

ДЛИТЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОРА—МАНТИИ И УСКОРЕНИЕ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ В МЕЗОЗОЕ*

Вейцзя Чжан, Юаньлинь Сунь¹, Нил Келли², Ян Лэй³, Хэнцзе Юй

Department of Physics, Peking University, Beijing 100871, P. R. China

¹ *Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Peking University, Beijing 100871, P. R. China*

² *Department of Geology, University of California, Davis, 1 Shields Avenue Davis, CA 95616, USA*

³ *State Key Laboratory of Palaeobiology and Stratigraphy, Nanjing 210008, China*

Линии роста, наблюдаемые в минерализованных тканях живых и ископаемых организмов, часто фиксируют регулярные структуры, отвечающие суточным, месячным или годовым циклам. Слои роста, фиксируемые в ископаемых кораллах и других морских беспозвоночных, свидетельствуют о длительном замедлении вращения Земли, происходящим, вероятно, вследствие приливного трения и приводящим к сокращению количества дней в году на протяжении всей истории Земли. Ископаемые остатки показывают, что скорость такого сокращения не была постоянной, при этом наиболее заметно отклоняющийся от предшествующих и последующих периодов тренд приходится на интервал от позднего карбона до мела. Однако недостаток данных не позволил до конца выяснить природу и причины кажущегося перепада в замедлении вращения Земли в этот временной интервал.

В этой работе мы представляем новые геохронометрические данные по ископаемым остаткам, которые свидетельствуют о длительном ускорении вращения Земли в начале мезозойской эры, длившемся около 90 млн лет и приведшим к сокращению длительности суток (LOD) со средней скоростью около 3 мс/100 лет. Совпадение по времени этого ускорения с определенными геофизическими событиями, включая окончательное формирование суперконтинента Пангея, изменение интенсивности и стабильности геомагнитного поля, позволяют уверенно предположить, что причины этого ускорения скрыты в глубинных областях Земли. Аналогичное объяснение было предложено для наблюдаемых вариаций скорости вращения Земли, происходящих с 10-летним периодом. Наши результаты подтверждают существование крупномасштабной связи между изменением скорости вращения, тектоникой и геомагнитным полем с геодинамическими явлениями, происходящими на границе кора—мантия (СМВ). Кроме того, выявленное ускорение вращения Земли, начавшееся в конце палеозоя, и связанные с ним геофизические факторы могут в конечном счете привести к установлению причин массового вымирания организмов в пермско-триасовое время.

Форма роста, вращение Земли, слой D'', цикл Вильсона, электромагнитное взаимодействие ядро—мантия.

LONG-TERM ELECTROMAGNETIC CORE-MANTLE COUPLING AND THE EARTH'S ROTATION ACCELERATION IN THE MESOZOIC ERA

Weijia Zhang, Yuanlin Sun, N. Kelley, Yang Lei, Hangjie Yu

Growth lines in the mineralized tissues of living and fossil organisms often exhibit regular patterns that record daily, monthly, or annual cycles. Growth laminations in fossil corals and other marine invertebrates indicate long-term deceleration of the Earth's rotation, probably largely due to tidal friction, resulting in a decline in the number of days per year over the Earth's history. Fossils suggest the rate of decline has not been uniform, with the trend between the late Carboniferous and Cretaceous in particular departing from preceding and subsequent periods. However, insufficient data have obscured the nature and cause of the apparent halt in despinning within this time interval. Here we present new fossil geochronometer data that reveal a sustained acceleration in the Earth's rotation in the early Mesozoic Era, lasting about 90 Myr and having led to a decrease in the length of day (LOD) at an average rate of about 3 ms/kyr. The coincidence of this acceleration with certain geophysical events, including the final assembly of Pangaea and a change in the intensity and stability of the geomagnetic

* Статья публикуется в порядке дискуссии, так как представленный палеонтологический материал и предложенная электромагнитная модель, связанная с вариациями мощности слоя D'' на границе ядро—мантия, вызывают многочисленные замечания рецензентов. В частности, не приведено сравнение годовых структур роста кораллов и двустворок (на котором базируется предположение о локальном уменьшении скорости вращения Земли в триасе и ранней юре). Электромагнитная модель заимствована почти полностью из статьи [Holme, 1998], которая основана на современных маломасштабных вариациях длительности дня, и неясно, как ее применить к длиннопеременным и масштабным вариациям магнитного поля в фанерозе и тем более — в докембрии. Тем не менее проблемы, затронутые в статье, важные и интересные, они могут стимулировать дальнейшие исследования. *Примечание редколлегии*

field, strongly suggests that its cause is rooted in the deep interior of the Earth. A similar explanation has been proposed for observed decadal variations in the Earth's rotation. Our results suggest large-scale linkage of rotational variation, tectonics, and the geomagnetic field to core-mantle boundary (CMB) dynamics. Furthermore, the newly identified acceleration in the Earth's rotation which began at the end of the Paleozoic and the geophysical factors that are associated with it can ultimately clarify the causal mechanisms of the Permo-Triassic mass extinction.

Growth pattern, Earth's rotation, D'' layer, Wilson cycle, electromagnetic core-mantle coupling

ВВЕДЕНИЕ

Работа Дж. Велла [Wells, 1963], посвященная линиям роста ископаемых и современных кораллов, открыла новое направление исследований эволюции системы Земля—Луна и стимулировала интерес к палеонтологическим часам, основанным на подсчете суточных и годовых линий роста в ископаемых остатках организмов [Berry, Barker, 1968; Pannella et al., 1968; Mazzullo, 1971; Johnson, Nudds, 1975]. В настоящее время большинство исследователей выделяют три типа форм роста ископаемых кораллов: суточные линии роста, возникающие при дневном увеличении отложения карбоната кальция, лунно-месячные кольца, контролируемые репродуктивными циклами, и ежегодные кольца нарастания, отражающие периодическое изменение плотности внутренних тканей [Wells, 1963; Scrutton, 1964; Knutson et al., 1972]. Аналогично кораллам, формы роста некоторых видов двустворчатых моллюсков и брахиопод также показывают годовые кольца (I порядок), двухнедельные полосы (II порядок) и суточные линии (III порядок). Механизмы их образования уже проиллюстрированы в [Pannella, 1972] и многими последующими исследователями [Richardson et al., 2004; Clark, 2005; Zhao et al., 2007].

Несмотря на то, что эти данные подтвердили прогноз, базирующийся на астрономических расчетах замедления вращения Земли вследствие приливного трения, данный подход был в целом отвергнут из-за сомнительной точности геохронометров, основанных на окаменелостях [Clark, 1974; Gould, 1979]. Однако последние работы по кораллам [Moу et al., 2006; Levy et al., 2007] и двустворчатым моллюскам [Ohno, 1989] поддерживают интерпретацию слоев роста с точки зрения суточных и годовых циклов и предлагают новые модели, учитывающие осложняющие факторы (например, приливно-отливные циклы).

Мы понимаем, что полученные данные должны рассматриваться как приблизительные, а не как точные величины для проведения математического анализа, на что обращал внимание [Scrutton, 1978]. Поскольку палеонтологические данные использовались для качественного анализа, а не для количественных расчетов, их точность существенно не повлияет на общий тренд вращения Земли. Вместо абсолютных значений эти данные могут дать только общее представление.

При помощи новых методик мы подсчитали количество последовательных тонких линий роста в годовых кольцах в 165 пробах ископаемых кораллов и измерили ширину каждого тонкого прироста между более крупными кольцами для анализа ритмических форм роста трех порядков (годовых, двухнедельных и суточных) в 111 пробах ископаемых двустворчатых моллюсков. Образцы двустворчатых моллюсков для анализа выбирались на основании следующих критериев: 1) наличие ритмических форм роста трех различных порядков на поверхности раковин, из которых количество форм роста I порядка составляет не менее трех; 2) отчетливо наблюдающиеся линии роста II порядка, периодичность которых соответствует двухнедельным и лунным циклам; 3) линии роста III порядка, которые можно последовательно подсчитать и измерить на основе не менее 4—5 линий роста II порядка.

Изменчивость ширины линий роста III порядка использовалась для контроля согласованности форм роста предполагаемых двухнедельных циклов при проведении анализа сепетрума. Поскольку многие из выбранных образцов представлены морскими (например, крыловидными и гребневидными) и пресноводными формами, мы связываем линии роста 3-го порядка во всех образцах с суточными циклами. Такая интерпретация дает заниженную оценку количества дней в году. В результате формы роста ископаемых кораллов и двустворок свидетельствуют о существовании длительного ускорения вращения Земли в мезозое. Кроме того, в работе обсуждается механизм вращения и сформулирована модель длительного вращения Земли.

МЕТОДЫ И ДАННЫЕ

Исходным материалом для анализа служила эпитека, являющаяся основной скелетной структурой табулят, ругоз, склерактиний и основным материалом не только внешних поверхностей кораллума, но и различных внутренних мембран и перегородок. Существуют три иерархических уровня форм роста ис-

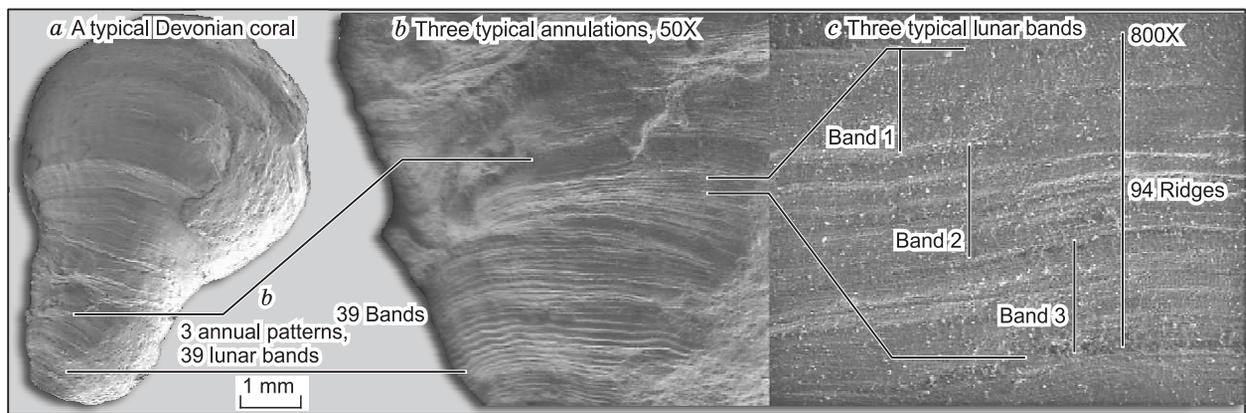


Рис. 1. Диаграмма форм роста ископаемых кораллов.

Показан обр. Н-8-9 (возраст ~ 360 млн лет) типичного девонского коралла из свиты Хонгулеленг (Синьцзян, Китай). *a* — общий вид образца, на котором видны сотни четких лунных полос; *b* — увеличенное изображение трех годовых форм роста фрагмента образца из (*a*), содержащего 39 лунных полосок; *c* — изображение фрагмента лунных полос из части (*b*) в увеличенном виде, в его пределах насчитывается 30 гребней.

копаемых кораллов, проиллюстрированных на рис. 1. Каждый из них соответствует астрономическому периоду. Выбранные для исследования образцы двустворок и брахиопод имеют близкие формы роста.

Суточные формы. Тонкие «гребни» на поверхности эпитеки кораллов параллельны растущему краю кораллума (см. рис. 1, *c*). Вертикальная толщина гребней также варьирует. Эти тонкие гребни или линии роста являются проявлением суточных колебаний периодичности пережимов [Wells, 1963; Moya et al., 2006], что подтверждают эксперименты с тканями современных кораллов.

Лунные формы роста. По длине эпитеки кораллов также обнаруживаются пережимы, разграничивающие последовательные группы гребней, для которых предложен термин «полоса». Канавообразные пережимы разделяют эпитеку на несколько полос, каждая из которых содержит 27—34 суточных гребня, указывающих на их принадлежность к лунным формам. Такие полосы интерпретировались нами как формы роста с периодичностью возникновения в один лунный месяц [Scrutton, 1964]. В этом случае стимулирующим фактором роста являлся лунный свет [Levy et al., 2007].

Годовые формы роста. На многих образцах ископаемых кораллов можно различить несколько основных кольцеобразных структур в форме выпуклостей, как показано на рис. 1, *a*, *b* (увеличенный фрагмент). На всех образцах отмечается от 12 до 14 лунных полос между смежными кольцеобразными структурами. Годовая периодичность признается уже давно [Wells, 1963; Knutson et al., 1972; Chen et al., 2009].

Экспериментальные исследования форм роста раковин современных двустворок также показали, что на формы роста могут влиять различные астрономические периоды, например, приливно-отливные, суточные, двухнедельные или годовые циклы, тогда как раковины других видов не показывают регулярной периодичности роста, что ставит под сомнение некоторые выводы, сделанные по палеозойским морским беспозвоночным [Gould, 1979].

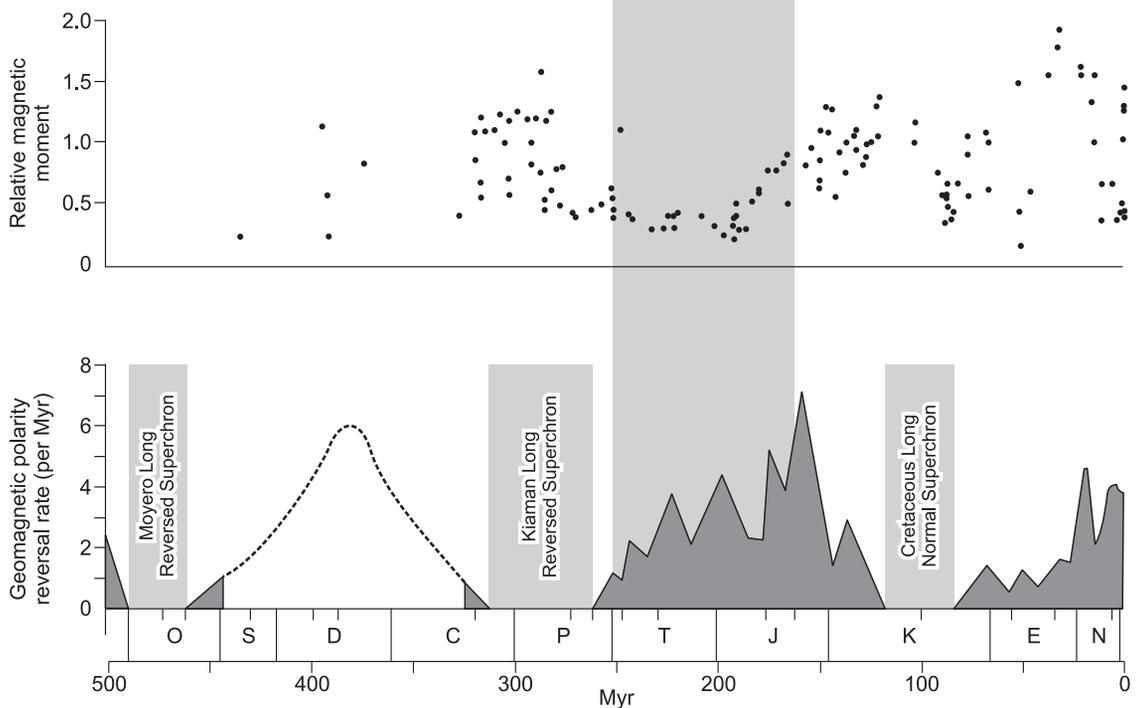
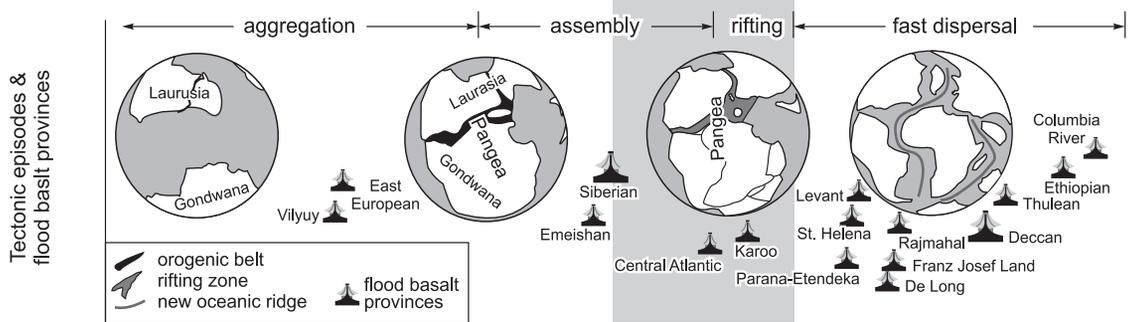
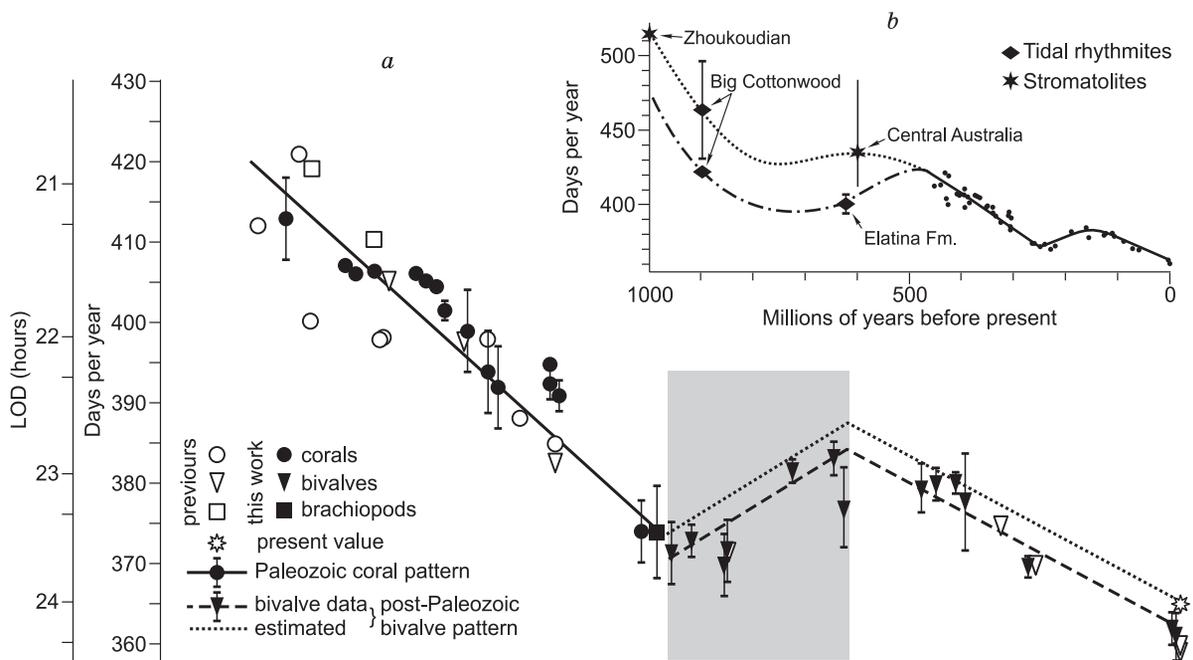
Исследования современных кораллов [Moya et al., 2006; Levy et al., 2007] свидетельствуют в пользу существования суточных форм роста в ископаемых кораллах. Исследования форм роста по раковинам современных двустворок [Ohno, 1989] также позволили разработать несколько моделей для выявления циклов роста, связанных с приливами—отливами, по скорости роста и анализу приращений, которые можно применять к ископаемым двустворчатым моллюскам.

В 276 образцах, отобранных из общего количества в семь тысяч проб, на эпитеке выделены отчетливые формы роста. С использованием новых доступных методик мы попытались повысить точность измерений в следующих случаях.

1. Каждая полоса, отвечающая лунному циклу, проанализирована на сканирующем электронном микроскопе EMLPKU или оборудованном трансфокатором стереоскопическом микроскопе SMZ1500, при этом фотографии сделаны с увеличением, достаточным для надежного различения каждого суточного гребня.

2. Слоистые формы роста исследованы с использованием спектрального анализа для корректной идентификации периодов второго порядка.

3. Использовалось программное обеспечение (ПО) ImageProPlus для сопоставления фаз. Все авторитетные источники согласны с тем, что полосчатость плотности скелета, независимо от причин ее



возникновения, является отражением годовых ритмов. Однако остается вопрос, в каком месте начать и где закончить подсчет элементов годовых форм роста. При применении метода с использованием ПО IPP наличия кольцеобразных структур достаточно для решения проблемы выбора точек начала и окончания подсчета элементов форм роста. В этом методе формы роста ископаемых животных сравниваются с теоретической формой, при этом отфильтровывается шум, а точность распознавания гораздо выше по сравнению с простой визуальной оценкой на глаз.

4. После записи данных мы проанализировали результаты путем их сравнения с измерениями толщины нарастаний, т.е. результаты подсчета должны быть близки к приближенным значениям, полученным путем измерения толщины. Мы выбирали несколько четких гребней из одной полосы одного образца и измеряли их ширину. Затем измерялась ширина полосы. Подсчитанное количество гребней сравнивалось с приближенным значением, полученным путем деления ширины полосы на среднюю ширину гребней.

Однако целостность регистрации могут нарушать два фактора: 1) нерегулярные возмущения экологического фона или частные травмирующие события, 2) степень сохранности ископаемых остатков. Как обсуждалось выше, вклад первого фактора составляет около 1 %, согласно [Wells, 1963; Pannella, 1972], и его влияние можно компенсировать введением поправки, что приведет к смещению результирующей кривой, однако форма кривой останется неизменной. В нашем исследовании результат будет таким же. Другой фактор, влияющий на точность данных, по сути не связан с ошибками регистрации, а связан с ошибочной интерпретацией неясных форм роста или со сложностью определения точек начала и окончания подсчета элементов роста. Такие погрешности существенно снижаются при использовании новых методов: 1) IPP-метода сопоставления фаз и моделирования форм роста кораллов [Zhang et al., 2010] и 2) спектрального анализа изображений форм роста.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Мы измерили линии роста в 276 образцах ископаемых кораллов, двустворчатых моллюсков и брахиопод и рассчитали длительное изменение количества суток в году с начала палеозоя (см. выше). Возраст окаменелостей можно получить на основе изучения вмещающих их пластов. Наши измерения хорошо согласуются с ранее полученными данными (рис. 2, *a*). Количество астрономических суток в году показывает почти линейный нисходящий тренд в палеозое и в позднем мезозое—кайнозое, который нарушается восходящим трендом, приходящимся на ранний мезозой (триас—средняя юра). В палеозое и в позднем мезозое—кайнозое произошло сокращение количества суток в году приблизительно на 55 (экстраполировано на время 500 млн лет назад) и 22 сут соответственно, т.е. рост LOD происходил со средней скоростью около $4.3\text{—}4.5 \text{ мс} \cdot 100 \text{ лет}^{-1}$ и $3.0\text{—}3.1 \text{ мс} \cdot 100 \text{ лет}^{-1}$ соответственно. Тренд, отвечающий раннему мезозою, показывает увеличение количества дней в году приблизительно на 10—13 сут в течение интервала ~ 90 млн лет, соответствующего сокращению LOD со средней скоростью около $3.2\text{—}3.4 \text{ мс} \cdot 100 \text{ лет}^{-1}$. Этот восходящий тренд, очевидно, отражает длительно существовавшее ускорение вращения Земли, которое началось очень близко к рубежу пермь—триас (РТВ), что совпадает со временем окончательного формирования суперконтинента Пангея, и закончилось в позднеюрское время, когда Пангея начала быстро распадаться (см. рис. 2, *a*). Данные изучения строматолитов и приливно-отливных ритмов [Vanyo, Awramik, 1985; Williams, 2000; Qu et al., 2004] показывают, что еще одно вероятное ускорение вращения Земли имело место приблизительно от 800 до 600 млн лет назад и сопровождалось образованием и распадом позднепротерозойского суперконтинента Родиния (см. рис. 2, *b*). Судя по всему, длительно существовавшее ускорение вращения Земли совпало с определенной стадией тектони-

Рис. 2. Рассчитанные по палеонтологическим данным вариации длительности суток (*a*) и количества астрономических суток в году за последние 1000 млн лет (*b*) в сравнении с основными эпизодами тектонического цикла Вильсона и внутриконтинентальными провинциями платобазальтов, а также вариации палеогеомагнитной интенсивности и частоты перемены полярности за последние 500 млн лет.

Линия регрессии, отвечающая палеозою (сплошная) основана на данных по кораллам. Параллельная расчетная линия (пунктир) используется для сравнения с линией регрессии, построенной для постпалеозойских двустворок (штриховая линия). Данные по внутриконтинентальным провинциям платобазальтов заимствованы из работы [Nikishin et al., 2002]. Палеогеомагнитные данные взяты из работ [Denis et al., 2002; Courtillot, Olson 2007].

Данные для позднего протерозоя (часть *b*) взяты из работ [Vanyo, Awramik, 1985; Williams, 2000; Qu et al., 2004]. Подробная информация, относящаяся к этим данным, сведена в табл. 1 и 2. Образцы для этого исследования отобраны на территории Китая, бывшего СССР, Германии и США. Датировки использованных образцов охватывают весь фанерозой. Дополнительно на графики выведены данные многих предшественников.

Таблица 1. Статистика количества суток в году и лунных месяцев в году, полученная при изучении форм роста окаменелостей

Таксон	Свита, территория	Геологический период (млн лет)	Абсолютный возраст, млн лет	Количество точек данных	Образец	Количество суток в году
<i>Cystiphyllum</i> sp.	Бывший СССР	Нижний силур (428—443)	~ 440	1	PKUM-s13	413 ± 5
Кораллы	Манжер, Западно-Джунгарский бассейн, Китай	Пражский ярус, девон (407—411)	~ 410	3	PKUM-M-1,2,3	407 ± 1
»	Бонар, Леон, Испания	Эмский ярус, нижний девон (397.5—407.0)	~ 405	13	PKUM-S-1~13	405.8 ± 0.5
»	Ахбах-Нон, горы Эйфель, Германия	Эйфельский ярус, средний девон (391.8—397)	~ 395	11	PKUM-G-1~11	406.3 ± 0.5
<i>Elytha orbiculata</i> Liasch	Бывший СССР	Живетский-франский ярус, девон	~ 385	1	PKUM-168	401 ± 5
Кораллы	Нижняя часть св. Хонгулелен, Синьцзян, Китай	Верхи франского яруса, девон (374.5—385.3)	~ 375	23	PKUM-HGLL-1-1~23	406.2 ± 0.5
»	Средняя часть св. Хонгулелен, Синьцзян, Китай	Нижняя-средняя часть фаменского яруса, девон (359.2—374.5)	~ 370	26	PKUM-HGLL-2-1~26	405.1 ± 0.5
»	Верхняя часть св. Хонгулелен, Синьцзян, Китай	Верхи фаменского яруса, девон (359.2—374.5)	~ 365	23	PKUM-HGLL-3-1~23	404.2 ± 0.5
»	Хебук Ривер, Китай	Верхи фаменского яруса, девон (359.2—374.5)	~ 360	26	PKUM-HR-1~26	401.5 ± 1.0
»	Хибекуласи, Синьцзян, Китай	Нижний визей, карбон (328.3—345.3)	~ 340	3	PKUM-Xibeikulasi-1,2,3	394 ± 5
»	Усюань, Гуанси, Китай	Визей, нижний карбон (328.3—345.3)	~ 335	1	PKUM-Wuxuan-1	392 ± 5
»	Шицяньтань, Синьцзян, Китай	Поздний карбон, московский ярус (311.7—307.2)	~ 310	20	PKUM-Shiqiantan 1 ~20	392.5 ± 0.5
<i>Pseudobradiphyllum nikitini</i>	Бывший СССР	Поздний карбон, московский ярус (311.7—307.2)	~ 310	7	PKUM-243-1~7	394.8 ± 1.7
<i>Bothrophyllum pseudoconicum</i>	»	Поздний карбон, касимовский ярус (303.4—307.2)	~ 305	5	PKUM-222-1~5	391 ± 2
<i>Polycoelia baytuganensis</i> Soshkina	»	Средняя пермь (260.4—270.6)	~ 265	2	PKUM-285-1~2	374 ± 4
<i>Athyris royssiana</i> Keys	»	Поздняя пермь (251.0—260.4)	~ 256	1	PKUM-307	374 ± 6
<i>Claraia</i> cf. <i>fukianensis</i>	Цинлун, Чангсинг, Чжэцзян, Китай	Индуанский ярус, нижний триас	~ 250	2	NIGPAS-120336, 120362	371.5 ± 2
Двустворки	Гуаньлин, Паньсянь, Гуйчжоу, Китай	Анизийский ярус, начало среднего триаса (216.5—228.7)	~ 240	21	PKUM-Panxian-1 ~21	373.0 ± 2
<i>Halobia bifurcata</i> , <i>Halobia rugosoides</i>	Фалан, Чжэньфен, Гуйчжоу, Китай	Ранний карний, верхний триас (216.5—228.7)	~ 228	2	NIGPAS-116659, 116662	370 ± 4

Таксон	Свита, территория	Геологический период (млн лет)	Абсолютный возраст, млн лет	Количество точек данных	Образец	Количество суток в году
Двустворки (<i>Halobia</i> , <i>Daonella</i>)	Янцюань, Гуаньлин, Гуйяжоу, Китай	Карнский ярус, верхний триас (216.5—228.7)	~ 220	47	PKUM-YJ-1~47	371.8 ± 4
Двустворки	Цзиньцзи, Кайпин, Гуандун, Китай	Поздний геттанг-ранний плинсбах, ранняя юра (183.0—199.6)	~ 190	5	NIGPAS-53321, 53322, 53334-53337, 53339	381.7 ± 1.6
<i>Acyrena</i>	Синьхэ, Шаньдань, Ганьсу, Китай	Средняя юра (161.2—175.6)	~ 170	11	NIGPAS-99659, 99703, 99719, 99728, 99737, 99648, 99745, 99750, 99758, 99770, 99692	383.7 ± 2.1
<i>Isocyprina</i> (<i>Venericyprina</i>) <i>longjiangensis</i> Wen. sp. nov	Лунцзяндун, Динжи, Тибет, Китай	Средняя юра (161.2—175.8)	~ 165	2	NIGPAS-60425, 60516	377 ± 5
<i>Malletia longzhaogouensis</i>	Цихулин, Хэйлунцзян, Китай	Нижний мел, поздне-барремский-ранне-аптский ярус (120—128)	~ 125	4	NIGPAS-132294, 132342, 81521, 82056	379.3 ± 3
<i>Trigonioides quadratus</i>	Хэкоу, Фуцзянь, Китай	Нижний мел, альбский ярус (99.6—112.0)	~ 110	7	NIGPAS-72498, 72466, 72469, 72517, 72542, 72487, 72486	380.5 ± 1.2
<i>Modiolus cf. aequalis</i>	Чуаньба, Гаизе, Тибет, Китай	Аптский-альбский ярус, нижний мел (99.6—125.0)	~ 105	1	NIGPAS-112949	378 ± 6
<i>Astarte porrecta</i> Buch	Бывший СССР	Кампанский ярус, верхний мел (70.6—83.5)	~ 75	4	PKUM-402, 403, 404, 405	370 ± 1
<i>Velutinopsis spiralis</i> Yu sp. nov.	Чжада, Тибет, Китай	Плиоцен (2.59—5.33)	~ 3.6	2	NIGPAS-60659, 60660	362 ± 2
Двустворки	Калусахатчи, Южная Флорида, США	Четвертичное время, плейстоцен (0.01—2.59)	~ 2	2	PKUM-Caloosahatchee - 1,2	361.8 ± 3

ческого цикла Вильсона, что подтверждает связь между этими геофизическими процессами. Мезозойское ускорение (см. рис. 2, а) показывает, что достигнутый уровень суммарной энергии вращения $\sim 1 \cdot 10^{28}$ Дж, равный среднему моменту вращения $\sim 10^{17}$ Н·м, намного превышает момент приливного трения ($4.9 \cdot 10^{16}$ Н·м), соответствующий величине энергии электромагнитного (ЭМ) взаимодействия ядро—мантия [Holme, 1998].

ОБСУЖДЕНИЕ

Последние наблюдения показали, что вращение Земли испытывает возмущения, происходящие с периодичностью раз в десять лет, которые, вероятно, возникают в результате ЭМ взаимодействия кора—мантия [Holme, 1998] и связаны с изменчивостью тонкого электропроводящего слоя D'', расположенного на границе кора—мантия. Исследования и моделирование также подтверждают, что слой D'', по-видимому, оказывает существенное влияние на динамическое поведение границы кора—мантия и изменчивость геомагнитного поля [Lay et al., 1998]. Со времени создания Пангеей теплоизолирующего влияния на систему глубинной мантийной конвекции [Gurnis, 1988], апвеллинг глубинных мантийных конвекционных ячеек оказал декомпрессионный эффект на слой D'' [Cadec et al., 1995]. Возникшее в результате утолщение слоя D'' [Storey et al., 1992; Nikishin et al., 2002] привело к блокированию теплового потока

Таблица 2. Среднее количество дней в синодическом месяце (III порядок), в году (V порядок) и среднее количество синодических месяцев (III) в году (V) с ордовикского времени, рассчитанное на основе линий роста в ископаемых беспозвоночных

Таксон	Номер образца, по YPM-IP	Количество синодических месяцев (III)	I/III	Количество последовательных годовых полос (V)	Возраст, млн лет	I/V (среднее)
<i>Elytha orbiculata</i> Liasch	PKUM-168	51	30.7	2	385	401 ± 5
<i>Athyris royssiana</i> Keys	PKUM-307	88	29.3	3	256	374 ± 6
<i>Claraia</i> cf. <i>fukianensis</i>	NIGPAS-120336, 120362	148	29.2	6	250	371.5 ± 2
Двустворки	PKUM-Panxian-1 ~21	1499	29.4	51	240	373.0 ± 2
<i>Halobia bifurcata</i> <i>Halobia rugosoides</i>	NIGPAS-116659, 116662	300	29.6	12	228	370 ± 4
Двустворки (<i>Halobia</i> , <i>Daonella</i>)	PKUM-YJ-1~47	4322	29.4	147	220	371.8 ± 4
Двустворки	NIGPAS-53321, 53322, 53334-53337, 53339	254	29.8	12	190	381.7 ± 1.6
<i>Acyrena</i>	NIGPAS-99659, 99703, 99719, 99728, 99737, 99648, 99745, 99750, 99758, 99770, 99692	644	29.8	25	170	383.7 ± 2.1
<i>Isocyprina</i> (<i>Venericyprina</i>) <i>longjiangensis</i> Wen	NIGPAS-60425, 60516	78	29.8	3	165	377 ± 5
<i>Malletia longzhaogouensis</i>	NIGPAS-132294, 132342.81521, 82056	312	29.7	12	125	379.3 ± 3
<i>Trigonioides quadratus</i>	NIGPAS-72498, 72466, 72469, 72517, 72542, 72487, 72486	409	29.7	16	110	380.5 ± 1.2
<i>Modiolus</i> cf. <i>aequalis</i>	NIGPAS-112949,	153	29.8	6	105	378 ± 6
<i>Astarte porrecta</i> Buch	PKUM-402, 403, 404, 405	226	29.6	9	75	370 ± 1
<i>Velutinopsis spiralis</i> Yu	NIGPAS-60659, 60660	175	29.2	7	3.6	362 ± 2
Двустворки	PKUM- Caloosahatchee-1,2	174	29.2	7	2	361.8 ± 3

из коры в мантию. Утолщение слоя D'' вызвало серию изменений электромагнитных свойств и сделало его динамически активным [Loper et al., 1988].

На основе этого механизма мы создали модель, объясняющую феномен ускорения вращения Земли и его связь с тектоническим циклом Вильсона. Наши расчеты показывают, что при превышении определенного порогового значения мощности слоя D'' активизируется долговременное ЭМ взаимодействие между корой и мантией, приводящее к ускорению вращения Земли. При этом происходит внезапное изменение природы, интенсивности магнитного поля и увеличение интенсивности многополюсного поля, что приводит к частым инверсиям и внезапным спадам интенсивности биполярного поля. Электропроводность слоя D'' (G) рассчитывается по формуле

$$G = \int_{r_c}^{r_c + \delta} \sigma dr, \quad (1)$$

где σ — электропроводность мантии, δ — мощность слоя D'' и r_c — радиус границы кора—мантия. Согласно уравнению (A2), приведенному в [Holme, 1998], адвективный вращающий момент равен

$$\Gamma_z = r_c^4 G \int_0^{2\pi} \int_0^\pi [L^{-2} (\hat{r} \cdot \nabla_H \times B_r \dot{u})] \times \left(\frac{\partial B_r}{\partial \theta} \sin \theta + 2B_r \cos \theta \right) \sin \theta d\theta d\varphi, \quad (2)$$

где L — угловой момент, u — скорость потока в верхней части ядра, B_r — интенсивность магнитного поля.

Согласно [Holme, 1998], $|\Gamma_z|$ при значении $(1-5) \cdot 10^{17}$ Н·м намного превышает величину приливного трения ($\Gamma_M \sim 4.9 \cdot 10^{16}$ Н·м). На основе принципа сохранения момента количества движения в период, когда преобладает ЭМ взаимодействие кора—мантия, вращение мантии описывается следующим уравнением

$$\Gamma_z + \Gamma_r = (I + I_0) \frac{d\omega}{dt}, \quad (3)$$

где I — момент инерции слоя D'', а величина инерции остальной части мантии равна I_0 . Γ_r — демпфирующий момент (отрицательная величина) и, если предположить, что момент вращения пропорционален разности угловой скорости ω (с учетом закона Стокса), его можно записать в форме $\Gamma_r = -K\omega$, где K — постоянная величина. Подстановка уравнения (2) в уравнение (3) дает

$$\frac{d\omega}{dt} = -\omega \frac{2\pi r_c^4 G}{I(t) + I_0} \int_0^\pi \int_0^\theta B_r(\xi) d\xi \times \left(\frac{\partial B_r}{\partial \theta} \sin \theta + 2B_r \cos \theta \right) \sin \theta d\theta - \frac{K}{I(t) + I_0} \omega. \quad (4)$$

Если принять, что мощность слоя D'' растет по линейному закону, можно записать

$$\delta(t) = At + C, \quad (5)$$

где A и C — константы. Включение (5) в (4) дает

$$\omega = K_1 e^{\int \frac{1}{I(t) + I_0} [(\lambda_1 t^3 + \lambda_2 t^2 + \lambda_3 t)(-M) - K_2] dt}, \quad (6)$$

где $M = -2\pi r_c^4 \int_0^\pi B^2(r, t) \sin^2 \theta d\theta$, K_1 , K_2 , A_1 , A_2 и A_3 — константы, связанные с A , C и $\sigma(r)$.

Здесь мы выбрали точку $t = 0$ как начало процесса утолщения слоя D''. Учитывая, что $M < 0$, уравнение (6) указывает на предел мощности слоя D'' δ_c . Магнитная функция M отрицательная, поэтому полином $\lambda(t) = (\lambda_1 t^3 + \lambda_2 t^2 + \lambda_3 t)(-M) - K_2$ имеет, по крайней мере, один положительный корень t_c , который мы называем его критическим временем.

Критическое время соответствует критической мощности слоя D'', $\delta_c = At_c + C$. Когда $\delta(t) < \delta_c$, преобладает значение правой константы K_2 и угловая скорость уменьшается; когда $\delta(t) > \delta_c$, величина левого полинома преобладает и угловая скорость увеличивается.

Суть модели состоит в том, что когда слой D'' утолщается и становится горячее, значения δ и σ возрастают. Согласно уравнению (1), момент вращения при ЭМ взаимодействии увеличивается вследствие значительного повышения электропроводности слоя D'' (G). По достижении критической мощности δ_c демпфирующий момент приливного трения строго уравновешивается моментом вращения, создаваемым ЭМ взаимодействием. При мощности слоя более δ_c величина этого момента вращения превышает демпфирующий момент, что приводит к ускорению мантии.

Если допустить, что характеристики и температура слоя D'' перед образованием суперконтинента Пангея соответствовали его нынешним параметрам [Ohta et al., 2008] (< 300 км и 2500 — 3000 К), величина δ_c должна составлять ~ 350 км. Если мощность слоя D'' превысит это критическое значение, то произойдет ускорение вращения Земли, при этом магнитное поле Земли изменится с существенно биполярного к существенно многополярному [Ху, 2001], что, в свою очередь, приведет к частым магнитным инверсиям [Guyodo, Valet, 1999] и внезапным спадам интенсивности биполярного поля. Это ускорение вращения будет продолжаться до тех пор, пока мощность слоя D'' превышает пороговое значение, при этом будет сохраняться пониженная интенсивность биполярного магнитного поля. Поскольку ЭМ взаимодействие забирает энергию из магнитного поля, которое, в свою очередь, порождается тепловым потоком в ядре при длительном СМВ-взаимодействии [Stevenson, 2003], магнитное поле действует как среда-преобразователь энергии из теплового потока в ядре во вращательное ускорение. Наличие изменений в геомагнитном поле в период раннемезозойского ускорения решительно подтверждается многочисленными палеомагнитными свидетельствами: 1) частые магнитные инверсии в позднепермско-триасовое время [Szurlies, 2007]; при этом предполагается, что магнитное поле в период около рубежа пермь—триас (РТВ) имело многополярную природу [Heunemann et al., 2004]; 2) значительное снижение интенсивности магнитного поля около РТВ [Heunemann et al., 2004]; 3) существование устойчивого мезозойского минимума интенсивности геомагнитного поля со времени приблизительно 250 — 180 млн лет назад [Denis et al., 2002] (см. рис. 2, а).

Одним из возможных недостатков нашей модели можно считать соображение, что ускорение мантии должно сопровождаться значительным замедлением движения ядра для обеспечения сохранения углового момента. Однако это несоответствие можно объяснить перераспределением массы в пределах мантии посредством крупномасштабного лавинообразного перемещения вещества мантии, сопровождающегося образованием суперконтинента [Condie, 1998; Machetel, Thomassot, 2002], или даже перемещением вещества из СМВ в ядро [Muller, 2002]. Согласно одному из возможных сценариев [Machetel, Thomassot, 2002], лавинообразное перемещение вещества в мантии может достигнуть значения в 10^{22} кг, что составляет 2 % от общей массы мантии. Поскольку это вещество перемещается из верхней мантии, приходящийся на его долю угловой момент будет даже превышать 2 %, что достаточно для компенсации потери углового момента ядра, вызванной ускорением мантии.

Наконец, наш сценарий предполагает, что в процессе утолщения слой D'' становится нестабильным [Nikishin et al., 2002]. Отделяющийся из слоя D'' материал в форме мантийных плюмов поднимается к основанию литосферы [Storey et al., 1992], что, вероятно, является причиной глобального роста в этот временной интервал интенсивности вулканизма, связанного с мантийными плюмами [Kamo et al., 2003]. Зародившиеся под Пангеей мантийные плюмы при подъеме создавали растягивающие напряжения величиной до 100 МПа, которые в конечном итоге вызвали разрушение суперконтинента [Lowman, Jarvis, 1996]. При этом слой D'' перехватил часть теплового потока, поступающего из внутреннего ядра (~ 7 %). Возникла новая конфигурация конвекции, которая в итоге привела к растаскиванию Пангеи. В целом долговременное ЭМ взаимодействие кора—мантия можно рассматривать как альтернативный способ высвобождения тепла, когда традиционный вариант частично заблокирован. При ослаблении теплоизолирующего влияния Пангеи мощность слоя D'' уменьшилась ниже порогового значения, и вращение Земли снова начало замедляться под влиянием силы приливного трения. За всю историю Земли, вероятно, имели место несколько таких циклов.

ВЫВОДЫ

Традиционно считается, что вращение Земли со временем в целом замедляется из-за действия силы приливного трения, хотя последние наблюдения показали, что Земля испытывает и кратковременные ускорения (сезонные, с периодом раз в год и раз в десять лет). В этой работе описан механизм долговременного ускорения вращения Земли в раннем мезозое, основанный на новых данных, полученных при измерении суточных и годовых колец роста в окаменелостях. Это ускорение совпадает по времени с окончательным формированием и последующим быстрым распадом суперконтинента Пангея. На основе недавно опубликованной работы по механизму возникновения возмущений вращения Земли с десятилетним периодом и динамики взаимодействия на границе кора—мантия, мы предложили модель, объясняющую возможную причину мезозойского ускорения. Согласно этой модели, возможной причиной ускорения является электромагнитное взаимодействие, возникшее в результате утолщения слоя D'' на границе ядро—мантия после образования суперконтинента Пангея. Имеющиеся палеомагнитные свидетельства (интенсивность биполярного поля и смена природы биполярного-многополярного поля), а также палеовулканические данные, связанные с активностью мантийных плюмов, хорошо согласуются со сценарием событий, принятых в модели. Долговременное ускорение вращения Земли совпадает с тектоническими циклами Вильсона в истории Земли и согласуется с общей причиной, скрытой в глубинных недрах Земли.

Это исследование проливает свет на механизм возникновения ускорения вращения и подчеркивает важную роль динамических взаимодействий, существующих между различными слоями Земли, от глубинных геофизических процессов до поверхностных геологических процессов, таких как тектоника и магнитное поле. Данная работа представляет собой предварительное исследование, и ее следует рассматривать как попытку объяснения, а не как окончательное заключение. Дальнейшие исследования можно сосредоточить как на совершенствовании палеонтологических часов, так и на изучении динамики СМВ.

Финансовая поддержка для выполнения данного исследования оказана Национальным фондом естественных наук Китая (грант 40572004).

Авторы благодарны д-ру Сонгу Х.Д. (Университет шт. Иллинойс) и д-ру Нью Ф.Л. (Райсовский университет) за подробную аннотацию и комментарии к статье.

ЛИТЕРАТУРА

Berry W.B.N., Barker R.M. Fossil bivalve shells indicate longer month and year in Cretaceous than present // *Nature*, 1968, v. 217, p. 938—939.

Cadek O., Kyvalova H., Yuen D.A. Geodynamical implications from the correlation of surface geology and seismic tomographic structure // *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 1995, v. 136, p. 615—627.

Chen T.R., Yu K.F., Shi Q., Price G.J., Wang R., Zhao M.X., Chen T.G., Zhao J.X. Twenty-five years of change in scleractinian coral communities of Daya Bay (northern South China Sea) and its response to the 2008 AD extreme cold climate event // *Chin. Sci. Bull.*, 2009, v. 54 (12), p. 2107—2117.

Clark G.R. Growth lines in invertebrate skeletons // *Annu. Rev. Earth. Pl. Sc.*, 1974, v. 2, p. 77—99.

Clark II G.R. Daily growth lines in some living Pectens (Mollusca: Bivalvia), and some applications in a fossil relative: time and tide will tell // *Palaeogeogr. Palaeoclimatol.*, 2005, v. 228, p. 26—42.

Condie K.C. Episodic continental growth and supercontinents: a mantle avalanche connection? // *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 1998, v. 163, p. 97—108.

- Courtilot V., Olson P.** Mantle plumes link magnetic superchrons to Phanerozoic mass depletion events // *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 2007, v. 260, p. 495—504.
- Denis C., Schreider A.A., Varga P., Za'voti J.** Despinning of the Earth rotation in the geological past and geomagnetic paleointensities // *J. Geodyn.*, 2002, v. 34, p. 667—685.
- Gould S.J.** Time's vastness. *Nat. Hist.*, 1979, v. 88 (4), p. 18—27.
- Gurnis M.** Large-scale mantle convection and the aggregation and dispersal of supercontinents // *Nature*, 1988, v. 332, p. 695—699.
- Guyodo Y., Valet J.P.** Global changes in intensity of the Earth's magnetic field during the past 800 kyr // *Nature*, 1999, v. 399, p. 249—252.
- Heunemann C., Krasa D., Soffel H.C., Gurevitch E., Gurevitch V.** Bachtadse, directions and intensities of the Earth's magnetic field during a reversal: results from the Permo-Triassic Siberian trap basalts, Russia // *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 2004, v. 218, p. 197—213.
- Hide R., Boggs D.H., Dickey J.O.** Angular momentum fluctuations within the Earth's liquid core & torsional oscillations of the core-mantle // *Geophys. J. Int.*, 2000, v. 143, p. 777—786.
- Holme R.** Electromagnetic core-mantle coupling—I. Explaining decadal changes in the length of day // *Geophys. J. Int.*, 1998, v. 132, p. 167—180.
- Johnson G.A.L., Nudds J.R.** Carboniferous coral geochronometers / Eds. G.D. Rosenberg, S.K. Run-corn. Growth rhythms and the history of the Earth's rotation, 1975, p. 27—41, John Wiley, London.
- Kamo S.L., Czamanske G.K., Amelin Y., Fedorenko V.A., Davis D.W., Trofimov V.R.** Rapid eruption of Siberian flood-volcanic rocks and evidence for coincidence with the Permian-Triassic boundary and mass extinction at 251 Ma // *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 2003, v. 214, p. 75—91.
- Knutson D.W., Buddemeier R.W., Smith S.V.** Coral chronometers: seasonal growth bands in reef corals // *Sci.*, 1972, v. 177 (4045), p. 270—272.
- Lay T., Williams Q., Garnero E.J.** The core-mantle boundary layer and deep Earth dynamics // *Nature*, 1998, v. 392, p. 461—468.
- Levy L., Appelbaum L., Leggat W., Gothlif Y., Hayward D.C., Miller D.J., Hoegh-Guldberg O.** Light-Responsive Cryptochromes from a Simple Multicellular Animal, the Coral *Acropora millepora* // *Science*, 2007, v. 318, p. 467—470.
- Loper D.E., McCartney K., Buyzna G.** A model of correlated episodicity in magnetic field reversals, climate and mass extinctions // *J. Geol.*, 1988, v. 96, p. 1—15.
- Lowman J.P., Jarvis G.T.** Continental collisions in wide aspect ratio and high Rayleigh number two-dimensional mantle convection models // *J. Geophys. Res.*, 1996, v. 101, p. 25485.
- Machetel P., Thomassot E.** Cretaceous length of day perturbation by mantle avalanche // *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 2002, v. 202, p. 379—386.
- Mazzullo S.** Length of the year during the Silurian and Devonian Periods: new values // *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1971, v. 82, p. 1085—1086.
- Moya A., Tambutté S., Tambutté E., Zoccola D., Caminiti N., Allemand D.** Study of calcification during a daily cycle of the coral *Stylophora pistillata*: implications for 'light-enhanced calcification' // *J. Exp. Biol.*, 2006, v. 209, p. 3413—3419.
- Muller R.A.** Avalanches at the core-mantle boundary // *Geophys. Res. Lett.*, 2002, v. 29, p. 41.1—41.4.
- Nikishin A.M., Ziegler P.A., Abbott D., Brunet M.F., Cloetingh S.** Permo-Triassic intraplate magmatism and rifting in Eurasia: implications for mantle plumes and mantle dynamics // *Tectonophysics*, 2002, v. 351, p. 3—39.
- Ohno T.** Palaeotidal characteristics determined by micro-growth patterns in bivalves // *Palaeontology*, 1989, v. 32, p. 237—263.
- Ohta K., Onoda S., Hirose K., Sinmyo R., Shimizu K., Sata N., Ohishi Y., Yasuhara A.** The electrical conductivity of post-perovskite in Earth's D" Layer // *Science*, 2008, v. 320, p. 89—91.
- Pannella G.** Paleontological evidence on the Earth rotational history since Early Cambrian // *Astrophys. Space Sci.*, 1972, v. 16, p. 212—237.
- Pannella G., MacClintock C., Thompson M.** Paleontologic evidence of variations in length of synodic month since late Cambrian // *Science*, 1968, v. 162, p. 792—796.
- Qu Y.G., Xie G.W., Gong Y.M.** Relationship among the Earth-Sun-Moon System before 1000 Ma ago: evidence from the stromatolites // *Chin. Sci. Bull.*, 2004, v. 49, p. 2083—2089.
- Richardson C.A., Peharda M., Kennedy H.** Age, growth rate and season of recruitment of *Pinna nobilis* (L) in the Croatian Adriatic determined from Mg:Ca and Sr:Ca shell profiles // *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 2004, v. 299, p. 1—16.

Scrutton C.T. Periodicity in Devonian coral growth // *Palaeontology*, 1964, v. 7, p. 552—558.

Scrutton C.T. Tidal friction and the earth's rotation 1978: periodic growth features in fossil organisms and the length of the day and month // Eds. P. Brosche, J. Sundermann. 1978, p. 154—196 (Springer-Verlag, New York).

Stevenson D.J. Planetary magnetic fields // *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 2003, v. 208, p. 1—11.

Storey B.C., Alabaster T., Hole M.J., Pankhurst R.J., Wever H.E. Role of subduction-plate boundary forces during the initial stage of Gondwana break-up: evidence from the proto-Pacific margin of Antarctica // *Geol. Soc., Lond, Spec. Publ.*, 1992, v. 68, p. 149—163.

Szurliés M. Latest Permian to Middle Triassic cyclo-magnetostratigraphy from the Central European Basin, Germany: implications for the geomagnetic polarity timescale // *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 2007, v. 261, p. 602—619.

Vanyo J.P., Awramik S.M. Stromatolites and Earth-Sun-Moon Dynamics // *Precambrian. Res.*, 1985, v. 29, p. 121—142.

Wells J.W. Coral growth and geochronometry // *Nature*, 1963, v. 197, p. 948—950.

Williams G.E.J. Geological constraints on the Precambrian history of Earth's rotation and the Moon's orbit // *Rev. Geophys.*, 2000, v. 38, p. 37—59.

Xu W.Y. Distribution of geomagnetic energy in the Earth's interior and its secular variation // *Chinese J. Geophys.*, 2001, v. 44 (6), p. 747—753.

Zhao Z.Y., Zhou Y.Q., Ji G.S. The periodic growth increments of biological shells and the orbital parameters of Earth-Moon system // *Environ. Geol.*, 2007, v. 51, p. 1271—1277.

Zhang W.J., Li Z., Lei Y. Experimental measurement of growth patterns on fossil corals: secular variation in ancient Earth-Sun distances // *Chin. Sci. Bull.*, 2010, v. 55, № 35, p. 4010—4017.

Рекомендована к печати 15 июля 2011 г.

А.Д. Дучковым

Поступила в редакцию

15 сентября 2010 г.