test of the synchronicity of biozones in the upper Silurian of Estonia and Latvia with some implications for practical stratigraphy. *Estonian J. of Earth Sciences.* **64** (4), 267–283. DOI 10.3176/earth.2015.33 (2015).
22. Korvin G. *Fractal models in the earth sciences*. 396 p. (Amsterdam: Elsevier, 1992).
23. Ladd J.W., Sheridan R.E. Seismic Stratigraphy of the Bahamas. *AAPG Bulletin.* **71** (6), 719–736. DOI 10.1306/94887898-1704-11D7-8645000102C1865D (1987).
24. Märss T., Caldwell M.W., Gagnier P.-Y., Goujet D., Männik P., Martma T., Wilson M. Distribution of Silurian and Lower Devonian vertebrate microremains and conodonts in the Baillie-Hamilton and Cornwallis Island Sections, Canadian Arctic. *Proc. of the Estonian Ac. of Sci. Geology.* **47**, 51–76 (1998).
25. Miall A.D. Exxon global cycle chart: an event for every occasion? *Geology.* **20** (9), 787–790 (1992).
26. Miall A.D. Sequence Stratigraphy and Chronostratigraphy: Problems of Definition and Precision in Correlation, and Their Implications for Global Eustasy. *Geoscience Canada.* **21** (1), 1–26 (1995).
27. Modzalevskaya T.L., Wenzel B. Biostratigraphy and geochemistry of Upper Silurian brachiopods from the Timan-Pechora region (Russia). *Acta Geologica Polonica.* **49** (2), 145–157 (1999).
28. Racki G., Baliński A., Wrona R., Małkowski K., Drygant D., Szaniawski H. Faunal dynamics across the Silurian–Devonian positive isotope excursions ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$) in Podolia, Ukraine: Comparative analysis of the Ireviken and Klonk events. *Acta Palaeontologica Polonica.* **57** (4), 795–832 (2012).
29. Reineck H.-E. Über Zeitlücken in rezenten Flachsee Sedimenten. *Geologische Rundschau.* **49**, 149–161 (1960).
30. Sadler P.M. Sedimentation rates and the completeness of stratigraphic sections. *Journal of Geology.* **89**, 569–584 (1981).
31. Sloss L.L. Tectonic episodes of cratons: conflicting North American concepts. *Terra Nova.* **4**, 320–328 (1992).
32. Suess E. *Das Antlitz der Erde*, B. II. IV+704 p. (F. Tempsky, Prag and Wien, and G. Freytag, Leipzig, 1888).
33. Vail P.R., Mitchum R.M., Jr., Todd R.G., Widmier J.M., Thompson S. III, Sangree J.B., Bubbs J.N., Hatlelid W.G. Seismic stratigraphy and global changes of sea-level. *Seismic stratigraphy – Applications to carbon exploration.* *Amer. Assoc. Petrol. Geol.* **26**, 49–212 (1977).
34. Wenzel B. *Isotopenstratigraphische Untersuchungen an silurischen Abfolgen und deren paläozeanographische Interpretation.* *Erlanger Geologische Abhandlungen, Erlangen.* V. 129. 117 p. (1997).
35. Wenzel B., Joachimski M.M. Carbon and oxygen isotopic composition of Silurian brachiopods (Gotland/Sweden): paleoceanographic implications. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* **122**, 143–166 (1996).
36. Yur'eva Z.P., Deulin Yu.V., Beznosova T.M., Tsyganko V.S., Mannik P., Martma T. Calcareous sequences in the Silurian–Devonian boundary beds in the Timan-Northern Ural region. *Geology of the Devonian System: Proc. of the Inter. Symp.* 334 p. (Syktyvkar: Geoprint, 2002).