

РОТАЦИОННЫЕ СТРУКТУРЫ В ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИСТОРИИ ЗЕМЛИ

Земцов В. А.

Институт геологии Карельского НЦ РАН, г. Петрозаводск,

ROTATION STRUCTURES IN THE EARTH'S GEOLOGICAL HISTORY.

Zemtsov V. A.

zemtsov@krc.karelia.ru

The rotation of the Earth as a first-order tectono-dynamic structure is the primary property of our planet. The rotational regime and shape of the Earth have varied substantially during its geological evolution (Zemtsov, 2007). The angular rotation velocities (ARV) of the Earth's second-order solid shells, particularly the mantle and the inner core, vary with time. In plate tectonics, the effects of the rotation of the whole Earth and the lithosphere are generally disregarded, and essential geodynamic processes have not been discussed in this context until recently. Evaluations of the instantaneous ARV values of some of Eurasian domains, based on GPS-networks, help better understand the structural hierarchy of the Earth and interaction between its global structures and the main reason for the generation, growth and disintegration of supercontinents in geological (Zemtsov, 2007, 2009) history. The rotation anomalies and energies of first- and second-order tectono-dynamic structures were analyzed theoretically on the basis of the modern structure of the Earth and its rotation evolution in geological time. Long-term anomalies in the Earth's rotation period in Palaeozoic and Precambrian time were shown to correlate with considerable variations in the Earth's magnetic moment values (VDM), known from the global palaeointensity database and from known Earth's magmatic activity cycles. There were not less than four such cycles in the Earth's Proterozoic history. For the time being it is impossible to trace in detail variations in VDM and T in Precambrian time because reliable data are scarce. Of practical importance is the fact that even small-scale "retardation" periods in the Earth's rotation, recorded over the past century, correspond to its highest seismic activity events. These global processes undoubtedly took place also in the geological past. The number of days in ancient years was estimated using "fossil clocks"- the number of the growth rings of fossils. Thus, in early Phanerozoic time the Earth's rotation period was 3 ± 1 h shorter than the present one. The rotation and retardation energies of the present mantle over the last 550 Ma have been calculated. Part of the tremendous energy (5×10^{27} J) could be one of the sources of generation of the main geomagnetic field (Zemtsov, 2010). The energy of modern variations in the Earth's rotation is much greater than that of all earthquakes. Therefore, even minor increases in the Earth's rotation period (of the order of 2 ms), revealed over the last 100 years, have resulted in the most powerful earthquakes. The historical retardation of the Earth's rotation seems to be related to the evolution of the lunar orbit. Satellite data show that its modern radius increases by 3.82 ± 0.07 cm/year. The direct reason for variation in the Earth's rotation period and its increase with geological time is oceanic tidal friction, which arises under the influence of lunar attraction, i.e. mainly tidal north-south M_2 -wave. The effect of the Earth's own rotation on the drift of continents as third-order structures was discussed by the author in 2006-2007 publications. Available models show that as the actual ARV are very small, the rotation energy of the assumed supercontinent is millions of times smaller than the mantle retardation energy by tidal forces, and it can be neglected.

Исследования поведения магнитного момента Земли или палеонапряженности, частоты инверсий и других характеристик геомагнитного поля в далеком прошлом могли бы послужить основой для определения времён глобальных космических и внутриземных процессов. Однако в науках о Земле на многих международных конференциях до сих пор продолжают дебаты по поводу того, существуют ли какие-либо взаимосвязи между эндогенными и космическими процессами? За последние несколько лет в Геофизической обсерватории ИФЗ РАН группой, руководимой В.В. Щербаковой, была создана мировая база данных по палеонапряженности (global IAGA Paleointensity Database – IPD) и получено много

новых достоверных данных по величинам магнитного момента Земли (VDM) с описанием степени достоверности каждого определения. База доступна на сайте: ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/Solid_Earth/Paleomag/access/ver3.5/access2000/PI_NT00.MDB. В ней собрано около 3900 значений VDM и несколько больше значений палеонапряженности геомагнитного поля, начиная с 3 млрд лет до современности, но большинство полученных данных сосредоточено в интервале последних 100 млн лет. Это стимулирует постановку палеомагнитных исследований на древнейших объектах. Изучая напряженность геомагнитного поля в геологическом прошлом, можно получить новые данные по эволюции Земли, времени образо-

вания внутреннего ядра и т.д. В одной из моделей остывания Земли ее внутреннее ядро могло быть моложе, чем это предполагалось ранее (Labrosse et al., 2001). Очевидно, для тестирования этой и других альтернативных гипотез необходимо иметь достаточно большой объем данных о напряженности геомагнитного поля палеоархея-протерозоя. Но для этого интервала геологической истории, продолжительностью около 3 млрд лет, имеется чуть более 30 определений напряженности, отвечающих современным критериям надежности. Несколько таких определений выполнено нами по проекту INTAS 03-51-5807 на объектах Фенноскандинавского щита: салминской свиты и Ропручейского силла (Pavlov et al., 2004; Щербакова, Павлов и др., 2006).

Интересная гипотеза о периодическом изменении радиуса лунной орбиты и приливных сил в фанерозое была предложена Ю.Н. Авсюком (1993). Под действием переменных приливных сил Земля также должна была бы вращаться то быстрее, то медленнее. В случае справедливости этой гипотезы эффекты торможения и ускорения вращения Земли могли бы выражаться и в поведении главного геомагнитного поля, и в фазах складчатости. Изменения палеонапряженности, частота инверсий геомагнитного поля и циклы Бертрана были сопоставлены с фазами вариаций радиуса лунной орбиты по Авсюку, но никаких значимых корреляций обнаружено не было (Kurazhkovskii et al., 2008), хотя в этой же работе был сделан вывод о связи средней палеонапряженности с вулканической активностью Земли. Кроме того, основное предположение Авсюка противоречит гипотезам образования Луны: как – мегаимпакта (Жарков, 2003), так и – гравитационного захвата Луны на земную орбиту (Malcuit et al., 1992; Zemtsov, 2007), а также астрономическим наблюдениям о постоянстве угла наклона оси вращения Земли к эклиптике (Щеглов, 1974; Zharkov et al., 1996; Жарков, 2003). По-видимому, эволюция лунной орбиты со времени её образования не подчинялась периодическому закону, а имела более сложный характер.

В геодезии и астрономии за угловую скорость вращения поверхности Земли принимается один полный оборот нулевого меридиана – Гринвича. Если период его обращения или астрономические сутки измерять в солнечных секундах – $T=86164.09891$ с, то получим среднее значение угловой скорости вращения земной поверхности (ω):

$$\omega = 2\pi/T \approx 7.29115 \times 10^{-5} \text{ [с}^{-1}\text{]}. \quad (1)$$

По космическим данным радиус лунной орбиты в настоящее время возрастает на 3.82 ± 0.07 см/год (Dickey et al., 1994), что должно приводить к уменьшению скорости вращения Земли. Вековое замедление вращения Земли ($d\omega/dt = -6.07 \times 10^{-22} \text{ с}^{-2}$), ранее теоретически прогнозированное (Christodoulis et al., 1988), почти не отли-

чается от рассчитанного по спутниковым данным (Жарков, 2003). Отсюда, можно оценить вектор ω древней Земли, считая замедление ее вращения линейным. Получается, что за каждые 100 млн лет он уменьшался примерно на $0.2 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$, т.е. 550 млн лет тому назад астрономические сутки или период вращения Земли (T) в конце неопротерозоя, возможно, был короче современного примерно на 3.5 часа, а угловая скорость вращения планеты могла достигать $\omega = 8.34 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ (Земцов, 2009а). Астрономы измеряют T очень точно. В течение прошедшего столетия T или LOD (the length of the day) увеличился в целом примерно на 0.002 с, но на этом фоне выделяются 2-3 аномалии LOD, достигающие 0.004 с, связанные с замедлением вращения Земли. Эти флуктуации создают некоторое снижение вращательной энергии планеты и соответствуют интервалам повышения глобальной сейсмической активности Земли (рис. 1). Кроме того, в работе (Varga et al., 2004) показано, что вращательная энергия Земли является главной внутренней компонентой, а её годовые вариации примерно в 2 раза превосходят годовую энергию всех землетрясений. Авторы пришли к выводу, что «...сейсмическое событие, даже самое мощное не способно повлиять на скорость вращения Земли. Вариации в скорости вращения вызывают стресс, обусловленный соответствующими сглаживающими вариациями, и который связан с широтным распределением сейсмичности и сейсмической энергии. Вероятно, сейсмичность не может генерировать аномалии LOD» (Р. 120). Напротив, LOD или T вариации влияют на сейсмическую активность планеты. В этом плане весьма интересно, что непосредственно после мощного события может последовать едва заметное ускорение вращения Земли. Так, по данным NASA от 3.03.2010 после землетрясения силой 8,8 по шкале Рихтера, случившегося 27 февраля 2010 г в океане у побережья Чили, произошел сдвиг земной коры, который привел к уменьшению T на 1.26×10^{-6} с. По данным наблюдений «быстрее всего Земля вращалась в 1870 г, когда длительность суток была на 0.003 с короче эталонных, а медленнее всего – в 1903 г» (Сидоренков, 2004). Автор также отмечает, что «скорость вращения Земли бывает наименьшей в апреле и ноябре, а наибольшей – в январе и июле. Январский максимум значительно меньше июльского... Причину этой нестабильности следует искать в механизмах вращения Земли». Отсюда, представляется весьма актуальным регистрировать значительные нерегулярные флуктуации T , имеющие длительность порядка 20 и более лет (см. рис.1), с целью вероятного долгосрочного прогноза интервалов самых мощных землетрясений, а также попытаться определить времена аномального увеличения T в геологической истории как эпох наивысшей палеосейсмичности Земли.

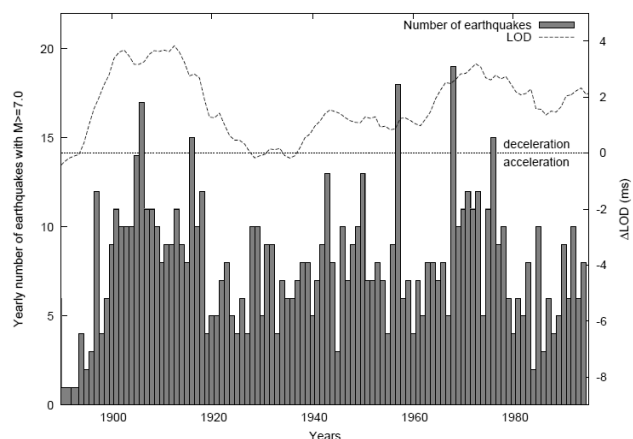


Рис. 1. Вариации продолжительности земных суток (LOD) и годовое число сейсмических событий с магнитудой $M > 7$ в течение 20-го столетия по П. Варга и др. (Varga et al., 2004).

Fig. 1. Variations in day length (LOD) and annual number of seismic events $M > 7$ during the 20-th century, after Varga et al., 2004.

Ротационным явлениям в науках о Земле уделяется недостаточное внимание. В тектонике плит и в плюм-тектонике эффекты, связанные с вращением Земли и её литосферы, не принимаются во внимание. Оказывают ли эти глобальные процессы глубинную геодинамику и тектонику? По мнению В.Е. Хаина в тектонике плит «ряд важнейших геодинамических процессов остался вне рассмотрения» (Хайн, 1994). В последние десятилетия появились новые представления о глобальной тектонике: тектоника плюмов, горячих точек и сдвиговая тектоника (Зоненшайн, Кузьмин, 1993; Fukao et al., 2003; Добрецов и др., 2001; Storetvedt, 2003; Павленкова, 2004). Опираясь на достоверные физические явления и палеомагнитные данные, используя идею М.А. Садовского об иерархическом строении геофизической среды и понимая отдельный континент как структуру третьего порядка, в статьях (Zemtsov, 2005; Земцов, 2006; Земцов и др., 2006; Zemtsov, 2007) рассматривались упрощенные модели механического вращения континентов, расположенных в Северном и Южном полушариях. Первая такая модель обсуждалась на 32-м Международном геологическом конгрессе (Zemtsov, 2004). В дальнейшем на примере современной Евразии и древних литосферных блоков, слагающих ее, был сделан анализ закономерностей вращения континентов, затормаживающих вращения мантии (Земцов, 2009а), но энергетические аспекты взаимодействия континентальной литосферы и мантии в этой работе оценены не были, т.е. причины изменения T и распада суперконтинентов пока остаются не совсем определенными. В кратком виде эти проблемы обсуждались на 8-й Международной конференции “Problems of Geocosmos” (Zemtsov, 2010).

Вращение Земли, ее современное строение и энергетика

Собственное вращение Земли, как и многих других планет и звезд, есть одно из главных физических свойств этого тела. Форма Земли и ее ротационный режим в геологической истории, вероятно, существенно изменялись (Zharkov et al., 1996; Земцов, 2006; Zemtsov, 2007; Земцов, 2009). Главное из таких событий, согласно представлениям Роберта Малкуита с соавторами, возможно, было связано с гравитационным захватом Луны около 3.9 млрд лет тому назад (Malcuit et al., 1992). Если рассматривать ее целиком, – как однородное тело первого иерархического уровня по М.А. Садовскому, то вращение Земли можно было бы характеризовать определенной угловой скоростью. На втором уровне вопрос о том, какова угловая скорость вращения Земли, становится физически некорректным. Существует, по крайней мере, несколько угловых скоростей различных оболочек Земли (рис. 2).

Предшествующие геофизические модели не отражали динамики вращения Земли. На них отсутствовал внешний слой, без которого понимание эволюции и энергетики планеты становится не совсем корректным.

Во внешнем ядре Земли (слое E) относительные скорости долготных течений достигают 1×10^{-3} м/с и более (Жарков, 1983; Starchenko, 2000; Жарков, 2003). Эти скорости в миллионы раз больше скоростей тектонических движений. Линейные скорости движения внешнего ядра Земли (V) на границах СМВ и ИСВ (см. рис. 2) могут быть оценены из дифференциальных уравнений магнитной гидродинамики в Архимедовом тепловом слое известной мощности. Рассматривая эти скорости как некий тепловой ветер, С.В. Старченко оценил скорость течения на границе СМВ: $V \approx 4 \times 10^{-3}$ м/с (Starchenko, 2000). Если бы поток в жидком ядре был ламинарным, то возникло бы проскальзывание ядра относительно мантии со скачком угловой скорости (Земцов, 2006):

$$\Delta\omega = V/r \approx 1 \times 10^{-9} [c^{-1}], \quad (2)$$

где r – радиус ядра.

Положительная скорость потока в жидком ядре относительно нижней мантии однозначно свидетельствует о еще большей скорости потока на поверхности твердого ядра и о том, что внутреннее ядро имеет большую угловую скорость вращения по сравнению со скоростью вращения мантии (ω_D). Расчеты, выполненные магнитологами, показывают, что прибавка угловой скорости за счет быстро вращающегося ядра (число Росби), может достигать $\Delta\omega \leq 1 \times 10^{-5} c^{-1}$, хотя для генерации планетарного магнитного поля предельная скорость вращения внутреннего ядра не требуется (Braginsky, Roberts, 1995; Glatzmaier, Roberts, 1995; Земцов, 2006). Положительная разница в угловых скоростях вращения внутреннего ядра и мантии является характерной особенностью планет и звезд, обладающих собственным магнитным полем, и подтверждена экспериментально сейсмологическими наблюдениями (Song, Richards, 1996; Жарков, 2003).

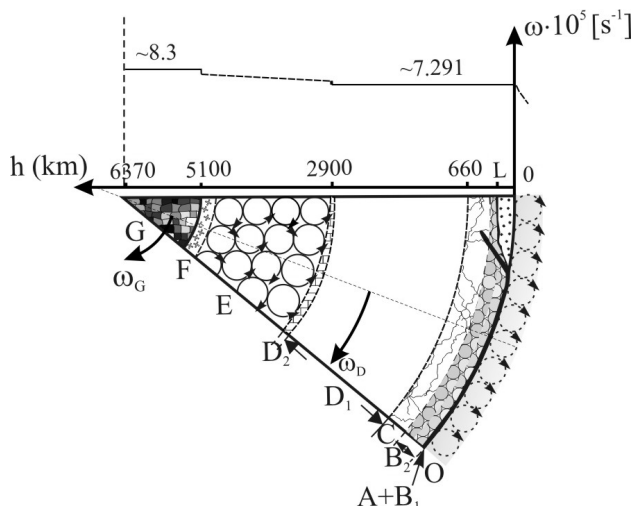


Рис. 2. Разрез оболочек и разделов Земли А-О (Zemtsov 2007) по геофизическим данным с использованием моделей (Dziewonski, Anderson, 1981; Жарков, 1983; Starchenko, 2000; Добрецов, 2001; Zemtsov, 2005) в экваториальной плоскости со стороны Южного полюса и график изменения угловых скоростей их вращения ω с глубиной h . Векторы ω показаны условно, они совпадают с направлениями линейных скоростей.

A – земная кора; B₁ – подкорковая мантия; A+B₁ – литосфера: континентальная (точки), и океаническая (заливка черная); L (220 км) – граница Леман; B₂ – верхняя астеносфера (серые кружки на черном фоне); C – нижняя астеносфера (крэк); B+C – верхняя мантия; D₁ – нижняя мантия (белое); D₂ (CMB) – переходная зона, граница Гутенберга (кирпичи); E – внешнее ядро (вихри); F (ICB) – переходная зона (крестики); G – внутреннее ядро (заливка – каменная стена); O – внешний слой (заливка серая).

Fig. 2. Cross-section through the Earth's shells and divisions A-O after V.A. Zemtsov (2007), based on geophysical data (using the publications of Dobretsov et al., 2001; Dziewonski & Anderson, 1981; Starchenko, 2000; Zemtsov, 2005; Zharkov, 1986), in the equatorial plane on the South Pole side and a plot of variations in their angular rotation velocities ω , with depth, h (km). The ω vectors are shown arbitrarily as if they coincide with the linear velocity directions.

A – the Earth's crust; B₁ – subcrustal mantle; A+B₁ – lithosphere: continental (dots) and oceanic (black); L (220 km) – Lehmann's boundary; B₂ – upper asthenosphere (small grey circles against black background); C – lower asthenosphere (crack); B+C – upper mantle; D₁ – lower mantle (white); D₂ (CMB) – transition zone, Gutenberg's boundary (bricks); E – outer core (whirls); F (ICB) – transition zone (small crosses); G – inner core (stone wall); O – outer layer (grey whirls).

Очевидно, что высокоскоростное собственное вращение Земли, как тектоно-динамической структуры 1-го порядка, вращающейся с угловой скоростью ω , должно обладать большой энергией (E), которую можно оценить по известной в физике формуле:

$$E = \frac{\omega^2}{2} \cdot J, \tag{3}$$

где J – момент инерции Земли.

При этом надо учесть, что Земля не является абсолютно твёрдым телом, поэтому безразмерный момент инерции для неё меньше 0.4 и равен 0.3308. Кроме того, известное сжатие Земли с полюсов, напротив, несколько увеличивает расчетный момент инерции, поэтому в модели PREM $J=8.0391 \times 10^{37}$ кгм² (Dziewonski, Anderson, 1981). В последующие годы геофизики лишь подтвердили точность этого расчета полярного момента инерции Земли, но и получили значение момента инерции для земной мантии $J=7.04 \times 10^{37}$ кгм² (Мориц, Мюллер, 1992). Естественно, что для оценок моментов инерции структур 2-го порядка необходимо знать их массы, а массу всей Земли в дальнейшем можно принять равной 6×10^{24} кг (рис. 3). Момент инерции внутреннего ядра можно считать по формуле для однородного твердого шара радиуса r: $J=0.4mr^2$, но при оценке энергии внутреннего ядра приходится брать предполагаемую ω . По последним данным момент инерции внутреннего и внешнего ядра стал известен (Жаров, в печати). Ещё сложнее оценить энергию вращения всего ядра, поскольку для него неизвестен и безразмерный момент инерции, т.к. внешнее ядро находится в полужидком состоянии. Проведенные оценки энергетики вращений некоторых структур Земли приведены ниже в таблице, где для сравнения учитываются известные данные по другим видам энергий и их годовых вариаций.

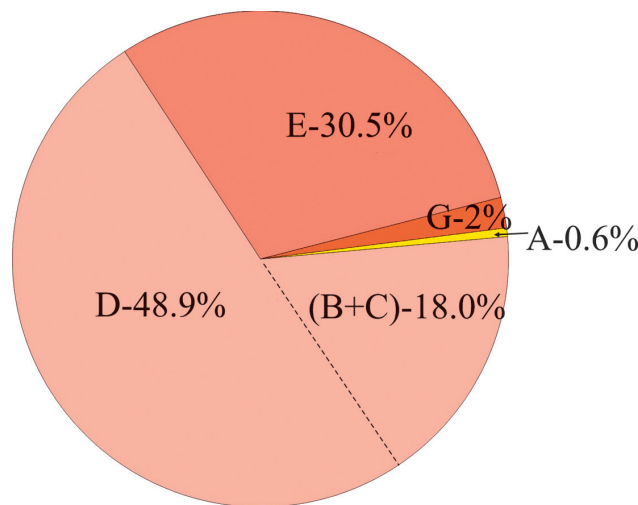


Рис. 3. Соотношение масс главных разделов Земли по данным (Allegre et al., 1995; Добрецов и др., 2001). Условные обозначения см. на рис. 2.

Fig. 3. The relative masses of the main Earth's layers (using the publications of Allegre et al., 1995; Dobretsov et al., 2001, in Russian). Captions, see fig. 2.

Из таблицы следует, что даже небольшие флуктуации в скорости вращения Земли обладают огромной энергией, которая превышает суммарную энергию всех землетрясений и всех тектоно-магматических процессов вместе взятых. Годовые флуктуации в энергии вращения мантии

Таблица. Виды и годовые вариации энергий Земли по П. Варга и др. (2004) с уточнениями и дополнениями (курсив)
 Table. The Earth's energy budget (after P. Varga et al., 2004) with more precise definitions and addenda (in italics)

Годовые вариации энергий, (Дж/год)	Некоторые виды энергий, (Дж)
Получаемая солнечная энергия – 2.1×10^{24}	вращения Земли – 2.13×10^{29}
Атмосферные циркуляции – 6.3×10^{22}	вращения мантии – 1.9×10^{29}
Потери теплового потока – 1.0×10^{21}	вращения внешнего ядра – 3×10^{28} (?)
Океанские циркуляции – 3.2×10^{19}	вращения внутреннего ядра 2.04×10^{26}
Энергия вращения мантии – 1.6×10^{19}	вращения коры – 2.2×10^{27}
Энергия землетрясений – 9.5×10^{18}	главного геомагнитного поля – 8×10^{22}
Вулканическая энергия – 2.0×10^{18}	локального геомагнитного поля – 4×10^{18}
Энергия плюмов – 7.6×10^{15}	
Энергия геомагнитных бурь – 3.2×10^{15}	

по величине сопоставимы с энергетикой океанских циркуляций. Следовательно, они могут нарушать эту циркуляцию, что неизбежно должно приводить к глобальным климатическим изменениям. Предполагаемые взаимосвязи наблюдаемых флуктуаций T с изменениями климата рассматриваются в работе (Сидоренков, 2004).

Аномалии периода вращения и магнитного момента Земли в геологической истории

Вековое замедление вращения Земли имело место и в геологическом прошлом. Одна из первых попыток корреляции геомагнитных инверсий в фанерозое с замедлением вращения Земли была сделана с использованием «ископаемых часов» ещё в 1975 году (Creer, 1975). Оказалось, что оценить количество дней в году в геологическом прошлом, можно, подсчитывая кольца роста в ископаемых раковинах. Уже в этой работе было установлено общее долгосрочное планетарное замедление вращения Земли в палеозое. Автор попытался связать этот факт с расширением Земли, что не вполне очевидно. В мезозое такое замедление не было однозначно установлено. По другим

данным (Williams, 1989), мезозой, напротив, характеризовался некоторым незначительным возрастанием скорости вращения планеты (Storetvedt, 2010). П. Варга обобщил все имевшиеся данные по «ископаемым часам» в геологическом прошлом (Varga, 1996; Жарков, 2003). В фанерозое рост периода вращения Земли (T) был близок к линейному (рис. 4) и соответствовал значению $d\omega/dt$, полученному по космическим данным (Zemtsov, 2008; Земцов, 2009а). На его рубеже, 550 млн лет тому T был короче современного на 3 ± 1 часа, а угловая скорость вращения земной мантии – на 14% больше – $\omega = 8.34 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$, т.е. могла превосходить соответствующее значение для внутреннего ядра (Земцов, 2009а,б). В таком случае генерация геомагнитного поля становится невозможной.

Допуская, что радиус ядра в течение фанерозоя оставался постоянным, можно оценить среднюю энергию торможения мантии за весь фанерозой (ΔE), используя известную в теоретической механике формулу для момента инерции (J) поллой сферы с радиусами Земли (R_E) и ядра (R_C) (Земцов, 2009б; Zemtsov, 2010):

$$\Delta E = -\frac{\Delta \omega^2}{2} \cdot J = -\frac{\Delta \omega^2}{2} \cdot \frac{2}{5} m \frac{R_E^5 - R_C^5}{R_E^3 - R_C^3} \approx -0.5 \cdot 10^{28} \text{ Дж}, \quad (4)$$

где $\Delta \omega \approx 1 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ – уменьшение угловой скорости вращения мантии в фанерозое; $m \approx 4 \times 10^{24} \text{ кг}$ – масса мантии.

Часть этой колоссальной энергии диссипации могла служить одним из источников для генерации главного геомагнитного поля в фанерозое. Зная его продолжительность, получим, что мощность возможного дополнительного источника энергии на границе СМВ могла достигать $\approx 0.3 \cdot 10^{12} \text{ Вт}$, а известная мощность современного динамо $10^9 \div 10^{12} \text{ Вт}$. Однако какая часть энергии торможения мантии могла поглощаться ядром, неизвестно.

При более детальном рассмотрении кривой T можно видеть, что она имеет нелинейный квазипериодический характер. В частности, в интервале от 350 до 200 млн лет (верхнего девона – нижней юры) замедление вращения Земли происходило значительно быстрее, чем в начале и, особенно, в конце фанерозоя. Уменьшение значений

VDM в том же интервале прямо пропорционально увеличению T (LOD), но запаздывает, примерно на 100 млн лет относительно уменьшения ω мантии. Кроме того, начало резкого торможения мантии в конце нижнего девона, примерно 400 млн лет тому назад должно было сопровождаться резким пиком в $\Delta \omega$ между внутренним ядром и мантией, что вполне логично объясняет как сам этот пик, так и запаздывание падения значений VDM во времени. Следовательно, неопределённая часть энергии торможения мантии всё же поглощается ядром, хотя большей она быть не может, т.к. согласно таблице энергия вращения ядра очень мала по сравнению с энергией вращения мантии. Вероятно, большая часть энергии палеозойского торможения мантии расходовалась на перестройку геоида, океанские циркуляции, ано-

мально высокую сейсмичность, тектонику, магматизм и пр. Палеосейсмичность в интервале 400-300 млн лет можно косвенно оценить. В течение 100 млн лет, согласно рис. 4, увеличение LOD было примерно 1.5 часа. Отсюда, на каждые 100 лет увеличение LOD тогда было примерно 5.5 мс, а за последнее столетие около 2 мс. Можно предположить, что 10-ти балльные землетрясения в верхнем палеозое были рядовыми событиями.

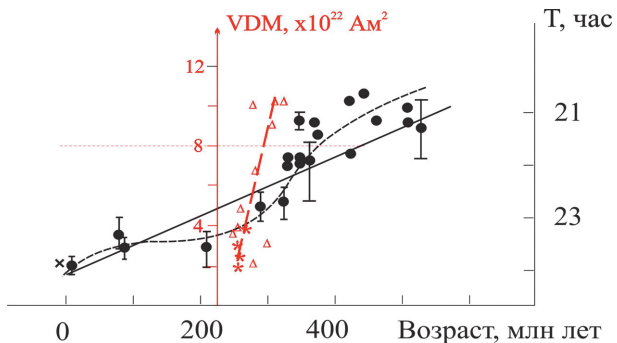


Рис. 4. Изменение периода вращения Земли (Т) в фанерозое по (Varga, 1996; Жарков, 2003; Zemtsov, 2010) и палеозойские аномалии Т и VDM в интервале карбон-триас.

Средние значения Т – залитые кружки; значения VDM – треугольники и звездочки по Щербаковой, Щербакову и др., 2006. Вертикальными отрезками обозначены ошибки определений Т. Современное значение VDM (примерно – $8 \times 10^{22} \text{ Am}^2$) – красный пунктир.

Fig. 4. Estimation of the Phanerozoic Earth's rotation period (T) after Varga, 1996; Zharkov, 2003 (in Russian); Zemtsov, 2010, and T-, VDM-anomalies in the Carboniferous-Triassic interval.

Filled circles are the average T values; red triangles and stars are the VDM values (after Shcherbakova, Shcherbakov et al., 2006, in Russian); vertical segments are estimation errors T; red dotted line is the modern VDM value (approximately $8 \times 10^{22} \text{ Am}^2$).

Основная причина векового замедления вращения мантии связана с хорошо известным приливным трением океанской меридиональной волны M_2 , которая примерно 2 раза в сутки с востока на запад накатывается на берега континентов и островов. Известные оценки величин мощности диссипации общей приливной энергии в фанерозое колеблются в пределах $-(0.34 \div 4.5) \times 10^{12} \text{ Вт}$. Как ни странно, в интересующее нас время (350-150 млн лет) на рис. 5 моделируются и наименьшие значения энергии приливов, и пониженные скорости роста радиуса лунной орбиты во времени, несмотря на то, что Луна была ближе к Земле примерно на 4000 км. Важно, что величины энергии такого трения в геологической истории зависели не только от периметра суши, противостоявшей этой волне в основном в области тропических широт ($\pm 30^\circ$), но и от высоты волны, которая определялась силой лунного притяжения, грубо, – обратно пропорционального кубу расстояния между центрами системы Земля-Луна (Земцов, 2009б). На ру-

беже фанерозоя Гондвана располагалась в полярной области Южного полушария, где мощность энергии океанских приливов наименьшая, но поскольку радиус лунной орбиты был примерно на 12000 км меньше (см. рис.5), то и высота океанских приливов должна была быть значительно больше. В палеопротерозое, например, суши на Земле было меньше, но максимальная амплитуда приливной волны могла быть в десять раз больше современной. Возможно, существовали и другие факторы, в той или иной степени затормаживавшие вращение Земли: глобальные оледенения, временно сокращавшие массу мирового океана, движения литосферных плит и т.д. (Zemtsov, 2010).

Влияние собственного вращения Земли на дрейф континентов ранее рассмотрено в работах (Земцов и др., 2006; Zemtsov, 2007; Zemtsov, 2008; Земцов, 2009а). Используя континентальную модель (рис. 6), можно оценить энергию вращения (E) отдельного континента, например, Евразии, предполагая, что она подобна тонкому цилиндру радиуса (r), вращающемуся на поверхности мантии относительно вертикальной оси (z), проходящей через его середину. Приняв $\omega = 4 \times 10^{-16} \text{ c}^{-1}$ и высоту цилиндра – 200 км, получим, что мощность этого «тормозящего источника» не превышает $-2.5 \times 10^6 \text{ Вт}$, т.е. в миллионы раз меньше, чем у океанских приливов. Такими малыми значениями можно пренебречь.

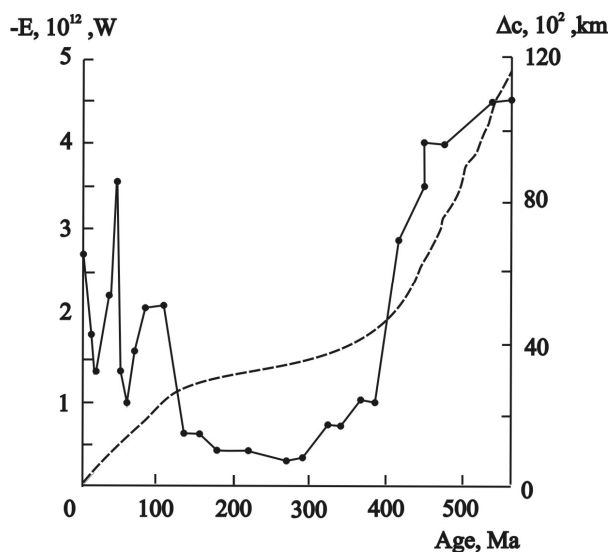


Рис. 5. Диссипация мощности океанских приливов (-E) в фанерозое и относительное уменьшение радиуса лунной орбиты (Δc) с увеличением возраста по В.Н. Жаркову (2003).

Fig. 5. Ocean tidal power dissipation (-E) in Phanerozoic time and relative decrease in the Moon orbit radius (Δc) with age, after Zharkov, 2003 (in Russian).

Вторая причина торможения земной мантии может быть связана с затуханием работы вероятных ядерных реакторов, расположенных на поверхности внутреннего ядра. Их мощность оценивается авторами в $30 \times 10^{12} \text{ Вт}$ (Rusov et al., 2007).

Интересно, что в интервале глубин 4983.64÷5000.0 км (см. рис. 2), вероятно, расположен и слой меньшей вязкости, т.к. скорость Р-волны здесь уменьшается с 10.86 до 9.7 км/с (Burmin, 2004).

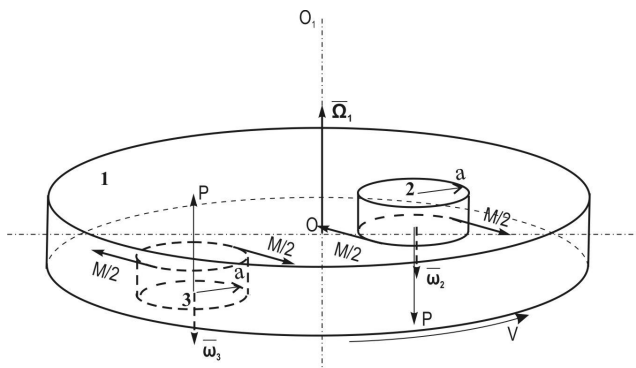


Рис. 6. Спонтанные моменты сил трения верчения (M) вертикальных цилиндров (2, 3) с равными радиусами a , прижатыми к массивному горизонтальному диску (1) с силой P . Диск вращается вокруг вертикальной оси OO_1 с линейной скоростью V . $\Omega_1, \omega_2, \omega_3$ – векторы угловых скоростей этих тел, соответственно (Zemtsov, 2008).

Fig. 6. Spontaneous moments of spinning friction forces (M) of vertical cylinders (2 and 3) of radius a pressed down to a massive horizontal disk (1) with the force P . The disk rotates about the vertical axis OO_1 with a linear velocity V . Angular velocity vectors of these bodies are, respectively, Ω_1, ω_2 , and ω_3 , after Zemtsov, 2008.

Ещё одна, хотя и менее достоверная T- и VDM-аномалия, вероятно, имела место в докембрии в интервале 1.0–0.6 млрд лет. Немногочисленные известные значения VDM в конце этого интервала были также много меньше, чем в предшествующее время и на современном уровне (рис. 7). Согласно В.Н. Жаркову (2003) удаление Луны от Земли начало усиливаться в конце мезопротерозоя (900 ± 100 млн лет тому назад) – в это время началась распад предполагаемого суперконтинента Родиния. Но, как известно, палеозойские суперконтиненты существовали вплоть до юрского периода, т.е. до времени завершения фанерозойской аномалии Т. Общие закономерности обеих Т-аномалий представляются более важными, поскольку они маркируют циклы магматических и сейсмических активизаций на Земле и, вероятно, являются следствием глобальных перестроек геоида, поскольку степень сжатия Земли зависит от ω^2 мантии. Именно это ведёт к переносу огромных масс литосферы в полярные области, её многочисленным расколам, активизациям магматических и сейсмических процессов. Естественно, что земное ядро при этом также трансформируется, хотя и с некоторым запаздыванием. Магнитный момент Земли сначала возрастает, а затем быстро убывает. В протерозойской истории Земли известно не менее 4-х циклов магматических активизаций (Балуев, Моралёв, 2001; Zemtsov, 2007), однако проследить наиболее древние аномалии Т и VDM невозможно – слишком мало достоверных данных.

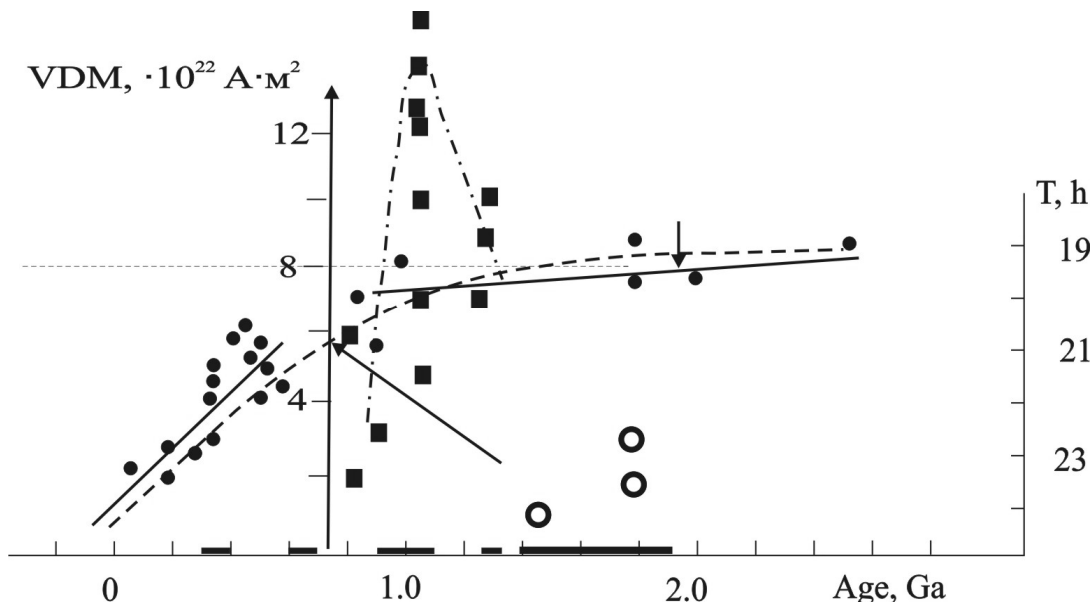


Рис. 7. Изменение периода вращения Земли (T) по Varga (1996), предполагаемая аномалия VDM в докембрии (Zemtsov, 2010) и циклы магматической активности (Балуев, Моралёв, 2001; Zemtsov, 2007).

Средние значения T – залитые кружки; значения VDM – квадраты; полые кружки – значения VDM, полученные на карельских объектах по Shcherbakova V.V., Pavlov V.E. et al., 2006; циклы магматической активности – жирные линии на оси возраста.

Fig. 7. A plot of variation in the Earth's rotation period (T), after Varga, 1996, assumed Precambrian anomaly in VDM (Zemtsov, 2010) and magmatic activity cycles, after Baluev & Moralev, 2001; Zemtsov, 2007.

Filled circles are T values; squares are VDM values; open circles are the VDM values obtained in Karelia's areas, after Shcherbakova V.V., Pavlov V.E. et al., 2006; bold segments are magmatic activity cycles.

Литература

- Авсюк Ю.Н. Эволюция системы Земля-Луна и ее место среди проблем нелинейной геодинамики // Геотектоника. 1993. №1. С. 13–22.
- Балуев А.С., Моралёв В.М. Структурный контроль и геодинамические условия внутриплитного магматизма на Восточно-Европейской платформе // Геология и разведка. 2001. № 1. С. 13–30.
- Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А. Глубинная геодинамика. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2001. 409 с.
- Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука. 1983. 416 с.
- Жарков В.Н. Геофизические исследования планет и спутников. М., ОИФЗ РАН. 2003. 102 с.
- Жаров В.Е. (в печати). Вестник МГУ, Том 3, ISSN 0201-7385.
- Земцов В.А. Закономерности вращения Евразии // Междунар. Геофизический журнал, 2006. Вып. 28. №5. Киев: ИФЗ НАН Украины. С. 179–189.
- Земцов В.А. Векторы угловых скоростей главных доменов Евразии в фанерозое и увеличение периода вращения Земли // Физика Земли. 2009а. №1. С. 85–93.
- Земцов В.А. Изменение периода вращения Земли в геологической истории, вероятные причины, связь с дипольным моментом главного поля // Материалы международной школы-семинара «Палеомагнетизм и магнетизм горных пород: теория, практика, эксперимент». 2009б. С. 97–100.
- Земцов В.А., Казанский А.Ю., Брагин В.Ю. Скорости вращения литосферных доменов Евразии // Палеомагнетизм и магнетизм горных пород; теория, практика, эксперимент / материалы семинара. М.: ГЕОС. 2006. С. 58–62.
- Зоненштайн Л.П., Кузьмин М.И. Палеогеодинамика. М.: Наука. 1993. 192 с.
- Мориц Г., Мюллер А. Вращение Земли: теория и наблюдения. Киев: Наукова Думка. 1992. 512 с.
- Павленкова Н.И. Глубинные сейсмические исследования и глобальная геодинамика // Исследования в области геофизики. М.: ОИФЗ РАН, 2004. С. 286–295.
- Сидоренков Н.С. Нестабильность вращения Земли // Вестник РАН. 2004. Том 74. №8. С. 701–715.
- Хаин В.Е. Тектоника плит: Анализ современного состояния // Вестн. МГУ, Геология. 1994. №1. С. 3–10.
- Щеглов В.П. Астрономия и дрейф континентов // Наука и человечество. 1974. С. 85–99.
- Щербакова В.В., Павлов В.Э., Щербаков В.П., Земцов В.А., Неронов И. Результаты палеомагнитных исследований и оценка палеонапряженности геомагнитного поля на границе раннего и среднего рифея на породах салминской свиты (северное Приладожье) // Изд-во РАН, сер. Физика Земли. 2006. №3. С. 57–68.
- Щербакова В.В., Щербаков В.П., Жидков Г.В. и др. Новые определения VDM и картина его поведения в геологическом прошлом по базе данных по палеонапряженности // Палеомагнетизм и магнетизм горных пород; теория, практика, эксперимент / материалы семинара. М.: ГЕОС. 2006. С. 186–189.
- Allegre C.J., Poirier J.-P., Humler E. et al. The chemical composition of the Earth // Earth Planet. Sci. Lett. 1995. Vol. 134. P. 515–526.
- Braginsky S.I., Roberts P.H. Equations governing convection in the Earth's core and the geodynamo // Geophys. Astrophys. Fluid Dyn. 1995. No. 79. P. 1–97.
- Burmin V.Yu. Seismic Wave Velocities in the Earth's Core // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2004. Vol. 40, No. 6. P. 477–490.
- Christodoulis D.S., Smith D.E. et al. Observed tidal breaking in the Earth-Moon-Sun system // J. Geophys. Res. 1988. Vol. 93. P. 6216–6236.
- Creer K.M. On a tentative correlation between changes in the geomagnetic polarity bias and reversal frequency and the Earth's rotation through Phanerozoic time // Growth Rhythms and The History of the Earth's Rotation. London. 1975. P. 293–317.
- Dickey J.D., Bender P.L., Faller J.E. et al. Lunar laser ranging: A continuing legacy of the Apollo-program // Science. 1994. Vol. 265. P. 482–490.
- Dobretsov N.L., Kiryashkin A.G., Kiryashkin A.A. Deep-level geodynamics. Siberian Branch of RAS, Novosibirsk. 2001. 409 p. (in Russian).
- Dziewonski A.M., Anderson D.L. Preliminary reference Earth model // Phys. Earth Planet. Inter., 1981. Vol. 25. P. 297–356.
- Fukao Y., To A., Obayashi M. Whole mantle wave tomography // J. Geoph. Res. 2003. Vol. 108. P. 7–23.
- Glatzmaier G.A., Roberts P.H. A three-dimensional convective dynamo solution with rotating and finitely conducting inner core and mantle // Phys. Earth Planet. Inter. 1995. No. 91. P. 63–75.
- Kurazhkovskii A.Yu., Kurazhkovskaya N.A., Klain B.I. Factors influencing the Earth's magnetic field evolution // arXiv: physics.geo-ph/0806.3136, 2008. Vol. 1. No. 19. P. 1–12.
- Labrosse S., Poirier J.-P., Le Mouél J.-L. The age of the inner core // Earth Planet.Sci.Let. 2001. Vol. 190. No. 3-4. P. 111-123.
- Malcuit R.J., Mehringer D.M., Winters R.R. A gravitational capture origin for the Earth-Moon system: implications for the early history of the Earth and Moon // The Archaean: Terrains, Processes and Metallogeny. W. Australia University. 1992. Vol. 22. P. 223–235.
- Pavlov V., Neronov I., Zemtsov V.A. The results of the preliminary paleomagnetic investigations of the Riphean Salmi Formation (Northern Ladoga lake coast) // Book of abstract of the 5th Intern. Conf. "Problems of Geocosmos", Eds. Troyan V.N., et al., St. Petersburg Univ. 2004. P. 183.
- Rusov V.D., Pavlovich V.N. et al. Geoantineutrino spectrum and slow nuclear burning at the boundary of the liquid and solid phases of the Earth's core // J. of Geophys. Res. 2007. Vol. 112. P. 1–16.
- Shcherbakova V. V., Pavlov V. E., Shcherbakov V. P., I. Neronov, and V. A. Zemtsov Paleomagnetic Studies and Estimation of Geomagnetic Paleointensity at the Early/Middle Riphean Boundary in Rocks of the Salmi Formation (North Ladoga Area) // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2006. Vol. 42, No. 3. P. 233–243.
- Shcherbakova V.V., Shcherbakov V.P., Zhidkov G.V., Sycheva N.K. New determinations of VDM and its behavioral pattern in the geological past, based on the paleointensity database // Paleomagnetism and rock

magnetism (Proceedings of the Conference), Moscow: GEOS, 2006. P. 186–189. (in Russian).

Song X.D., Richards P.G. Seismological evidence for differential rotation of the Earth's inner core // *Nature*. 1996. No. 382. P. 221–224.

Starichenko S.V. Supercritical magnetoconvection in rapidly rotating planetary cores // *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2000. No. 117. P. 225–235.

Storetvedt K.M. *Global Wrench Tectonics*. Bergen. 2003. 397 p.

Storetvedt K.M. Facts, mistaken beliefs, and the future of global tectonics // *New Concepts in global Tectonics, Newsletter*. 2010. No. 57. P. 3–10.

Varga P., Gambis D., Bus Z. et al. The Relationship between the global Seismicity and the Rotation of the Earth // *Journees 2004, Fundamental Astronomy: New concepts and models for high accuracy observations*, Paris, September 20–22. 2004. P. 115–120. <http://synte.obspm.fr/journees2004/PDF>

Varga P. Variation of Earth's rotation speed in geological time-scale // *The Earth and its rotation*, Heidelberg. 1996. P. 441–474.

Williams G.E. Tidal rhythmites: geochronometres for the ancient Earth-Moon system // *Episodes*. 1989. Vol. 12. P. 162–171.

Zemtsov V.A. Continent drift pattern // *Report to the 32nd Intern. Geol. Congress*, Florence, 2004. P. 544.

Zemtsov V.A. Rotation of the Earth and continents // *Precambrian continental growth & tectonism*. New Delhi: Selective & Scientific Books. 2005. P. 94–98.

Zemtsov V.A. Influence of the Earth's rotation on continental motions // *Gondwana Res. J.* 2007. Vol. 12, No. 5. P. 242–251.

Zemtsov V.A. Rotational drift of the main Eurasia's domain (from the PaleoTethys and at the present day) // *Bulletin of the Tethys Geological Society*. Cairo. 2008. Vol. 3. P. 1–10.

Zemtsov V.A. The angular velocity vectors of the main Eurasian domains in the Phanerozoic and an increase in the Earth's rotation period // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2009. Vol. 45, No. 1. P. 80–88.

Zemtsov V.A. Variations in the Earth's rotation period and virtual dipole moment in geological history // *Problems of Geocosmos / Proceedings of the 8th International Conference*, St. Petersburg, Petrodvorets, September 20–24. 2010. P. 364–369.

Zharkov V.N. *Interior structure of the Earth and planets*. London, New York. 1986.

Zharkov V.N. *Geophysical studies of planets and satellites*. Moscow: Institute of Physics of the Earth RAS, 2003. 102 p. (in Russian).

Zharkov V.N., Molodensky S.M., Brzezinski A. et al. *The Earth and its rotation*. Wichmann, Heidelberg, 1996. 501 p.