

УДК 551.24:528.7 (202)

О ЗАМЕДЛЕНИИ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ

Владимир Юрьевич Тимофеев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, тел. (383)335-64-42, e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

Елена Валерьевна Бойко

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383)335-64-42, e-mail: boykoev@ipgg.sbras.ru

Дмитрий Геннадьевич Ардюков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)335-64-42, e-mail: ardyukovdg@ipgg.sbras.ru

Антон Владимирович Тимофеев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383)335-64-42, e-mail: timofeevav@ipgg.sbras.ru

Игорь Сергеевич Сизиков

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, Россия, пр. Академика Коптюга, 1, инженер-конструктор, e-mail: sizikov.i.s@gmail.com

Дмитрий Алексеевич Носов

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, инженер-программист, e-mail: danossov@ngs.ru

В работе рассматривается замедление вращения Земли на разных временных периодах. Скорость вращения Земли является важным параметром, используемым в геодезии, гравиметрии, океанологии и других науках о Земле. Оценки замедления скорости вращения могут быть получены методами палеонтологии, астрономии и спутниковыми методами. В современную эпоху появились точные спутниковые методы оценки эффекта замедления. Проблема – в согласовании решений и оценок, астрономических параметров и оценок замедления вращения, вызванных эффектами в океанах и глубоких недрах Земли. Диссипация энергии рассматривается в рамках приливной теории. Приведены расчеты потерь энергии для различных приливных моделей. В работе приводятся оценки, полученные различными методами: от изучения древних затмений Солнца до локации Луны. Существует отдельный вопрос о природе современных короткопериодных вариаций скорости вращения и их связи с изменениями уровня Мирового океана, землетрясениями и диссипацией в глубинных областях Земли.

Ключевые слова: вращение Земли, скорость вращения, палеонтологические методы, астрономические методы, приливная диссипация, диссипация в океанах, энергетические оценки, короткопериодные вариации.

Введение

Вариации скорости вращения Земли отражают эффекты замедления, вызванные диссипацией энергии в различных слоях Земли: от Мирового океана до жидкого ядра. Величина скорости вращения Земли и ее стабильность во времени важны при высокоточных гравиметрических наблюдениях. Эффект вариаций скорости вращения учитывается при построении эволюционной теории Земли. Замедление вращения Земли вызвано приливной диссипацией в океанах, а его значения используются для расчета нагружения в океанах и при составлении котидальных карт Мирового океана [1–3].

Результаты измерений и энергетические оценки

Астрономические наблюдения движения Луны в долготе, представленные за более чем 2 000 лет даже грубыми оптическими средствами, показали, что Земля теряет энергию вращения. Ее скорость вращения замедляется на протяжении последних столетий, так за последние 100 000 лет день стал длиннее на 2 секунды. Сравнение времен полной фазы солнечных затмений в Античности с вычислением этого времени при постоянной скорости вращения показывает разность в долготе, которая увеличивается как квадрат времени. Так за 2000 лет разность достигает 4 часов (табл. 1, [4]). Историки используют для этих исследований вавилонские, египетские, греческие и китайские документы. В последних работах рассматриваются как линейные, так и степенные модели вариаций скорости вращения по данным о солнечных затмениях [5, 6].

Таблица 1

Замедление вращения

Длина дня $LOD = 2\pi/\omega = 86\,164\text{ с}$
Скорость вращения $\omega = \omega_0 + \gamma \cdot t$, $\omega_0 = 7,292 \cdot 10^{-5}$ рад/с
Вековое замедление $\gamma = d\omega/dt = -4,8 \cdot 10^{-22}$ рад/с ²
$d\omega/\omega_0 = -6,58 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1} \cdot dt$
Если $dt = 100$ лет $= 3,2 \cdot 10^9$ с: $d\omega \cong -2,1 \cdot 10^{-8} \omega$
$(LOD)/LOD = -d\omega/\omega = 2,1 \cdot 10^{-8}$ поэтому $d(LOD) = 1,81$ мс в столетие
Замедление в долготе после m дней: $d\lambda = 1/2 \cdot (d\omega/\omega) \cdot m^2$ рад
Для 2 000 лет $= 730\,500$ дней
$d\lambda = 0,951$ рад $\cong 54^\circ \cong 3,6$ ч
$GEM - T_2$ замедление составит $\gamma = -4,8 \pm 0,32 \cdot 10^{-22}$ рад/с ²
Записи затмений до 1620 года $d(LOD) = 2,4$ мс в столетие

Это вековое замедление также подтверждается палеонтологическими данными по росту морских беспозвоночных. Данные по циклическим наслоениям, содержащим приливные ритмы, вызванные приливым влиянием на седиментацию,

дают новые возможности решения этой проблемы. Позднепротерозойские структурные ритмы (650 миллионов лет назад) дают материал по параметрам палеовращений [7] для того времени, когда день составлял 21,9 часа, а год соответственно 400 ± 7 дней (табл. 2). Такая кооперация с палеонтологами очень существенна для изучения замедления.

Таблица 2

Позднепротерозойские (около 650 миллионов лет)
и современные параметры прилива и вращения [7]

Параметр – эпоха	Поздний протерозой	Современные
Солнечных дней/лунный месяц	$30,5 \pm 0,5$	29,53
Лунные месяцы/год	$13,1 \pm 0,1$	12,37
Солнечных дней/год	400 ± 7	365,24
Длина солнечного дня (часы)	$21,9 \pm 0,4$	24,00
Расстояние Земля–Луна (R_E)	$58,28 \pm 0,30$	60,27
Скорость убегания Луны (см/год)	$1,95 \pm 0,29$	$3,7 \pm 0,2$

Данные о пересечении планетой Меркурий солнечного диска и использование в последние десятилетия лазерной локации Луны дают результаты, хорошо согласующиеся с данными о солнечных затмениях [8]. Измерения последнего столетия по методу закрытия звезд Луной подтверждают эти данные.

Сейчас тот же эффект наблюдается по орбитам искусственных спутников, что позволяет исследовать это явление с очень высокой точностью. Сезонные вариации скорости вращения Земли и изменения за последние годы приведены на рисунке [9]. На относительно коротких (годы – столетие) интервалах параметр отличается большой изменчивостью. На больших интервалах можно рассматривать линейное изменение.

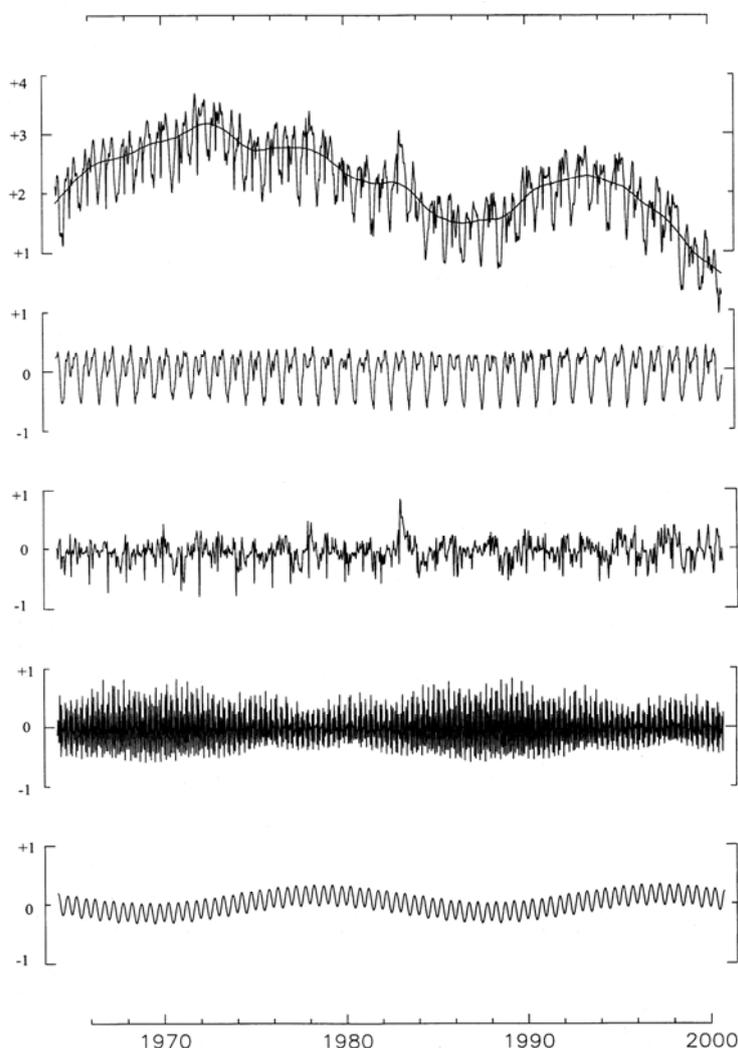
Идея Канта о приливном трении через два столетия становится ясной, а полный эффект по энергии состоит в приложении приливных сил в океанах и потерях энергии за счет вихревой диссипации, трения и взаимодействия приливов в твердой Земле. Значительные различия в представлениях и оценках приводят к оживленным дискуссиям между астрономами, океанографами, геодезистами и геофизиками, и нельзя сказать, что проблема закрыта.

Есть два метода оценки приливной диссипации в системе Земля–Луна: астрономический и геофизический.

Астрономический метод, основанный на оценке скорости замедления вращения Земли и изменения орбиты Луны и искусственных спутников Земли, постоянно дает более высокую сумму энергии по приливному искажению и замедлению вращения (около 3 терроватт), чем геофизические оценки (около 1,8 терроватт). Все усилия нацелены на преодоление этого противоречия.

В геофизических методах используются энергетический вклад от приливных течений, метод трения с использованием котидальных карт, метод момен-

тов с простыми вычислениями через поверхностные интегралы, оценка моментов по компоненте восток-запад – приливная сила на приливную высоту.



Вариация продолжительности суток в миллисекундах, исключены зональные вариации. Ниже по порядку: сезонные вариации, остатки, эффекты зональных приливов с периодами до 35 суток и эффекты зональных приливов с периодами свыше 35 суток. Время – годы. Период наблюдений с 1965 по 2000 г.

Конечно, множество трудностей появляется из-за недостаточной точности океанических приливных моделей, и можно только надеяться на получение более точного результата.

Во-первых, на основании современных результатов сейсмологии мы сейчас представляем, что диссипация за счет неупругости тела Земли очень мала и дает только несколько процентов в общий бюджет энергии системы [7, 8],

поэтому объяснение надо искать в количественных оценках эффектов океанов и, вероятно, во взаимодействии Океан–Земля.

Тем не менее, вихревая диссипация связана с турбулентностью, рожденной теплом, но диссипация из-за молекулярного, вязкого трения – это потери тепла на дне океанов, а не вклад в замедление вращения Земли. Физические процессы взаимодействия Луны с твердой Землей посредством океанических приливов можно описать следующим образом. В то время, как лунные гравитационные силы растягивают Землю, а океанические приливы движутся вокруг несинхронно, океаны приспособляются к приливному искажению океанического дна, изменению вращения Земли с их приливным донным давлением. Фактически, средний уровень работы океанического приливного донного давления W_p^0 почти полностью соответствует энергии, достигаемой по наблюдаемому замедлению вращения. Согласно физическим принципам, изменения сопровождаются приливным трением и, следовательно, затратами энергии в тонком турбулентном пограничном слое океанического дна. Следует заметить, что океаническое приливное изменение оценивается в 53 % потерь тепла от общего запаса лунной гравитационной приливной энергии, и только 47 % преобразуется в потери энергии вращения Земли [10–13]. Отметим, что это соотношение не зависит от различных океанических приливных моделей, но, фактически, такой эффект давления пропорционален высоте прилива на дне, т. е. числу Лява h_2 , и обратно пропорционален приложенному потенциалу, т. е. $1 + k_2$ числу Лява. Соотношение $h_2/(1 + k_2)$ составляет 0,47.

Количественно, на основе котидальных карт для волны M_2 , получено 3,550 84 ТВт ($1 \text{ ТВт} = 10^{12}$ ватт), как среднее из давления на дне 1,66906 ТВт и потери из-за трения на дне 1,87741 ТВт (1,27 ТВт получаются на площадях шельфа, 0,41 ТВт – на океанических склонах и 0,20 ТВт – для глубинных областей, а средняя оценка для работы вихревой диссипации в океанах – только 0,004 36 ТВт) [14]. Еще одна оценка – 1,93 ТВт для M_2 и 0,21 ТВт для S_2 . В этом случае 1,74 ТВт передаются литосфере, из которых 0,03 ТВт диссипируют в твердой Земле, а 1,71 ТВт возвращаются Луне: работа твердой Земли на Луне того же порядка [13]. В этой схеме сохранения энергии в закрытой системе Луна–Океан–Земля появляется значительный дефицит, так как против всех наблюдений Луна увеличивает свою орбиту ($n' = + 46''$ столетие⁻²!). Чтобы соответствовать астрономическим наблюдениям, приливный фазовый сдвиг должен достигать $0,45^\circ$ [14].

Введение такого фазового сдвига практически не изменяет момент, вызванный приливным давлением в океанах ($-23,8 \cdot 10^{15}$ Дж), но вводит дополнительный гравитационный момент, пропорциональный числу Лява h и синусу ϵ ($-4,6 \cdot 10^{15}$ Дж $\epsilon = 0,5^\circ$), чего требует закон сохранения энергии. Следует подчеркнуть, что этот фазовый сдвиг не должен сопровождаться внутренней диссипацией, но он отличается приливным взаимодействием, обусловленным давлением, вызванным океаническим приливом, вследствие деформации дна океанов приливом. Однако океаническое приливное донное давление на при-

ливное тело ($h_2 / (1 + k_2) = 0,47$) сбалансировано гравитационной работой прилива на Луну ($-k'_2 / (1 + k_2) = 0,23$) и гравитационной работой приливного тела на океанический прилив ($k_2 / (1 + k_2) = 0,23$), что приводит к соотношению $h_2 = k_2 - k'_2$. Вследствие этого следует учитывать изменения береговых линий, вызванные океаническим приливным горбом.

Из закона сохранения углового момента в системе Земля–Луна, для того, чтобы компенсировать потери земного вращательного углового момента, необходимо соответствующее увеличение лунного углового момента, который можно получить только увеличением расстояния Земля–Луна – a . По третьему закону Кеплера ($n^2 \cdot a^3 = G \cdot (M + m)$) получаем торможение средней скорости Луны:

$$da / dt = -(2a / 3n) \cdot dn / dt. \quad (1)$$

Поэтому можно рассмотреть бюджет энергии системы Земля–Луна, где уменьшается кинетическая энергия вращения Земли, уменьшается кинетическая энергия орбитальных моментов Земли и Луны и увеличивается гравитационная потенциальная энергия системы двух тел.

Торможение величины среднего движения Луны наблюдаемо, но результаты классической оптической астрономии не очень надежны.

Результаты, полученные лазерной локацией от отражателей, установленных на поверхности Луны во время миссии Apollo и ЛУНА, позволили получить:

$$n' = (-26,1 \pm 1,0)'' \text{ столетие}^{-2}. \quad (2)$$

Это соответствует результатам, полученным методом пересечения планетой Меркурий солнечного диска [8]:

$$n' = (-26,0 \pm 2,0)'' \text{ столетие}^{-2}. \quad (3)$$

Таким образом, используя уравнение (1), получаем скорость отдаления Луны от Земли:

$$a' = + 3,6 \text{ см} \cdot \text{год}^{-1}. \quad (4)$$

Подобно лунной траектории, траектории искусственных спутников изменяются из-за перемещения масс, вызванного приливами на Земле и океанах. Эти изменения наблюдаются как длиннопериодные вариации в наклонении и в узлах их орбит, а также в главной полуоси и эксцентриситете (табл. 3, [8, 15]).

Таблица 3

Вклад четырех главных приливных волн в орбиты спутников

	Секториальные волны		Тессеральные волны (деклинационные)	
	<i>M2</i>	<i>N2</i>	<i>O1</i>	<i>K1</i>
Главная полуось <i>a'</i> (<i>n'</i> *)	80 %	4,5 %	14,3 %	0
Эксцентриситет <i>e'</i>	-7 %	91 %	16 %	0
Наклонение <i>i'</i>	81 %	3 %	-70,3 %	79 %

Примечание:

N2 является эллиптической волной для *M2* и играет главную роль для *e*.

O1 и *K1* – это деклинационные волны с разными знаками.

K1 – лунно-солнечная (66 % от Луны).

K1 – приливный горб постоянно ориентирован по направлению на точку весеннего равноденствия.

(*) *n'* это следствие *a'*.

Конечно, спутники не претерпевают изменения на суточных и полусуточных приливных частотах, которые являются результатом вращения Земли. То, что наблюдается, – это изменение ориентации приливного горба в пространстве. Поэтому частота изменений получается вычитанием звездной частоты вращения Земли из приливной частоты, подобно прецессии-нутаии, и, очевидно, вычитанием частоты обратной градации узлов плоскости орбит спутников в пространстве. Это дает периоды:

$$T_i(D) = 2\pi / (\omega - \omega_i - \Omega') \quad (5)$$

– для суточных приливов,

$$T_i(SD) = 2\pi / (\omega - \omega_i - 2\Omega') \quad (6)$$

– для полусуточных приливов.

Приливная волна *K1* ($\omega_i = \omega$) приводит к длинным и даже сверхдлинным периодам в случае полярных орбит, где $\Omega' \sim 0$, в то время как *M2* и *O1* дают периоды около 13,6 дня.

Для оценки качества котидальных карт океанов используется сравнение вариаций искусственных спутников и океанических приливных высот в каждой компоненте сферического гармонического представления Фурье, которое дает, например, для прилива *M2*:

$$\zeta = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n [C_{nm}^{\pm} \sin(\sigma t + \chi + \epsilon_{nm}^{\pm} \pm m\lambda)] P_n^m(\cos \theta); \quad (7)$$

$$C_{22}^+ = 2,95 \text{ см}; \quad \epsilon_{22}^+ = 311,6^\circ. \quad (8)$$

Эти значения можно сравнить со значениями, полученными по спутниковым данным [15]:

$$C_{22}^+ = (3,24 \pm 0,13) \text{ см}, \quad \epsilon_{22}^+ = 328^\circ \pm 2,5^\circ. \quad (9)$$

Это среднее из решений по данным спутников *Starlette*, *Geos 3* и трех спутников *Transit* с 1977 по 1982 г. Рассматриваемый результат связан, конечно, с глобальным эффектом океанических приливов, земных приливов и их взаимодействием и содержит, конечно, вклад не только волны *M2*, но также *O1* и *N2*.

Для получения коэффициента C_{22}^+ , представительного для океанических приливов, из спутниковых вариаций земноприливный эффект, обычно моделируемый с $k = 0,3$ и $\alpha = 0^\circ$, должен вычитаться. Так фаза земных приливов $\alpha = 0,5^\circ$ вызывает C_{22}^+ почти 0,5 см (3,23 до 2,76).

В работе [15] показано, что приливные параметры C_{22}^+ , ϵ_{22}^+ связаны со слоем соленой воды (плотностью 1,03). Их можно прямо использовать для вычислений гравитационного эффекта океанов в эволюции орбиты Луны, что увеличивает расстояние Земля–Луна и, соответственно, замедление ее средней скорости n' :

– для приливов твердой Земли

$$n' = -843(k_2 \cdot \sin \epsilon)(M2) - 151(k_2 \cdot \sin \epsilon)(O1) - 47(k_2 \cdot \sin \epsilon)(N2); \quad (10)$$

– для океанических приливов [11]

$$n' = -7,81(C_{22}^+ \cdot \cos \epsilon_{22}^+)(M2) - 1,63(C_{21}^+ \cdot \sin \epsilon_{21}^+)(O1) - 2,25(C_{22}^+ \cdot \cos \epsilon_{22}^+)(N2).$$

Эти уравнения также включают океанический прилив волн *O1* и *N2*, которые важны помимо *M2* (табл. 3). Замедление определяют:

а) из лазерной локации спутников *Starlette* и *Lageos* [16]:

$$n' = (-25,5 \pm 1,25)'' \text{ столетие}^{-2}; \quad (11)$$

б) из приливных констант для модели Земли – *Goddard Earth Model GEM-T2* [17–20]:

$$n' = (-26,04 \pm 0,51)'' \text{ столетие}^{-2}. \quad (12)$$

Полученное значение такое же, как по измерениям методом лазерной локации Луны (2), а это означает, что диссипация внутри Луны незначительна при существующем уровне точности, в согласии с данными по лунной сейсмичности.

Другой путь решения проблемы – это, конечно, вычитание вклада океана в диссипацию (8) из спутниковых данных (9), чтобы попытаться оценить вклад твердой Земли. При пересчете вклада приливной энергии на основании спутниковых данных для прилива $M2$ (C_{22} , ϵ_{22} в уравнении (10)) получена общая оценка для диссипации $M2$:

$$E' = [2,69 \pm 0,13]TW. \quad (13)$$

С глобальным фазовым сдвигом $5,32^\circ \pm 0,26^\circ$ (океаны и твердая Земля). Исключая диссипацию океанического прилива, вычисленную на основе приливных моделей, оценивается остаток для диссипации в твердой Земле для прилива $M2$ в теле, который пропорционален величине $k \sin \epsilon$ (k – второе число Лява, ϵ – фазовый сдвиг). Далее получаем эти два параметра, характеризующие реологию Земли. Параметры независимы и характеризуют неупругие процессы в мантии.

Для котидаальной карты Паркера – Хендекотта:

$$C_{22} = 3,38 \text{ см}; \quad \epsilon_{22} = 313,1^\circ; \quad (14)$$

$$k = 0,3073 \pm 0,0013; \quad \epsilon = 0,78^\circ \pm 0,24^\circ.$$

Для котидаальной карты Шведерского:

$$C_{22}^+ = 2,95 \text{ см}; \quad \epsilon_{22}^+ = 311,6^\circ; \quad (15)$$

$$k = 0,3048 \pm 0,0013; \quad \epsilon = 1,24^\circ \pm 0,24^\circ.$$

Однако ошибка в решении по спутникам составляет около 5 % от общего уровня диссипации, а разброс между различными моделями океанического прилива даже больше, что сравнимо с вкладом диссипации в твердой Земле. Учитывая эту неопределенность, пытаются использовать фактор затухания Q Чандлеровского колебания полюса для оценки приливного трения в твердой Земле. В общем случае предложен степенной закон $Q \sim \omega^\alpha$ для диапазона от сейсмических до чандлеровских колебаний, но распределение Q по частотному диапазону часто не ясно (значение α рассматривается от 0,1 до 0,3). Поэтому все еще не возможно реально оценить этим путем приливную диссипацию в твердой Земле (при $\alpha = 0,3$ диссипация в твердой Земле составляет 50 % про-

центров от общего уровня). Ограничения на период Чандлера ($433,3 < \tau < 436$ дней из наблюдений) показывают, что значение $\alpha \geq 0,3$ может быть исключено, так как дает $\tau = 452$ дня или более. Существует оценка по $M2$ для диссипации в твердой Земле $E_{SE} = 0,12$, $TW = 4,4$ % при фазовом запаздывании для твердой Земли $\epsilon = 0,21$ °. Позднее получено новое ограничение $0,005$ ° для приливов твердой Земли на основе моделей сейсмического просвечивания Земли [19, 20].

Заключение

Энергетические оценки рассматривались при линейных изменениях скорости вращения (скорость около 2 мс в столетие), и в этой области получено хорошее соответствие экспериментальным результатам. В последние годы подробно анализируются вариации на периодах от года до столетия. Было выяснено, что годовые вариации до 2 мс связаны с изменениями момента инерции Земли, вызванными сезонными перемещениями в атмосфере (от экватора к полюсу и обратно). Активно дискутируются следующие вопросы: о связи вариаций скорости вращения Земли и эффекта глобального подъема Мирового океана в последнее столетие; о таянии ледников и глобальном потеплении; об эффектах диссипации в глубинах Земли и на границе жидкого ядра и мантии; об изменениях момента инерции Земли при появлении крупных течений в океанах (например, явление Эль-Нинье, 1982 г.) и при катастрофических землетрясениях (например, Саматра, 2004 г.). Эти связи активно изучаются в настоящее время [21–24]. В практической области, используя информацию Международного центра по вращению Земли, можно вводить поправки в высокоточные геодезические и геофизические измерения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Молоденский С. М. Влияние электромагнитной связи ядра с мантией на нутацию Земли. II. Сравнение с данными наблюдений // Физика Земли. – 2004. – № 9. – С. 3–13.
2. Молоденский С. М. Сравнение моделей неупругой Земли, построенных по астрометрическим и приливному гравиметрическим данным // Физика Земли. – 2006. – № 7. – С. 12–16.
3. Парийский Н. Н., Кузнецов М. В., Кузнецова Л. В. О влиянии океанического прилива на вековое замедление вращения Земли // Известия АН СССР, сер. Физика Земли. – 1972. – № 2. – С. 50–55.
4. Приливные эффекты по гравиметрическим и уровнемерным наблюдениям, океанические приливные модели / В. Ю. Тимофеев, М. Г. Валитов, Б. Дюкарм, Д. Г. Ардюков, С. Б. Наумов, А. В. Тимофеев, Р. Г. Кулинич, Т. Н. Колпащикова, З. Н. Прошкина, И. С. Сизиков, Д. А. Носов // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 1 (33). – С. 36–47.
5. Melchior P., Francis O. Comparison of recent ocean models using ground-based tidal gravity measurements // Mar.Geod. – 1996. – Vol. 19. – P. 291–330.
6. Holme R., de Viron O. Characterization and implications of intradecadal variations in length of day // Nature. – 2013. – 499. – P. 202–204. doi: 10.1038/nature 12282.

7. Stephenson F. R., Morrison L. V., Hohenkerk C. Y. Measurements of the Earth's rotation: 720 BC to AD 2015 [Электронный ресурс] // Proc. R. Soc. – 2016. – A 472:20160404. – Режим доступа : <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2016.0404>.
8. Williams E. Tidal Rhythmites: key to the history of the earth's rotations and the lunar orbit // J. Phys. Earth. – 1990. – Vol. 38. – P. 475–491.
9. Morrison L.V., Ward. C. G. An analysis of the transits of Mercury: 1677–1973 // Mon. Not. R. Astr. Soc. – 1975. – 173. – P. 183–206.
10. Boucher C., Altamimi Z., Sillard P. Results and analysis of the ITRF97 [Электронный ресурс] // International Earth Rotation, Reference Systems Service (IERS). 2015 Long-term Earth Orientation Series Data EOP08 C04. – 1999. – Note No. 27. – P. 191. – Режим доступа : <https://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/EarthOrientationData/eop.html>.
11. Cartwright D. E., Ray R. D. New Estimates of Oceanic Tidal Energy Dissipation from Satellite Altimetry // Geophys. Res. Letters. – 1989. – Vol. 16, No. 1. – P. 73–76.
12. Cazenave A., Daillet S. Lunar Tidal Acceleration from Earth Satellite Orbit Analyses // Journal of Geophysical Research. – 1981. – Vol. 86, No. B3. – P. 1659–1663.
13. Christodoulidis D. C., Smith D. E., Williamson R. G., Klosko S. M. Observed Tidal Braking in the Earth/Moon/Sun System // J. Geoph. Res. – 1988. – Vol. 93, No. B6. – P. 6216–6236.
14. Platzman G. W. The role of the earth tides in the balance of tidal energy // Journal of Geophysical Research. – 1985. – Vol. 90, No. B2. – P. 1789–1793.
15. Schiwderski E. W. On tidal friction and the decelerations of the earth's rotation and moon's revolution // Marine Geodesy. – 1985. Vol. 9, No. 4. – P. 399–450.
16. Lambeck K. Tidal dissipation in the oceans: astronomical, geophysical and oceanographic consequences // Philos. Trans. R. Soc. London. – 1977. –No. A 287. – P. 545–594.
17. The core and fluctuations in the Earth's rotation. In Earth's core dynamics, structure, rotation / S. Ponsar, V. Dehant, R. Holme, D. Jault, A. Pais, T. Van Hoolst (eds. V. Dehant, K.C. Creager, S-I. Karato, S. Zatman) // American Geophysical Union. Geodynamics Series. Washington, DC: American Geophysical Union, 2003. – P. 251–261.
18. Shum C. K., Andersen O. B., Egbert G. Comparison of Newly Available Deep Ocean Tide Models by the TOPEX/POSEIDON Science Working Team // Journal of Geophysical Research. – 1997. – No. 102 (C11). – P. 25173–25194.
19. Matsumoto K., Takanezawa T., Ooe M. Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data // J. Oceanography. – 2000. – No. 56. – P. 567–581.
20. Dehant V., Defraigne P., Wahr J. M. Tides for a convective Earth // Journal of Geophysical Research. – 1999. – Vol. 104, No. B1. – P. 1035–1058.
21. Gillet N., Jault D., Finlay C. C. Planetary gyre, time-dependent eddies, torsional waves, and equatorial jets at the Earth's core surface // J. Geophys. R. Solid Earth. – 2015. – Vol. 120. – P. 3991–4013. doi:10.1002/2014JB011786.
22. Probabilistic reanalysis of twentieth-century global sea-level rise / C. C. Hay, E. Morrow, R. E. Kopp, J. X. Mitrovica // Nature. – 2015. – Vol. 517. – P. 481–484.
23. Sabadini R., Riccardo E. M. R., Via G. D. Coseismic rotation changes from the 2004 Sumatra earthquake: the effects of Earth's compressibility versus earthquake induced topography // Geophys. J. Int. – 2007. – Vol. 171. – P. 231–243.
24. Xu Changyi, Sun Wenke. Co-seismic Earth's rotation change caused by the 2012 Sumatra earthquake // Geodesy and Geodynamics. – 2012. – Vol. 3, No. 4. – P. 28–31. doi:10.3724/SP.J.1246.2012.00028.

Получено 29.11.2017

© В. Ю. Тимофеев, Е. В. Бойко, Д. Г. Ардюков,
А. В. Тимофеев, И. С. Сизиков, Д. А. Носов, 2018

ABOUT DECELERATIONS OF THE EARTH'S ROTATION

Vladimir Yu. Timofeev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Akademika Koptyuga Prsp., Dr. Sc., Chief Researcher, phone: (383)335-64-42, e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

Elena V. Boyko

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Akademika Koptyuga Prsp., Ph. D., Researcher, phone: (383) 335-64-42, e-mail: boykoev@ipgg.sbras.ru

Dmitrii G. Ardyukov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Akademika Koptyuga Prsp., Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)335-64-42, e-mail: ardyukovdg@ipgg.sbras.ru

Anton V. Timofeev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Akademika Koptyuga Prsp., Ph. D., Researcher, phone: (383)335-64-42, e-mail: timofeevav@ipgg.sbras.ru

Igor S. Sizikov

Institute of Automatic and Electrometry of Siberian Branch RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Akademika Koptyuga Prsp., Engineer, e-mail: sizikov.i.s@gmail.com

Dmitrii A. Nosov

Institute of Automatic and Electrometry of Siberian Branch RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Akademika Koptyuga Prsp., Engineer, e-mail: danossov@ngs.ru

Earth's rotation Rate is a parameter used in geodesy, gravity, geology, oceanography and other Earth's sciences. It's is viewed at different time periods. Estimations can be made by paleontological, astronomical and space geodesy and other methods. Space geodesy methods are most precise and modern. Problem was in the correlation of astronomical parameters and energy dissipation in the oceans and deep layers of the Earth depths. The calculation of various tidal ocean models is presented for energy's dissipation. We discussed different results obtained by connections of ancient Sun eclipses method with Lunar Location Method. Different point is modern short-term rotational speed relations with global ocean level changes, earthquakes and deep Earth dissipation.

Key words: earth's rotation rate, rotation speed, paleontological method, astronomical method, tidal dissipation, ocean dissipation, energy estimations, short-term variations.

REFERENCES

1. Molodenskiy, S. M. (2004). The influence of the electromagnetic coupling of the nucleus with the mantle on the nutation of the Earth. II. Comparison with observational data. *Fizika Zemli [Izvestiya. Physics of the Solid Earth]*, 9, 3–13 [in Russian].
2. Molodenskiy, S. M. (2006). Comparison of models of inelastic Earth, constructed by astrometric and tidal gravimetric data. *Fizika Zemli [Izvestiya. Physics of the Solid Earth]*, 7, 12–16 [in Russian].

3. Pariyskiy, N. N., Kuznetsov, M. V., & Kuznetsova, L. V. (1972). On the influence of the ocean tide on the secular deceleration of Earth's rotation. *Izvestiya AN SSSR, seriya Fizika Zemli [Proceedings of the USSR Academy of Sciences, series Physics of the Solid Earth]*, 2, 50–55 [in Russian].
4. Timofeev, V. Yu., Valitov, M. G., Dyukarm, B., Ardyukov, D. G., Naumov, S. B., Timofeev, A. V., ... Nosov, D. A. (2016). Tidal effects on gravimetric and level observations, oceanic tidal models. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 1(33), 36–47 [in Russian].
5. Melchior, P., & Francis, O. (1996). Comparison of recent ocean models using ground-based tidal gravity measurements. *Mar. Geod.*, 9, 291–330.
6. Holme, R., & de Viron, O. (2013). Characterization and implications of intradecadal variations in length of day. *Nature*, 499, 202–204. doi: 10.1038/nature 12282.
7. Stephenson, F. R., Morrison, L. V., Hohenkerk, C. Y. (2016). Measurements of the Earth's rotation: 720 BC to AD 2015. *Proc. R. Soc., A* 472:20160404. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2016.0404>.
8. Williams, E. (1990). Tidal Rhythmites: key to the history of the earth's rotations and the lunar orbit. *J. Phys. Earth.*, 38, 475–491.
9. Morrison, L. V., & Ward, C. G. (1975). An analysis of the transits of Mercury: 1677-1973. *Mon. Not. R. Astr. Soc.*, 173, 183–206.
10. Boucher, C., Altamimi, Z., & Sillard, P. (1999). Results and analysis of the ITRF97. *International Earth Rotation, Reference Systems Service (IERS). Long-term Earth Orientation Series Data EOP08 C04: Note No. 27* (p. 191). Retrieved from <https://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/EarthOrientationData/eop.html>.
11. Cartwright, D. E., & Ray, R. D. (1989). New Estimates of Oceanic Tidal Energy Dissipation from Satellite Altimetry. *Geophys. Res. Letters.*, 16(1), 73–76.
12. Cazenave, A., & Daillet, S. (1981). Lunar Tidal Acceleration from Earth Satellite Orbit Analyses. *Journal of Geophysical Research.*, 86(B3), 1659–1663.
13. Christodoulidis, D. C., Smith, D. E., Williamson, R. G., & Klosko, S. M. (1988). Observed Tidal Braking in the Earth/Moon/Sun System. *J. Geoph. Res.*, 93(B6), 6216–6236.
14. Platzman G. W. (1985). The role of the earth tides in the balance of tidal energy // *Journal of Geophysical Research*, 90(B2), 1789–1793.
15. Schiwderski, E. W. (1985). On tidal friction and the decelerations of the earth's rotation and moon's revolution. *Marine Geodesy*, 9(4), 399–450.
16. Lambeck K. (1977). Tidal dissipation in the oceans: astronomical, geophysical and oceanographic consequences. *Philos. Trans. R. Soc. London*, A 287, 545–594.
17. Ponsar, S., Dehant, V., Holme, R., Jault, D., Pais, A., & Van Hoolst, T. (2003). The core and fluctuations in the Earth's rotation. In V. Dehant, K. C. Creager, S-I. Karato, & S. Zatman (Eds.), *Earth's core dynamics, structure, rotation* (pp. 251–261). American Geophysical Union. Geodynamics Series. Washington, DC: American Geophysical Union.
18. Shum, C. K., Andersen, O. B., & Egbert, G. (1997). Comparison of Newly Available Deep Ocean Tide Models by the TOPEX/POSEIDON Science Working Team. *Journal of Geophysical Research*, 102(C11), 25173–25194.
19. Matsumoto, K., Takanezawa, T., & Ooe, M. (2000). Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data. *J. Oceanography*, 56, 567–581.
20. Dehant, V., Defraigne, P., & Wahr, J. M. (1999). Tides for a convective Earth. *Journal of Geophysical Research*, 104(B1), 1035–1058.
21. Gillet, N., Jault, D., & Finlay, C. C. (2015). Planetary gyre, time-dependent eddies, torsional waves, and equatorial jets at the Earth's core surface. *J. Geophys. R, Solid Earth*, 120, 3991–4013. doi:10.1002/2014JB011786.
22. Hay, C. C., Morrow, E., Kopp, R.E., Mitrovica, J. X. (2015). Probabilistic reanalysis of twentieth-century global sea-level rise. *Nature*, 517, 481–484.

23. Sabadini, R, Riccardo, E. M. R., & Via, G. D. (2007). Coseismic rotation changes from the 2004 Sumatra earthquake: the effects of Earth's compressibility versus earthquake induced topography. *Geophys. J. Int.*, 171, 231–243.

24. Xu Changyi, & Sun Wenke. (2012). Co-seismic Earth's rotation change caused by the 2012 Sumatra earthquake. *Geodesy and Geodynamics*, 3(4), 28–31. doi:10.3724/SP.J.1246.2012.00028.

Received 29.11.2017

© V. Yu. Timofeev, E. V. Boyko, D. G. Ardyukov,
A. V. Timofeev, I. S. Sizikov, D. A. Nosov, 2018