

УДК 551.248.1

О ПРИРОДЕ ИЗМЕНЕНИЙ ПАЛЕОГЛУБИН В ЭПИКОНТИНЕНТАЛЬНЫХ МОРСКИХ БАССЕЙНАХ

© 2003 г. Член-корреспондент РАН Е. В. Артюшков, П. А. Чехович, Д. Х. Тарлинг

Поступило 04.10.2002 г.

Как показывает большой объем данных сейсмической стратиграфии и литологии [1, 2 и др.], в фанерозойских эпиконтинентальных бассейнах часто происходили значительные изменения глубины моря. Выяснение закономерностей и физических механизмов таких изменений является одной из главных проблем в геодинамике и геологии нефти и газа. В связи с важными приложениями для поиска углеводородов, а также геологической корреляции особое внимание привлекают циклы третьего порядка с амплитудами ~20–100 м и продолжительностью 1–3 млн. лет. Их основной причиной обычно считаются крупные эвстатические флуктуации уровня Мирового океана [1 и др.], но иногда обнаруживается влияние тектонического фактора. Быстрые эвстатические флуктуации ($\leq 1-3$ млн. лет) с амплитудами ~20–100 м могут быть обусловлены главным образом формированием и таянием крупных ледяных щитов. Эти явления в фанерозое были редкими, а циклы третьего порядка выделяются почти на всем его протяжении, что иногда вызывает сомнения в их эвстатической природе [2].

Многочисленные эвстатические флуктуации третьего порядка ранее предлагались для кембрия и начала ордовика, а также для силура. Недавно было, однако, установлено, что в первую из этих эпох флуктуации уровня океана не превышали 10–20 м [3]. Для силура удалось показать отсутствие крупных эвстатических флуктуаций с резкой регрессивной фазой и флуктуаций гармонического вида [4]. Быстрые изменения глубины моря, проявившиеся в ряде бассейнов в эти эпохи, были в действительности обусловлены тектоническими движениями. В настоящей работе по данным о Восточной Сибири оценивается максималь-

ная величина эвстатических флуктуаций произвольной формы в силуре и рассматривается механизм, ответственный за происходившие здесь изменения скорости погружения коры. В это время здесь всегда существовали крайне мелководные области – широкие отмели с глубиной воды 0–5 м и обширные полуизолированные заотмельные лагуны с глубинами 0–10 м [5]. По палеонтологическим и литологическим данным в мелководных разрезах обычно выделяются последовательности элементарных циклитов метрового масштаба продолжительностью ≤ 1 млн. лет. В течение каждого цикла глубина воды сначала слегка возрастает, а к концу цикла по мере накопления осадков она постепенно уменьшается. В таких условиях циклы третьего порядка обычно выявляются с помощью диаграмм Фишера [6 и др.]. При их построении делаются три предположения:

- 1) скорость погружения коры в каждой области постоянна – линия OO' на рис. 1;
- 2) продолжительность элементарных циклов постоянна во времени;
- 3) продолжительность элементарных циклов во всех областях одинакова.

Мощность каждого циклита сравнивается с той мощностью, которая накопилась бы при погружении коры с постоянной скоростью и заполнении

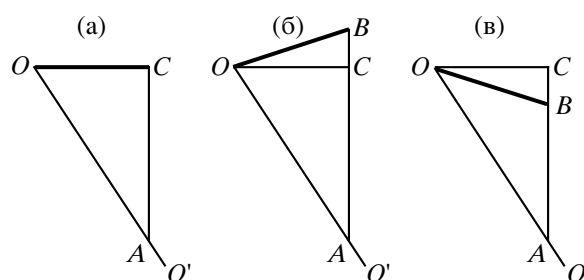


Рис. 1. Диаграммы Фишера, построенные по элементарным циклитам метрового масштаба в мелководном осадочном разрезе для случаев: а – отсутствия изменений уровня океана, б – подъема уровня океана за время цикла на величину BC и в – падения уровня океана за время цикла на величину BC . Линия OO' описывает погружение коры с постоянной скоростью. Погружение коры за время цикла равно отрезку AC .

Институт физики Земли им. Г.А. Гамбурцева
Российской Академии наук, Москва
Институт литосферы
окраинных и внутренних морей
Российской Академии наук, Москва
Отделение геологических наук,
Университет Плимута, Англия

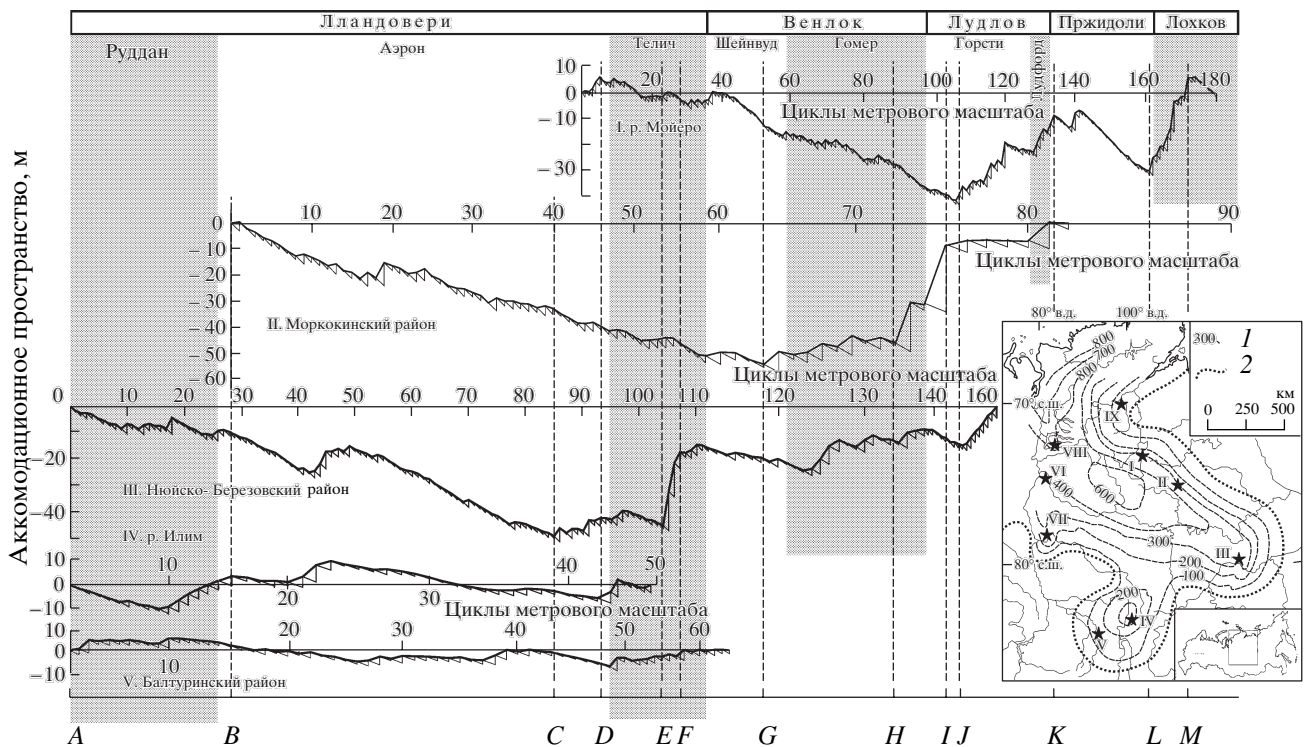


Рис. 2. Диаграммы Фишера, построенные по элементарным циклитам метрового масштаба в мелководных силурийских разрезах [5] для пяти районов Восточной Сибири. Местоположение районов (на врезке справа): I – р. Мойеро, II – Моркокинский район, III – Нюйско-Березовский район, IV – р. Илим, V – Балтуринский район, VI – Туруханский район, VII – р. Кочумдек, VIII – Игарковский район, IX – Ледянский район; 1 – мощность силура, м, 2 – граница бассейна.

образовавшегося “пространства аккомодации”. Если эти мощности одинаковы (AC на рис. 1а), то считается, что уровень океана за время цикла не изменился. Если мощность осадков AB превышает тектоническое погружение AC (рис. 1б), то это объясняют повышением уровня океана на величину BC за время цикла. Если же мощность осадков AB меньше тектонического погружения AC (рис. 1в), то это связывают с падением уровня океана на величину BC. По данной схеме строятся последовательности большого числа элементарных циклов, где к точке C каждого цикла пристраивается точка O следующего цикла. Считается, что ломаная линия, составленная из верхних границ циклов OC, аппроксимирует более медленные изменения уровня океана продолжительностью $\geq 1-10$ млн. лет.

На рис. 2, по данным [5], диаграммы Фишера построены по элементарным циклитам для пяти районов Восточной Сибири. В каждом районе диаграммы охватывают тот временной интервал силура, когда осадконакопление происходило в условиях крайнего мелководья ($\leq 5-10$ м). На диаграммах выделяются продолжительные (~10–15 млн. лет) спады ~40–50 м: интервалы AC на диаграмме III, BG на диаграмме II и DJ на диаграмме I. Здесь же можно видеть и более короткие (~1–3 млн. лет) изменения с амплитудами 30–40 м, ха-

рактерные для циклов третьего порядка: EF на графике III, HI на графике II, JK и LM на графике I. Эвстатические флуктуации по всей Земле практически одинаковы. Поэтому, если диаграммы Фишера действительно описывают такие флуктуации, то для всех областей диаграммы также должны быть одинаковыми. Нетрудно видеть, однако, что диаграммы рис. 2 сильно различаются между собой. Указанные циклы третьего порядка на них наблюдаются в разное время. Во время продолжительного спада AC на диаграмме III и спада BG на диаграмме II, на диаграммах IV и V наблюдаются лишь слабые изменения.

Таким образом, диаграммы рис. 2, построенные по классической схеме, эвстатических флуктуаций не описывают. Отсюда следует, что положенные в их основу предположения 1)–3) для Восточной Сибири в силуре не соблюдались. Действительно, на диаграмме II в аэроме и теличе примерно за 11 млн. лет [7, 8] имели место 59 элементарных циклов со средней продолжительностью 0.19 млн. лет, а в венлоке и лудлове на протяжении 9 млн. лет выделяются 22 элементарных цикла со средней продолжительностью, примерно вдвое большей – 0.41 млн. лет. Это означает, что продолжительность элементарных циклов не оставалась постоянной, но изменялась во времени, т.е. условие 2) не выполнялось. В венлоке

диаграммы I–III включают соответственно 59, 14 и 29 циклов. Следовательно, продолжительность элементарных циклов в разных областях сильно различалась, т.е. не выполнялось условие 3).

Постоянная продолжительность элементарных циклов и их синхронность в разных областях предполагают эвстатическую природу слабых флуктуаций глубины воды (≤ 1 м), которыми обусловлена такая цикличность [9]. Эта возможность подвергалась сомнению, поскольку изменения глубины моря в краевых частях бассейнов могут быть обусловлены также переносом осадков донными течениями [10 и др.]. Проведенное рассмотрение подтверждает указанное предположение, по крайней мере для Восточной Сибири в силу.

На основе большого объема детальных данных по многочисленным разрезам силур Восточной Сибири продолжительностью 26 млн. лет [7] расчленен на 54 синхронных интервала – хронозоны, коррелирующиеся со стандартной стратиграфической шкалой [5]. По мощности мелководных осадков каждой из хронозон диаграммы Фишера построены для ряда районов Восточной Сибири на рис. 3 и 4. Диаграммы для областей I–V на рис. 4 и 2 резко отличаются друг от друга. В частности, на диаграммах рис. 4 (как и на диаграммах рис. 3) отсутствуют короткие циклы третьего порядка продолжительностью 1–3 млн. лет, хорошо видные на диаграммах рис. 2. Это еще раз показывает, что диаграммы Фишера, построенные согласно общепринятой методике по элементарным циклитам с неопределенными датировками, не могут быть использованы для выявления крупных эвстатических флуктуаций. Поэтому многие эвстатические события третьего порядка, выделенные другими исследователями для ряда подразделений фанерозоя [6 и др.], с большой вероятностью могут оказаться артефактами.

На рис. 3 в венлоке–пржидоли для районов Туруханска и р. Кочумдек отклонения графиков VI, VII от горизонтальной оси очень малы: ≤ 5 –7 м. Согласно стандартной интерпретации [6], это указывает на отсутствие эвстатических флуктуаций, превышающих ± 5 –7 м. Действительно, допустим, что в данную эпоху имели место подъемы и спады уровня моря в десятки метров. Тогда отсутствие соответствующих отклонений диаграмм от горизонтальной оси возможно, только если подъемы и спады уровня океана почти точно компенсировались соответственно замедлениями и ускорениями погружения коры. Глобальные изменения уровня океана и региональные тектонические движения – это независимые явления. Вероятность их взаимной компенсации, даже в одной области, крайне мала, а для двух областей одновременно она практически равна нулю. Более того, в венлоке–пржидоли малые отклонения от гори-

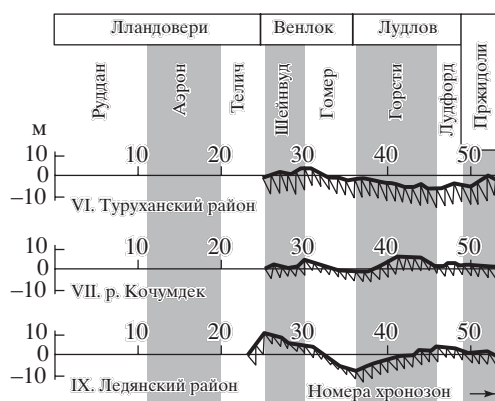


Рис. 3. Диаграммы Фишера, построенные по мощности синхронных интервалов (хронозон) в мелководных разрезах [5] юго-запада и севера Восточной Сибири. Расположение районов показано на врезке на рис. 2.

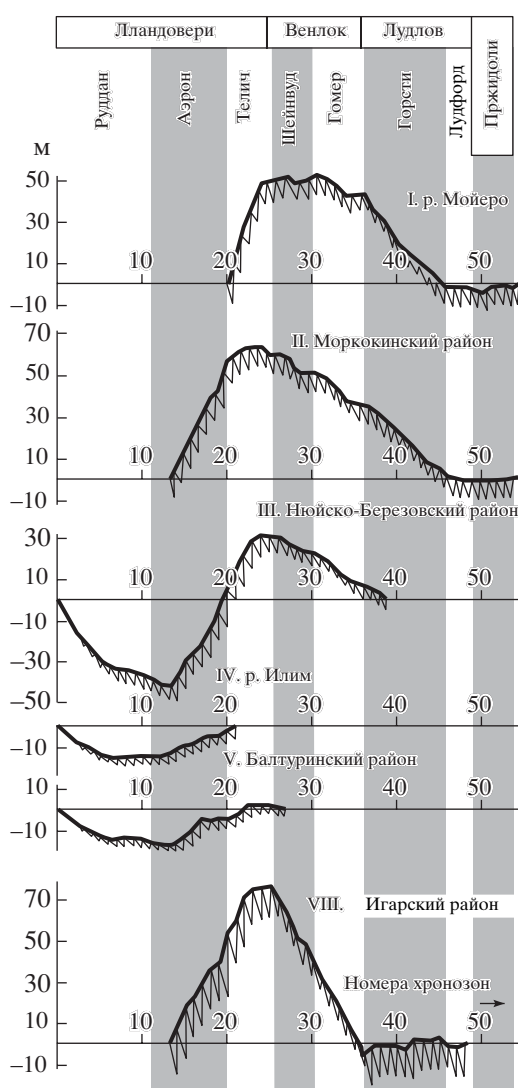


Рис. 4. Диаграммы Фишера, построенные по мощности хронозон в мелководных разрезах [5] центральной части Восточной Сибири. Расположение районов показано на врезке рис. 2.

зонтальной оси, не превышавшие ± 10 м, были характерны для Ледянского района (IX), удаленного на ~ 1000 км от районов VI, VII. На рис. 4 диаграммы I, II в конце лудлова и в пржидоли, а также диаграмма VIII в лудлове также практически горизонтальны. В таких условиях в течение 11 млн. лет в венлоке–пржидоли эвстатические флуктуации не могли превышать $\pm 5\text{--}7$ м.

Для более ранней части силура – лландовери на рис. 4 наблюдается примерно одинаковый спад на 15 м на диаграммах IV и V для Илимского и Балтуринского районов. При отсутствии диаграмм для других районов его можно было бы интерпретировать как результат понижения уровня океана на 15 м. Однако на диаграмме III для Ньюско-Березовского района в ту эпоху имел место спад примерно такой же формы, но в три раза больший (45 м). Так как эвстатические флуктуации везде одинаковы, такое различие диаграмм указывает на значительный вклад тектонических движений. Отклонения диаграмм от горизонтальной оси могут быть обусловлены как эвстатическими флуктуациями, так и изменениями скорости погружения коры. Поскольку эти два фактора независимы и изменяются во времени по-разному, то при их сопоставимом вкладе корреляция по фазе диаграмм III–V была бы нарушена. Поэтому вклад в отклонения от горизонтальной оси эвстатических флуктуаций во всех этих диаграммах может составлять лишь небольшую долю наблюдаемых суммарных отклонений. Для диаграмм IV, V на рис. 4 в лландовери эти отклонения составляют 15 м. Следовательно, эвстатические флуктуации, составлявшие лишь небольшую часть данной величины, в то время, как и на протяжении остальной части силура, не превышали $\pm 5\text{--}7$ м.

Диаграммы на рис. 3 и 4 построены в предположении постоянства продолжительности интервалов времени, соответствующих хронозонам (“хронов” в современной стратиграфической номенклатуре). Нельзя, однако, исключить, что как и для элементарных циклов, их длительность изменялась во времени. В таком случае построенные по ним диаграммы уже неприменимы для оценки максимальной величины эвстатических флуктуаций. В рассмотренных районах депрессия, формировавшаяся при погружении коры, непрерывно заполнялась осадками. В таких условиях изменение продолжительности хрона на величину $\Delta t_{хз}$ должно было привести к изменению мощности соответствующей хронозоны на $\Delta h_{хз} = a\Delta t_{хз}$, где a – скорость погружения коры. Величина $\Delta h_{хз}$ пропорциональна a . В разных районах погружение коры происходило со скоростями a , различившимися в несколько раз. Соответственно изменение продолжительности хрона на $\Delta h_{хз}$, одинаковое для разных областей, должно было привести в них к разному изменению мощности

хронозон $\Delta h_{хз}$, пропорциональному a . Как показал, однако, анализ диаграмм Фишера, на ряде интервалов разреза, включающих большое число хронозон, значительных изменений $\Delta h_{хз}$ от одной хронозоны к другой не происходило. Отсюда следует, что продолжительность хронов сохранялась примерно постоянной, и это является достаточно неожиданным результатом. Он позволяет на порядок величины повысить точность датировок событий, происходивших в данную эпоху.

В отличие от диаграмм IV, V в лландовери на рис. 4 и диаграмм VI, VII, IX в венлоке–пржидоли на рис. 3, где отклонения от горизонтальной оси малы, на диаграммах I–III и VIII на рис. 4 такие отклонения составляют 30–75 м. Их продолжительность равна 10–15 млн. лет. При почти стабильном уровне моря крупные подъемы на диаграммах указывают на значительные ускорения погружения коры, а спады – на его замедления. В указанных районах эти изменения скорости погружения были в первом приближении синхронны, но в разных местах они проявлялись с разной интенсивностью. Существенной особенностью силурийских разрезов Восточной Сибири является отсутствие значительных размывов. При практически стабильном уровне моря это означает, что в данную эпоху здесь не проявлялись заметные восходящие движения коры, а происходили только квазисинхронные изменения скорости ее погружения. Рассмотрим, с каким механизмом эти изменения могли быть связаны.

Погружение коры в осадочных бассейнах часто объясняют термоупругим сжатием пород коры и мантии при их охлаждении [11]. Характерное время процесса по порядку равно 100 млн. лет. В силуре возраст литосферы в Восточной Сибири составлял ~ 1 млрд. лет. Поэтому охлаждение литосферы не могло внести заметный вклад в ее погружение. Тем более с ним не могли быть связаны значительные изменения скорости погружения за время $\sim 10\text{--}15$ млн. лет. Силы, действующие вдоль литосферы с мощностью, переменной по площади, приводят к ее смещениям по вертикали [12]. При изменении сил во времени возникают вертикальные движения коры, с чем могут быть связаны изменения глубины моря [13]. Смещения коры, обусловленные данным механизмом, убывают с ростом ширины L неоднородности мощности литосферы как $1/L^2$ [12]. Они могут обеспечить изменения глубины моря на $\sim 50\text{--}100$ м лишь в областях, ширина которых не превышает нескольких сот километров. В Восточно-Сибирском бассейне размером ≥ 1000 км рассматриваемый механизм мог привести только к небольшим вертикальным смещениям коры ≤ 10 м. Поднятия и погружения коры могут быть обусловлены также изменениями динамической топографии в мантии над погружающимися в нее литосферными плитами [14]. Они возникают при изменении

расположения зон субдукции на поверхности Земли, а также при изменениях скорости субдукции или угла наклона субдуцированных плит. В силуре субдукция происходила под Сибирскую платформу с юга (в современных координатах). Интенсивность движений, обусловленных изменениями ее характеристик, должна убывать с увеличением расстояния от коллизионной границы. В силуре, однако, изменения во времени скоростей погружения коры не уменьшались, а увеличивались к северу, что исключает заметный вклад рассматриваемого механизма.

Силурийские отложения в Восточной Сибири (мощностью до 600–800 м) слагают лишь небольшую часть ее осадочного чехла, полная мощность которого достигает 10–14 км. При отсутствии сильного растяжения такое погружение коры требовало значительного уплотнения пород в коре и (или) мантии. Единственный механизм, который может обеспечить постепенное погружение коры за ~1 млрд. лет, – это медленное уплотнение пород в нижней коре за счет фазового перехода габбро в гранатовые гранулиты [15]. Наиболее вероятно, что с ним было связано и силурийское погружение в Восточной Сибири. В ее районах I–III и IX значительные ускорения и замедления погружения были синхронны с точностью до нескольких миллионов лет. Ускорение фазового перехода и обусловленного им погружения может быть обусловлено нагревом пород при изменении теплового потока из астеносферы. Мощность литосферы под обширным Восточно-Сибирским бассейном, как и в других платформенных областях, скорее всего, существенно изменялась по площади. Соответственно было переменным по площади и время прогрева нижней коры при изменении теплового потока из астеносферы, которое пропорционально квадрату мощности литосферы. Для древних платформ с мощной литосферой это время в среднем составляет ~100 млн. лет. При значительных изменениях по площади времени прогрева литосферы практически невозможно обеспечить изменения температуры в нижней коре, синхронные с точностью до нескольких миллионов лет. Фазовые переходы в нижней коре основного состава ускорятся также в присутствии малого объема водосодержащего флюида. В литосфере с мощностью, переменной по площади, нельзя обеспечить квазисинхронное выделение флюида в нижней коре при нагреве пород тепловым потоком из астеносферы с распадом водных минералов. Поэтому наиболее вероятно, что ускорение фазовых переходов было обусловлено быстрой инфильтрацией в литосферу из небольших мантийных плюмов поверхность-активных флюидов, проникавших в нижнюю кору через мантийную литосферу [15]. Таким образом можно объяснить неоднократные ускорения погружения коры, которые были ха-

рактерны для большинства эпиконтинентальных осадочных бассейнов.

В ряде платформенных областей в силуре неоднократно происходили изменения глубины моря на десятки–сотню метров за один или несколько миллионов лет [8]. Они имели место в Айове в Северной Америке, Англии, Чехии и Эстонии в Европе, на юго-востоке Китая и юго-востоке Австралии. При почти стабильном уровне моря такие изменения палеоглубин указывают на существование быстрых поднятий и погружений коры на платформах, которые обычно считаются достаточно стабильными. Быстрые поднятия коры при практически стабильном уровне моря имели место также в Литве и Южной Швеции в кембрии [3]. Восточная Прибалтика в кембрии и Восточная Сибирь в силуре были выбраны для анализа достаточно случайным образом – в связи с хорошим доступом к высокоточным стратиграфическим данным. Поэтому весьма вероятно, что и в большинстве других эпох фанерозоя, когда не было крупных оледенений, уровень океана оставался практически стабильным, а быстрые изменения палеоглубин возникали главным образом за счет тектонических движений. В таком случае потребуется коренное изменение современной методики поиска неструктурных ловушек для нефти и газа, которая основана на предположении о глобальной синхронности изменений глубины моря [1]. Вместо этого надо изучать закономерности и физические механизмы тектонических движений регионального масштаба, с которыми были связаны быстрые изменения палеоглубин в эпиконтинентальных морских бассейнах.

Авторы выражают глубокую признательность Ю.И. Тесакову за предоставление большого объема оригинальных данных и полезные дискуссии.

Выполненные исследования проводились при финансовой поддержке РФФИ (проект 00–05–64095).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mesozoic and Cenozoic Sequence Stratigraphy of European Basins / P.C. de Graciansky, J. Hardenbol, T. Jaquin, P.R. Vail Eds. // SEPM Spec. Publ. Ser. 1998. V. 60. 786 p.
2. Miall A.D. The Geology of Stratigraphic Sequences. B.: Springer, 1997. 433 p.
3. Artyushkov E.V., Lindström M., Popov L.E. // Tectonophysics. 2000. V. 320. P. 375–407.
4. Artyushkov E.V., Chekhovich P.A. // Earth and Planet. Sci. Lett. 2001. V. 193. P. 183–196.
5. Тесаков Ю.И., Предтеченский Н.Н., Лопушинская Т.В. и др. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири: Силур Сибирской платформы. Новосибирск: Изд-во СО РАН; фил. ГЕО, 2000. 403 с.

6. Goldhammer R.K., Lehmann P.J., Dunn P.A. // J. Sediment. Petrol. 1993. V. 63. P. 318–359.
7. Gradstein F.M., Ogg J. // Episodes. 1996. V. 19. P. 3–5.
8. Johnson M.E. // Geol. Soc. Amer. Spec. Pap. 1996. V. 306. P. 202–211.
9. Schwarzscher W. // Earth Science Revs. 2000. V. 50. P. 51–75.
10. Drummond C.N., Wilkinson B.H. // Geology. 1993. V. 21. P. 1023–1026.
11. McKenzie D. // Earth and Planet. Sci. Lett. 1978. V. 40. P. 25–32.
12. Artyushkov E.V. // J. Geophys. Res. 1974. V. 79. P. 741–752.
13. Cloetingh S., McQueen H., Lambeck K. // Earth and Planet. Sci. Lett. 1985. V. 51. P. 139–162.
14. Burgess P.M., Curnis M., Moresi L.N. // Geol. Soc. Amer. Bull. 1997. V. 109. P. 1515–1535.
15. Артюшков Е.В. Физическая тектоника. М.: Наука, 1993. 458 с.