



ON SMALL TANGENTIAL MASS FORCES THAT MAY EXIST IN THE LITHOSPHERE. THEIR ROLE IN TECTONICS AND GEODYNAMICS

Yu. L. Rebetsky

O.Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS, Moscow, Russia

Abstract: The author continues to investigate additional planetary-level stresses that occur in the crust due to distributed tangential mass forces. Such forces may be related to the daily rotation of the Earth and movements of the relatively solid core relative to the geocenter. In [Rebetskii, 2016], he discusses how the tangential mass forces in the continental crust are influencing additional meridional and latitudinal stresses and attempted to explain regularities of planetary fracturing. In this paper, he considers the role of the tangential mass forces in the occurrence of lateral movement of the lithospheric plates.

The author proposes to estimate amplitudes of the tangential mass forces from the difference between the two global ellipsoids of rotation. The reference ellipsoid averages the level surface of the gravity potential, and the second ellipsoid averages the physical surface of the Earth, separately considering continents and oceans. The Earth's dynamic compression factor estimated from satellite data is 1/305.5. This value corresponds well to the average polar compression of the two rotation ellipsoids, which approximately describes the shape of the Earth's physical surface. Thus, in the first approximation, the polar compression of the Earth's physical surface is less than that of the reference ellipsoid (1/298.25) that approximately describes the shape of the level surface of gravity (i.e. geoid).

Gravity vectors deviate from the normal to the physical surface of the Earth by relatively small angles, according to calculations from the data on rotation ellipsoids (a maximum value of 16.4° at the 45° latitude). Tangential mass forces are thus small ($2.15 \cdot 10^{-4}$ G/cm³ at the 45° latitude). Due to small tangential forces, shear stresses about 0.3 MPa may occur at the base of the continental lithosphere (depths of 120–150 km). In their turn, such stresses can cause a shear flow in the asthenosphere, which provides for movements of the lithospheric plates at velocities of a few centimeters per year. The estimates in this study suggest that the tangential mass forces can be viewed as a possible source of the movements of the lithospheric plates.

Regional rotation ellipsoids, that average the physical surface of the continental and oceanic parts of the Earth, were estimated separately for the northern and southern hemispheres. The largest deviations of the ellipsoids from the reference ellipsoid were revealed for the oceanic parts of both hemispheres of the Earth. The regional ellipsoids for the oceanic parts show smaller polar compression (1/313.1 in the northern hemisphere, and 1/306.9 in the southern hemisphere) than that of the reference ellipsoid, and this predetermines the north-south orientation of the tangential mass forces from the poles to the equator. Compared to the reference ellipsoid, polar compression values estimated for the regional ellipsoids of the continental crust are larger (1/296.2) in the northern hemisphere and smaller (1/303.2) in the southern hemisphere. According to the calculations, the oceanic lithosphere makes the major contribution to submeridional movements of the continental plates.

Key words: centrifugal forces of the Earth rotation; gravity potential; reference ellipsoid; deviations of the plumb line; tangential mass forces; planetary stresses; lithospheric plates

Recommended by E.V. Sklyarov

For citation: Rebetsky Yu.L. 2016. On small tangential mass forces that may exist in the lithosphere. Their role in tectonics and geodynamics. *Geodynamics & Tectonophysics* 7 (4), 691–704. doi:10.5800/GT-2016-7-4-0229.

Для цитирования: Ребецкий Ю.Л. О возможности существования в литосфере малых тангенциальных массовых сил. Их роль в тектонике и геодинамике // *Геодинамика и тектонофизика*. 2016. Т. 7. № 4. С. 691–704. doi:10.5800/GT-2016-7-4-0229.

О ВОЗМОЖНОСТИ СУЩЕСТВОВАНИЯ В ЛИТОСФЕРЕ МАЛЫХ ТАНГЕНЦИАЛЬНЫХ МАССОВЫХ СИЛ. ИХ РОЛЬ В ТЕКТОНИКЕ И ГЕОДИНАМИКЕ*

Ю. Л. Ребецкий

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

Аннотация: Продолжено исследование проблемы формирования в коре дополнительных планетарных напряжений от действия тангенциальных распределенных массовых сил. Генезис таких сил может быть связан с суточным вращением Земли и с перемещениями твердого ядра относительно геоцентра. Если в работе [Rebetskii, 2016] изучалось влияние тангенциальных массовых сил в континентальной коре на формирование дополнительных меридиональных и широтных напряжений с целью объяснения закономерности формирования планетарной трещиноватости, то в этой статье рассматривается роль тангенциальных массовых сил в возникновении латеральных движений литосферных плит.

Предложено амплитуды таких тангенциальных массовых сил рассчитывать на основе данных о разности двух глобальных эллипсоидов вращения. Первый усредняет уровневую поверхность потенциала силы тяжести (референс-эллипсоид), а второй – физическую поверхность Земли отдельно в ее континентальной и океанической части. Показано, что коэффициент динамического сжатия Земли, равный $1/305.5$ и полученный из спутниковых измерений, хорошо соответствует среднему полярному сжатию двух эллипсоидов вращения, приближенно описывающему форму физической поверхности Земли. Таким образом, в первом приближении физическая поверхность Земли имеет меньшее полярное сжатие, чем референс-эллипсоид ($1/298.25$), приближенно описывающий форму уровневой поверхности силы тяжести (геоид).

Углы уклонения вектора силы тяжести от нормали к физической поверхности Земли, рассчитанные по данным эллипсоидов вращений, имеют достаточно малые значения (максимальное значение 16.4 с на широте 45°), что определяет малые значения и тангенциальных массовых сил ($2.15 \cdot 10^{-4}$ г/см³ на широте 45°). Столь малые тангенциальные силы способны привести к появлению у подошвы континентальной литосферы (глубины 120 – 150 км) касательных напряжений порядка 0.3 МПа. Напряжения такого уровня, в свою очередь, создают в астеносфере сдвиговое течение, обеспечивающее скорости движения литосферных плит в первые сантиметры в год. Выполненные оценки позволяют рассматривать тангенциальные массовые силы как возможный источник движения литосферных плит.

Расчеты региональных эллипсоидов вращения, усредняющих физическую поверхность континентальной и океанической части Земли, проведенные отдельно в Северном и Южном полушариях, показали, что в океанической части Земли обоих полушарий наблюдаются наибольшие отклонения этих эллипсоидов от референс-эллипсоида. Океанические региональные эллипсоиды имеют меньшее полярное сжатие (Северное полушарие $1/313.1$, Южное полушарие $1/306.9$), чем референс-эллипсоид, что определяет меридиональную ориентацию тангенциальных массовых сил от полюсов к экватору. Региональный эллипсоид для континентальной коры Северного полушария имеет большее ($1/296.2$), а региональный эллипсоид для континентальной коры Южного полушария – меньшее ($1/303.2$) полярное сжатие, чем референс-эллипсоид. Из результатов расчетов следует, что океаническая литосфера создает наибольший вклад в субмеридиональное движение континентальных плит.

Ключевые слова: центробежные силы вращения Земли; потенциал силы тяжести; референс-эллипсоид; уклонения отвесной линии; тангенциальные массовые силы; планетарные напряжения; литосферные плиты

* Статья рекомендована к печати двумя рецензентами, представляет интерес для читателей журнала в связи с акцентированием внимания на тангенциальных массовых силах как одном из существенных источников движения литосферных плит. Она публикуется в разделе «Дискуссия», поскольку большинством исследователей, к которому относятся и многие члены редколлегии журнала, в качестве главного источника перемещений плит принимается тепловая энергия, создающая конвекцию в мантии Земли (Примеч. гл. ред.).

1. ВВЕДЕНИЕ

В геодинатике рассматриваются три основных энергетических источника напряжений в литосфере. Это энергия сил гравитации, тепловая энергия и кинетическая энергия вращающейся планеты. Первый источник обычно определяется как фактор, вносящий основной вклад (гравитационные массовые силы) в вертикальные силы тяжести. С этими массовыми силами связано литостатическое (вес вышележащих пород) и всестороннее давление, повышающееся с глубиной, и определенный уровень девиаторных напряжений. Второй энергетический источник считается ответственным за мантийную конвекцию [Trubitsyn, 2000], латеральные движения литосферных плит и плюм-тектонику [Dobretsov, 2010]. Третий фактор, связанный с действием *центробежных сил* (ЦС) вращающейся Земли [Stovas, 1975a, 1975b], вносит небольшой вклад в силу тяжести и часто упоминается в исследованиях по геодинатике как источник влияния на особенности азимутального распределения планетарной трещиноватости [Schultz, 1973; Schultz, Nikolaeva, 1976]. С вращением планеты связывают появление в коре и литосфере дополнительных *тангенциальных массовых сил* (ТМС). В настоящей работе поставлена задача оценить уровень таких ТМС и их влияние на напряженное состояние литосферы.

Согласно работам [Love, 1909; Jeans, 1917] считается, что форма Земли близка к уровневой поверхности потенциала сил тяжести – геоида, представляющего собой сумму гравитационного потенциала и потенциала ЦС. Необходимость учета ЦС связывают с ускорением или замедлением вращения планеты. Из-за этого форма Земли не соответствует изменившейся форме геоида, и поэтому в литосфере могут появляться дополнительные ТМС. Впервые подобные расчеты были сделаны в работах [Leibenzon, 1910].

Наиболее настойчиво о роли ЦС в геодинатике писал советский ученый М.В. Стовас. В его работах [Stovas, 1975a, 1975b] были выполнены оценки напряжений, вызываемых изменением полярного сжатия из-за замедления вращения планеты. Он опирался на данные о том, что за последние 2.5 тысячи лет увеличение земных суток составило 0.0024 с (около 10^{-6} с за год или $1.16 \cdot 10^{-11}$ от полного оборота Земли). Согласно этим данным уменьшение скорости вращения должно приводить к соответствующему уменьшению полярного сжатия для эллипсоида вращения, характеризующего в планетарном масштабе усредненную уровневую поверхность потенциала силы тяжести. Считается, что физическая поверхность Земли не успевает осуществить соответствующие изменения (ее эл-

липсоид вращения сохраняет большее полярное сжатие, отвечающее скорости вращения Земли предыдущих геологических эпох). Согласно расчетам М.В. Стоваса при изменении полярного сжатия $d\varepsilon = 10^{-7}$ уровень меридиональных нормальных напряжений в коре лежит в диапазоне от -230 до 130 дин/см² (от -23 до 13 Па). Это очень низкий уровень напряжений, много меньший (на 4.0–4.5 порядка) величины напряжений, действующих в сейсмоактивных областях [Rebetsky, Marinin, 2006; Rebetskii, 2009; Rebetsky, 2015; Rebetsky et al., 2013].

Здесь возникает вопрос не только по уровню полученных напряжений, но и по принятому М.В. Стовасом значению $d\varepsilon = 10^{-7}$. Выполним анализ выбранного М.В. Стовасом значения изменения полярного сжатия.

Само изменение полярного сжатия возникает из-за меняющегося соотношения между ускорением силы тяжести ($g = 9.87$ м/с²), обусловленным только гравитационным взаимодействием (сила тяжести на экваторе), и ускорением от центробежных сил суточного вращения Земли ($\omega^2 R$ при угловой скорости вращения $\omega \approx 7.29 \cdot 10^{-5}$ с⁻¹ и среднем экваториальном радиусе $R = 6380$ км). Можно показать, что отношение этих параметров (около 288) определяет сегодняшнюю форму Земли, т.е. ее полярное сжатие ε . Таким образом, в первом приближении изменение скорости вращения пропорционально изменению полярного сжатия ($d\omega \approx 2gd\varepsilon/\omega R$). В связи с этим значению $d\varepsilon$, принятому М.В. Стовасом, будет отвечать увеличение угловой скорости вращения на величину $d\omega \approx 1.06 \cdot 10^{-9}$ с⁻¹. При таком изменении угловой скорости время суток изменится на величину 0.125 с, которая, согласно представленным выше результатам наблюдений, может накопиться за время порядка 125 тыс. лет. Выбранный временной диапазон для $d\varepsilon$ в расчетах М.В. Стоваса много больше времени релаксации напряжений в мантии, а также в средней и нижней коре. В связи с этим непонятно, почему была взята величина изменения полярного сжатия за такой период времени.

При оценке планетарных напряжений кроме обоснования уровня деформирующих инерционных сил проблемой является само построение решения задачи механики. Получить точные оценки напряжений, вызываемых действием ЦС в тектосфере Земли (кора и мантия), достаточно сложно. В упругой постановке в приложении к шару или сферическому слою подобные решения рассматривались в работах [Leibenzon, 1910; Love, 1927; Molodensky, 1989; Stovas, 1975a, 1975b]. В расчетах Л.С. Лейбензона и А. Лява рассматривалось несжимаемое упругое тело в приближении малых деформаций шара, находящегося под действием внешней деформирующей силы от потенциала сил гравита-

ции и вращения планеты. В работе М.С. Молоденского выполнялся расчет напряжений с учетом деформированного состояния земного шара и изменения плотности, но для случая начального гидростатического напряженного состояния, действовавшего до приложения внешней деформирующей силы от потенциала, отвечающего вращению планеты. В расчетах напряжений в сфере М.В. Стывасом рассматривалось упругое сжимаемое тело, но в качестве решения бралось общее решение уравнений Ламе [Parkovich, 1939]. Считалось, что оно отвечает деформациям коры, обусловленным давлением со стороны мантии из-за действия в ней ЦС. Все решения имеют достаточно сложный вид, за которым пропадает понимание механизма формирования напряжений в коре.

Для того чтобы эти механизмы стали более понятны, влияние инерционных ЦС F^ω следует разделить на два фактора. Первый фактор связан с влиянием ЦС в первую очередь на изменение формы всей планеты. Здесь основную роль играет мантия, деформирование которой формирует эллипсоидальную форму Земли. Полученный в расчетах Л.С. Лейбензона [Leibenzon, 1910] очень высокий уровень девиаторных напряжений порядка модулей упругости связан с упругой моделью среды. Наличие вязкой реологии мантии приводит к релаксации этих напряжений и переходу упругих деформаций в необратимые.

В коре изменение формы планеты приводит к появлению дополнительного меридионального сжатия вблизи полюса и дополнительного меридионального растяжения вблизи экватора. Характер этих дополнительных напряжений мало зависит от глубины. Вблизи широты 45° кора вместе с литосферой испытывает наибольший изгиб, здесь будут действовать большие «перерезывающие» касательные напряжения, а само напряженное состояние должно сильно изменяться с глубиной. Можно ожидать, что такие дополнительные напряжения в верхней части коры, которую следует рассматривать как упругохрупкое тело, сохраняются наиболее долго. Но несомненно то, что за сотни миллионов лет преобразования, происходящие в коре, должны стереть влияние этих напряжений.

Второй фактор влияния ЦС на напряжения в коре связан с несовпадением физической поверхности Земли и уровневой поверхности потенциала силы тяжести при усреднении в масштабе в сотни километров. В этом случае в коре будут действовать ТМС, появляющиеся из-за отклонения силы тяжести от нормали к физической поверхности Земли. Такие силы сами по себе не являются напряжениями, хотя их и порождают и поэтому не могут релаксировать. ТМС обусловлены отклонением Земли от формы, отвечающей ее жидкому

состоянию, в котором отвесная линия нормальна к физической поверхности Земли в любой точке.

На самом деле причиной формирования ТМС может являться не только изменение скорости вращения планеты, но и изменение конфигурации ее внутренних объемов, например положения твердого и тяжелого ядра. Вокруг Солнца перемещается система Земля – Луна, траектория которой определяется центром тяжести этой пары [Avsyuk, 1993]. Соответственно имеет место не только вращение Земли вокруг своей оси, но и вращение Земли и Луны вокруг своего центра тяжести. В процессе движения расстояние между Землей и Луной и наклон плоскости их взаимного вращения изменяются (причина, вероятно, во взаимодействии с внешними объектами). Эти изменения способны не только менять скорость вращения Земли вокруг своей оси, но и отклонять твердое ядро Земли от ее геоцентра [Barkin, 2005]. Такое отклонение, так же как и изменение скорости вращения, меняет положение поверхности геоида.

В настоящей работе главным было выявление возможного уровня ТМС и их геодинамические следствия. В работе [Rebetskii, 2016] величина ТМС задавалась априорно из предположения, что полярное сжатие физической поверхности Земли меньше полярного сжатия референс-эллипсоида, усредняющего уровневую поверхность потенциала силы тяжести, причем максимальные углы между нормальными к этим двум поверхностям на широте 45° составляют 10 с (рис. 1). Считалось, что с некоторых глубин начальное напряженное состояние, обусловленное действием вертикальной составляющей силы тяжести, уже находится за пределом упругости. В этом случае максимальное значение ТМС F_θ , рассчитанное для плотности пород $\rho = 2.7$ г/см³ и наблюдаемое на широте 45° , будет равно 0.00013 г/см³. В работе [Rebetskii, 2016] показано, что, несмотря на столь малые величины ТМС, они способны вносить значимый вклад в общее напряженное состояние коры (дополнительные меридиональные напряжения достигают 80 – 90 бар), приводя к изменению геодинамического типа напряженного состояния в верхних слоях коры (глубины менее 4 км).

Выполненные в работе [Rebetskii, 2016] оценки дополнительных напряжений в коре опирались на предположение, что ТМС уравниваются нормальными (меридиональными и широтными) напряжениями, а касательные напряжения на площадках, параллельных сфере Земли, нулевые. В этом случае меридиональные напряжения, уравнивающие ТМС, достигают максимума вблизи экватора.

В этой работе будет рассмотрен другой крайний случай уравнивания ТМС только за счет дей-

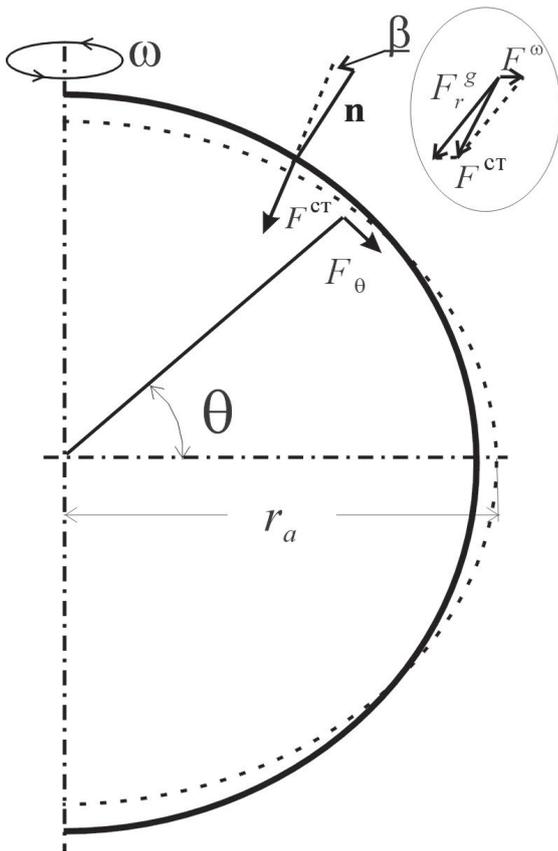


Рис. 1. Схема, объясняющая появление в коре ТМС F_θ от потенциала сил тяжести при использовании модели сфероида WGS 84 (более сплюснутый на полюсе пунктирный эллипс с нормалью F^{cm}) и формы физической поверхности Земли (сплошной эллипс с нормалью n) в виде менее сжатого сфероида. Вектор силы тяжести F^{cm} складывается из сил гравитации F_r^g и центробежных сил F^ω .

Fig. 1. The scheme explaining the occurrence of tangential mass forces (F_θ) in the crust due to the gravity potential. Spheroid WGS 84 is shown by a dashed-line ellipse that is more compressed at the pole (normal F^{cm}). The physical surface of the Earth is shown by a solid-line ellipse (normal n); it has the form of a less pole-compressed spheroid. The vector of gravity forces (F^{cm}) is estimated from a sum of gravity forces (F_r^g) and centrifugal forces (F^ω).

ствия касательных напряжений на подошве литосферы. В рамках такой постановки будет произведена оценка скорости движения литосферных плит, вызванного ТМС.

В рамках новой глобальной тектоники ответственной за латеральный дрейф континентов считается мантийная термогравитационная конвекция. Сверхадиабатическая температура мантии и достаточно низкие коэффициенты ее вязкости (10^{17-21} Па·с), применяемые в численных расчетах, дают возможность определить геометрию перемещений поверхности (скорости движения лито-

сферных плит) и структуры течения в мантии, которые вроде бы хорошо сопоставляются с различными типами геофизических данных. Результаты проведенных в настоящей статье исследований ТМС позволяют вернуться к идее А. Венегера [Wegener, 1929], связывавшего силы дрейфа плит непосредственно с формой Земли.

2. УЧЕТ ПРИ РАСЧЕТЕ ТМС РЕАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Земля по форме близка к эллипсоиду вращения – сфероиду. Сфероид, наилучшим образом приближенный к геоиду, именуется референс-эллипсоидом и в геодезии является отсчетной поверхностью для определения топографических высот. В настоящее время для глобального референс-эллипсоида используется модель WGS 84, в которой полярное сжатие $\varepsilon \approx 1/298.26$:

$$r = r_a(1 - \varepsilon \sin^2 \theta), \quad (1)$$

где r – радиус точки на поверхности эллипсоида, а $r_a \approx 6378.137$ км является экваториальным радиусом референс-эллипсоида, θ – угол (широта), отсчитываемый от экватора. При указанном полярном сжатии уменьшение радиуса на полюсе составит $\delta r \approx 21.385$ км. Нормаль к поверхности референс-эллипсоида определяет направление отвесной линии, т.е. силы тяжести F^{cm} (рис. 1). Особо отметим, что r_a является экваториальным радиусом референс-эллипсоида, а не твердой поверхности Земли. Референс-эллипсоид проходит внутри континентальной коры и над поверхностью океанической коры. Если уплотнить воду до плотности пород океанической коры, то референс-эллипсоид нигде не будет совпадать с положением твердой поверхности такой модели планеты.

В рамках приближения уровневой поверхности потенциала силы тяжести референс-эллипсоидом существует и *приближенное* аналитическое выражение для вычисления потенциала силы тяжести за пределами физической поверхности Земли (R, θ), в которое при учете симметрии Земли входят моменты инерции ($C, A=B$), масса (M) и угловая скорость вращения планеты (ω) [Stacey, 1969]:

$$U(R, \theta) = -\frac{GM}{R} \left[1 + 0.5 \left(\frac{R_a}{R} \right)^2 J_2 (1 - 3 \sin^2 \theta) + 0.5 \left(\frac{R}{R_a} \right)^3 m \cos^2 \theta \right] \quad (2)$$

при $R \geq R_a$,

где $J_2 = \frac{C-A}{MR_a^2}$, $m = \frac{R_a^3 \omega^2}{GM}$, а $G \approx 6.67384 \cdot 10^{11}$ м³/(с²·кг) – гравитационная постоянная. Заметим,

что здесь R_a – экваториальный радиус физической Земли, так как второе слагаемое в выражении (2) характеризует часть потенциала силы тяжести, связанного с гравитационными силами в приближении земной поверхности эллипсоидом вращения типа (1). Обычно в теоретических расчетах полагают $r_a = R_a$, но на самом деле это разные параметры. Таким образом, выражение (2) является приближенным описанием потенциала силы тяжести в рамках модели эллипсоидальной Земли.

Моменты инерции C и A в выражении для J_2 прямо характеризуют форму Земли, но они математическим путем не могут быть вычислены, так как недостоверно известно глубинное распределение плотности. По спутниковым данным оценено значение коэффициентов $J_2 \approx 1.0827 \cdot 10^{-3}$, $m \approx 3.4678 \cdot 10^{-3}$ и отношение:

$$H = \frac{C-A}{C} \approx \frac{1}{305.51}. \quad (3)$$

Его часто называют динамическим сжатием. Если полагать, что поверхность физической Земли также представляет собой эллипсоид вращения, т.е. может быть описана выражением, подобным (1), то для планеты однородной плотности отношение (3) можно преобразовать к виду:

$$H = \frac{R_a^2 - R_c^2}{2R_a^2} = \varepsilon_R - 0.5\varepsilon_R^2 \approx \varepsilon_R. \quad (4)$$

Здесь ε_R – полярное сжатие физической поверхности Земли, а R_c – полярный радиус физической поверхности Земли.

Если использовать коэффициент динамического сжатия H в качестве значения полярного сжатия ε_R , то максимальное отклонение нормали к поверхности усредняющего эллипсоида от отвесной линии составит около $\beta \approx 16.4$ с на широте 45° (рис. 1). Таким образом, полученная здесь оценка угла отклонения поверхности референс-эллипсоида от физической поверхности Земли на 64 % больше, чем при расчетах, выполненных в работе [Rebetskii, 2016]. В силу этого можно ожидать, что ТМС F_θ в этом случае создадут в коре дополнительные меридиональные напряжения сжатия порядка 130–140 бар. В этом случае изменятся также глубины внутренних границ коры, на которых происходит смена геодинамического типа напряженного состояния.

На самом деле определение реальной поверхности Земли было крайне сложной проблемой еще 50 лет назад, когда отсутствовали космические технологии. Именно поэтому для описания топографии в качестве отсчетной поверхности использовался референс-эллипсоид, связанный с потенциалом силы тяжести. В настоящее время суще-

ствуют достаточно точные данные по топографии земной поверхности (цифровые данные с точностью до 1–2 с) как для континентов, так и для океанического и морского дна. В связи с этим имеется возможность рассчитать усредненную поверхность Земли в виде эллипсоида вращения, наиболее хорошо приближенного к реальной топографии.

Для поиска параметров такого эллипсоида были выполнены расчеты полярного сжатия и среднего экваториального радиуса отдельно для континентальной и океанической поверхности Земли. При этом для континентальной поверхности (высоты более 10 м) не учитывались горные области с высотами более 1000 м, а для океанической поверхности (глубины дна более 10 м) не учитывались глубины дна более 5000 м и менее 2000 м. Таким образом, в расчетах континентов и океанического дна брались наиболее ровные участки поверхности. Для океанической поверхности Земли вода сжималась до плотности коры (2.7 г/см^3).

Результаты расчетов показали, что для континентальной поверхности наилучшее приближение дает эллипсоид вращения с параметрами $R_a \approx 6378.447$ км и $\varepsilon_R \approx 1/300.6$ (полярное сжатие $\delta r \approx 21.219$ км), а для океанической поверхности $R_a \approx 6375.755$ км и $\varepsilon_R \approx 1/311.5$ (полярное сжатие $\delta r \approx 20.468$ км). Поскольку подобранные эллипсоиды описывают положение поверхности континентальной и океанической литосферы для всей планеты, будем их именовать *глобальными эллипсоидами*. На рис. 2 условно показаны глобальные эллипсоиды вращения для континентов и океанов в их соотношении с эллипсоидом, отвечающим уровневой поверхности потенциала силы тяжести. При этом расчетная площадь для континентов составляла 25.2 %, а для океанов – 54.5 % от общей площади планеты. Если использовать полученные значения коэффициентов полярного сжатия, то для континентов максимальное отклонение нормали к поверхности усредняющего эллипсоида от отвесной линии составит около $\beta \approx 5.4$ с, а для океанов – $\beta \approx 29.4$ с.

Отметим, что как в случае использования для оценки параметров усредненного эллипсоида физической поверхности Земли в виде динамического коэффициента (5), так и для значений глобальных эллипсоидов, рассчитанных отдельно для континентальной и океанической литосферы, в обоих полушариях имеет место отклонение отвесной линии (вектор F^{cm}) от нормали к поверхности (n) в одну и ту же сторону, к полюсам (см. рис. 1). При этом большие значения углов β для океанической литосферы говорят и о больших величинах ТМС, которые будут в ней действовать.

В работах К. Буллена [Bullen, 1936; Bullen, Haddon, 1973] приведены оценки сжатия сфероидов – уров-

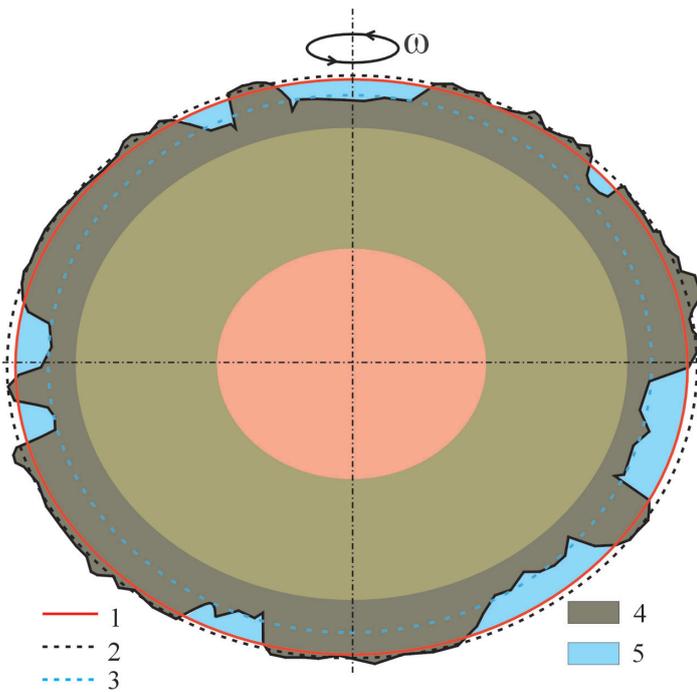


Рис. 2. Схема, иллюстрирующая соотношение эллипсоидов вращения, приближающих поверхности континентов – черный пунктир (2), дна океанов с учетом уплотнения океанической воды – синий пунктир (3) и уровневую поверхность потенциала силы тяжести (WGS 84) – красная линия (1): (4) – океаны, (5) континентальная и океаническая литосфера.

Fig. 2. The scheme illustrating the ratio of the ellipsoids of rotation. Approximated continental surfaces – black dashed lines (2), oceanic bottoms (with account of compaction of ocean water) – blue dashed lines (3), surface levels of gravity potential (WGS 84) – red lines (1): oceans (4), continental and oceanic lithosphere (5).

невых поверхностей потенциала силы тяжести внутри Земли (глубины 1000, 2000 км, ...), вытекающие из гидростатического приближения напряженного состояния (отсутствие дифференциальных напряжений) и в предположении постоянства плотности внутренних слоев. Из результатов К. Буллена следует, что с глубиной степень сжатия сфероидальных слоев уменьшается (на глубине 1000 км $\varepsilon_R \approx 1/328$).

В случае поведения пород на больших временах, подобного жидкости, физические поверхности слоев и уровневые поверхности потенциала силы тяжести стремятся совпасть. Но данный вывод в первую очередь необходимо относить к астеносфере, которая, вероятно, имеет наименьшую вязкость в мантии из-за близости ее температуры к точке плавления, где уровень девиаторных напряжений действительно достаточно мал (менее 1 МПа). Породы литосферы и тем более коры сохраняют до-

статочно высокий уровень девиаторных напряжений, поэтому можно ожидать, что в них будет сохраняться различие между физической поверхностью внутренних границ и уровневой поверхностью потенциала силы тяжести. Далее будем полагать, что на подошве коры и литосферы сохраняется разница между усредненными сфероидами, характеризующими их физическую поверхность, и моделью WGS 84, отвечающей уровневой поверхности потенциала силы тяжести.

Если рассчитать среднее для океанической и континентальной поверхности полярное сжатие (с учетом площадей расчета), то оно составит $\bar{\varepsilon}_R \approx 1/308$. Это значение достаточно близко к величине динамического сжатия Земли (3).

Будем далее в наших расчетах использовать значение коэффициента динамического сжатия ($\bar{\varepsilon}_R = H$) в качестве параметра модели усредненно-эллипсоида земной поверхности. Будем считать, что в этом случае для распределенной ТМС имеет место следующее соотношение:

$$\begin{aligned} \bar{F}_\theta &= |\bar{F}_\theta| \sin 2\theta \text{ при } |F_\theta| = \chi \rho g \\ &\text{и} \\ \chi &= \varepsilon - \varepsilon_R \approx 7.97 \cdot 10^{-5}. \end{aligned} \quad (5)$$

Черта над \bar{F}_θ определяет среднее для литосферы значение. Максимальное значение ТМС на широте 45° составит $|\bar{F}_\theta| \approx 2.15 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^3$.

Отметим одно важное обстоятельство. При отдельной оценке формы глобальных эллипсоидов вращения для континентальной и океанической части земной поверхности значение полярного сжатия для континентов ближе к значению ε , отвечающему референс-эллипсоиду. Это говорит о том, что ТМС в континентальной литосфере будут почти на порядок меньшими, чем в океанической, т.е. океанические плиты будут являться основным фактором, определяющим движение плит.

3. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТМС НА ДВИЖЕНИЕ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ

Рассмотрим следствие возникновения в литосфере ТМС. Важно отметить, что полученные выше углы отклонения силы тяжести от нормали к поверхности физической Земли дают однонаправленные ТМС на больших площадях: 1) на полушариях в случае использования данных о коэффициенте динамического сжатия; 2) на континентальной и океанической литосфере полушарий в случае использования усреднения рельефа. Такие однонаправленные силы требуют уравнивания, что приводит к появлению дополнительных напряжений.

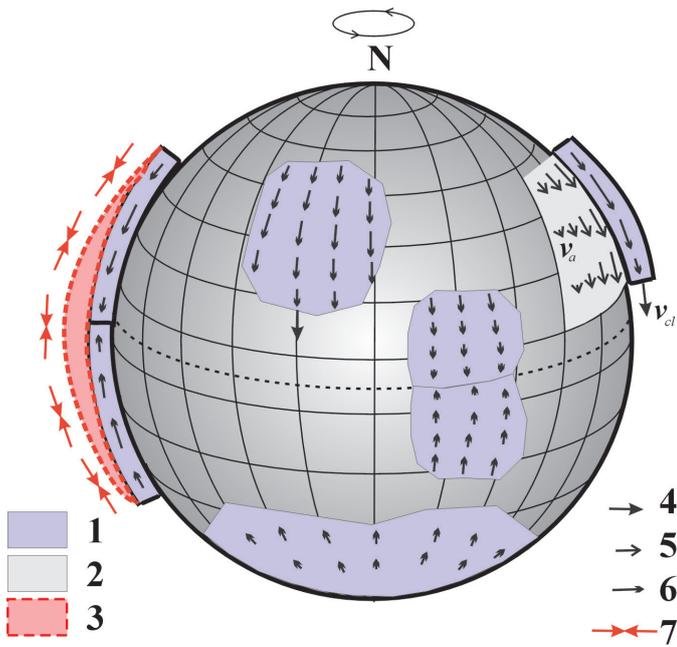


Рис. 3. Схемы, иллюстрирующие гипотезу о движениях континентов под воздействием ТМС F_θ . 1 – континентальная литосфера (план и вертикальное сечение); 2 – сечение астеносферы под континентальной литосферой; 3 – распределение величин тангенциальных напряжений $\sigma_{\theta\theta}$ в континентальной литосфере двух континентов, столкнувшихся у экватора (по работе [Rebetskii, 2016]); 4 – направление движения континента v_{cl} ; 5 – направление и амплитуды скорости меридионального течения v_a в астеносфере (в этом же направлении действуют касательные напряжения $\sigma_{r\theta}$); 6 – ТМС в континентальной литосфере (план и вертикальное сечение); 7 – направления действия дополнительного тангенциального меридионального напряжения $\sigma_{\theta\theta}$.

Fig. 3. Schemes illustrating the hypothesis of continental drift under the influence of tangential mass forces (F_θ). 1 – continental lithosphere (plan and vertical cross-section); 2 – asthenosphere beneath continental lithosphere (cross-section); 3 – distribution of tangential stress values ($\sigma_{\theta\theta}$) in continental lithosphere of two continents that collided at the equator (from [Rebetskii, 2016]); 4 – direction of continental drift (v_{cl}); 5 – directions and velocity amplitudes of meridional flow (v_a) in asthenosphere (shear stresses $\sigma_{r\theta}$ operate in the same direction); 6 – tangential mass forces in continental lithosphere (plan and vertical cross-section); 7 – direction of additional tangential meridional stress ($\sigma_{\theta\theta}$).

Если рассматривать уединенный континент, занимающий небольшую часть сферы (континент в Северном полушарии, рис. 3) и расположенный в средних широтах, то для него можно полагать, что торцевые напряжения $\sigma_{\theta\theta}$ на границах континентальной литосферы близки к нулю. В связи с этим существующие в континентальной литосфере ТМС

(на этих широтах они близки к максимальным) в первую очередь будут уравниваться действующими в подлитосферной мантии (астеносфере) касательными напряжениями $\sigma_{r\theta}$ (вертикальное сечение континента в Северном полушарии на востоке). Такие касательные напряжения также будут иметь место и в самой литосфере (в полученных выше решениях они отсутствовали). Простое выражение для этих напряжений получим, если при интегрировании ТМС по глубине (рис. 4, h_l – мощность континентальной литосферы) положить их равными средним значениям для континентальной литосферы $|F_\theta| \approx 2.5 \cdot 10^{-4}$ г/см³ (угол $\beta \approx 19^\circ$ на широте 45°):

$$\sigma_{r\theta} = h_l F_\theta. \quad (6)$$

Из (6) находим, что уровень уравнивающих их касательных напряжений, возникающих в астеносфере, будет порядка $\sigma_{r\theta} \approx 0.3 - 0.4$ МПа (3–4 бара). Это очень низкий уровень напряжений, который способен создать скорость сдвиговых деформаций только порядка $3-4 \cdot 10^{-15}$ с⁻¹ в астеносфере с вязкостью 10^{20} Па·с. Однако при мощности астеносферы 200–400 км эти малые скорости сдвиговых деформаций способны создать скорость латерального движения континентальной литосферной плиты порядка 2–4 см/год, что соответствует современным данным.

Если вязкость астеносферы понизить на порядок (10^{19-20} Па·с – значение вязкости, оцениваемое по данным гляциоизостази [Artyushkov, 1979]), то скорости сдвигового течения в астеносфере и скорости движения континентальной литосферы возрастут также на порядок. При этом следует иметь в виду, что рассчитанные касательные напряжения и скорости деформаций в астеносфере, а также скорости движения континентальной литосферы отвечают ее положению для средних широт. В высоких и низких широтах они существенно снижаются. Когда континентальная плита займет положение на экваторе, близкое к симметричному, или когда она вблизи экватора столкнется с другой континентальной плитой,двигающейся от другого полюса (см. рис. 3 – центральная часть), в ней должны формироваться дополнительные напряжения меридионального сжатия $\sigma_{\theta\theta}$ (см. рис. 3 – вертикальное сечение для двух континентов на западе), подобные тем, что фигурировали в расчетах предыдущих разделов. Их уровень будет зависеть от меридионального размера континента или группы континентов, расположенных на экваторе. В литосфере континента, размещенного осесимметрично на полюсе, должны возникать дополнительные растягивающие меридиональные напряжения $\sigma_{\theta\theta}$ (см. рис. 3 – южный полюс).

Известно, что около 250 млн лет назад континенты образовывали два суперматерика – Лавразию и Гондвану, расположенные соответственно вблизи северного и южного полюсов. Считается, что под воздействием тепловой конвекции в мантии происходило растаскивание отдельных континентов этих суперматериков, приводящее к формированию океанических рифтов (Атлантического, Индийского и Южноарктического). Около 135 млн лет назад Индия, а 65 млн лет назад Южная Америка и Австралия откололись от Антарктиды и начали свое движение на север. Евразия медленно движется на юг, а Африка менее всего изменила свое расположение за этот период времени, сместившись с юга на экватор на 2500 км и испытав вращение против часовой стрелки.

В рамках концепции общемантийной конвекции океаническая литосфера является главным источником движения континентальных литосферных плит, которые пассивно «плавают» на термически возбужденной мантии. Рифты располагаются в зонах восходящего горячего потока в мантии, а континенты стремятся переместиться в область наиболее холодной стабильной мантии [Trubitsyn, 2000].

Результаты расчетов ТМС в литосфере континентов и океанов обоих полушарий дают возможность для другой интерпретации данных о палеоположениях континентальных плит [Cox, Hart, 1986]. Предполагается, что источником движений к экватору континентальных и океанических литосферных плит являются ТМС. Если в качестве исходных данных для расчета ТМС принять величину коэффициента динамического сжатия Земли, то из его значения следует, что под действием таких одинаковых в обоих полушариях массовых сил, ориентированных с севера на юг в Северном полушарии и с юга на север – в Южном, происходит медленный дрейф континентов к экватору. Таким осесимметричным дрейфом почти вдоль меридианов можно объяснить обстановку практического всестороннего латерального растяжения в арктической литосфере.

Описание поверхности Земли одним эллипсоидом вращения на основе данных о коэффициенте динамического сжатия Земли представляет собой первый шаг в осмыслении роли ТМС. Получение более достоверного соотношения усредненной поверхности Земли и поверхности референс-эллипсоида требует отдельного расчета для континентов и океанов, а также отдельного анализа состояния Северного и Южного полушарий.

Такие расчеты показали, что в Северном полушарии полярное сжатие эллипсоидов вращения, отвечающих поверхностям континента и океанического дна (с учетом уплотненной воды), состав-

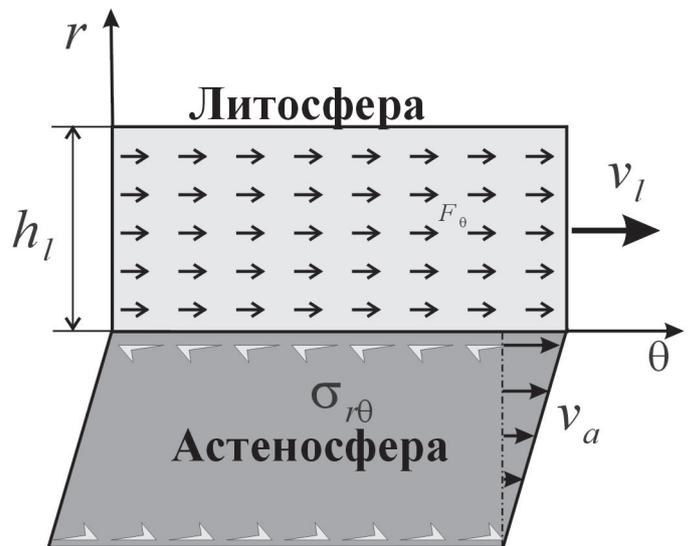


Рис. 4. Схема, объясняющая взаимосвязь ТМС F_θ в литосфере с касательными напряжениями в астеносфере $\sigma_{r\theta} = h_l F_\theta$ (h_l – мощность литосферы) сдвиговым течением в астеносфере v_a и движением литосферной плиты v_l .

Fig. 4. The scheme explaining the relationship between tangential mass forces (F_θ) in the lithosphere and tangential stresses in the asthenosphere $\sigma_{r\theta} = h_l F_\theta$ (h_l – thickness of the lithosphere) as an effect of the shear flow in the asthenosphere (v_a) and movements of the lithospheric plate (v_l).

ляет соответственно $\varepsilon_R \approx 1/296.2$ и $\varepsilon_R \approx 1/313.1$. Это означает, что в континентальной части коры ТМС действуют от экватора к полюсу и они очень малы ($\beta \approx 4.8$ с). В океанической части коры ТМС действуют от полюса к экватору, и они достаточно велики ($\beta \approx 32.8$ с, т.е. в два раза больше, чем в расчете предыдущего раздела). Таким образом, океаническая кора Северного полушария, составляющая примерно 60 % от общей площади, является основным движущим элементом, стремясь сдвинуть континенты (Евразию и Северную Америку) к экватору. ТМС этих континентальных плит тормозят их движение к экватору. Согласно имеющимся данным, Евразия и Северная Америка за последние 135 млн лет испытали наименьшие субмеридиональные смещения из всех континентальных плит.

Аналогичные расчеты для Южного полушария показали, что полярное сжатие эллипсоидов вращения, отвечающих поверхностям континента и океанического дна, составляет соответственно $\varepsilon_R \approx 1/303.2$ и $\varepsilon_R \approx 1/306.9$. Это означает, что в континентальной и океанической части коры ТМС действуют в одном направлении от полюса к экватору и они по величине близки: $\beta \approx 11.3$ с и

$\beta \approx 19.5$ с. Океаническая кора Южного полушария составляет около 72 % от общей площади. Она, так же как и в Северном полушарии, вносит основной вклад в смещение к экватору Индии, Австралии и Южной Америки. При этом ТМС в литосфере континентов являются весомым дополнительным фактором этого движения. Литосфера Антарктиды расположена практически осесимметрично на южном полюсе, здесь ТМС близки к нулю, что, возможно, объясняет ее сохранность как единого целого и стабильность расположения.

Будем далее эллипсоиды вращения, рассчитанные для отдельных полушарий или отдельных тектонических плит, называть соответственно мегарегиональными и региональными (в настоящей работе такие эллипсоиды вращения не рассчитывались).

Амплитуды движений континентальных плит Южного полушария в несколько раз превосходят амплитуды смещений плит Северного. Смещения плит Южного полушария за экватор (Южная Америка, Африка и, возможно, Индийская плита) связаны с более мощным значением ТМС, действующих в их литосфере, чем для плит Северного полушария.

Меридиональное направление действия ТМС, движущих плиты, не означает, что сами движения будут строго вдоль меридиана. Их направление определит взаимодействие плит и тангенциальные граничные напряжения, возникающие вдоль торцов плит. Уже из формы рифта, оконтуривающего Антарктиду, видно, что Южно-Американская и Африканская плиты испытывали в процессе своего движения небольшой разворот соответственно по часовой стрелке и против нее.

Океаническая литосфера, двигаясь к экватору, испытывает дополнительное широтное растяжение, так как перемещается из области коротких параллелей в область более длинных. Так, перемещение с широты 60° на широту 45° требует расширения расстояния (изменение длины окружности земного шара) между плитами порядка 8300 км. При этом формирование субмеридиональных океанических рифтов неотделимо от формирования кольцеобразной системы рифтов в окружении Антарктиды [Siddoway, 2008; Grikurov et al., 2010]

Важно отметить, что предлагаемая концепция, объясняющая источник движения литосферных плит, определяет океанические рифты пассивными, формирующимися из-за латеральных движений самих плит. Более горячая мантия лишь «подтягивается» в зоны растяжения океанической литосферы и, изливаясь к поверхности, формирует новую литосферу.

В рамках такой интерпретации источника движения литосферных плит сигмообразный изгиб

Атлантического рифта вблизи экватора связан с сочленением двух отдельно формирующихся рифтов Южного и Северного полушарий. Причина формирования Атлантического рифта в Северном полушарии выходит за рамки нашего расчета, так как требует другой модели усреднения поверхности физической Земли – сфероида.

Выдвинутая гипотеза источника движения литосферных плит позволяет сделать прогноз напряженного состояния латерального растяжения субокеанической литосферы северного и континентальной литосферы южного полюса. Для литосферы южного полюса данный прогноз отличается от напряженного состояния латерального сжатия, которое должно здесь наблюдаться в случае общемантийной конвекции.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Более 60 лет назад М.С. Молоденский [Molodensky, 1945, 1948] сформулировал задачу по определению физической поверхности Земли, если на ней произведены измерения g (ускорение силы тяжести) и рассчитаны значения потенциала силы тяжести. В рамках такой постановки обратная задача гравиметрии фактически ставилась на граничной поверхности, которую требуется определить. Сейчас, когда спутниковые технологии позволили с очень высокой точностью получить данные о топографии по отношению к референс-эллипсоиду, обратная задача гравиметрии ставится совершенно иначе [Moritz, 1980, 2001]. Необходимо определить значение потенциала силы тяжести на известной поверхности Земли при измеренных на ней значениях g . Данные о градиентах вдоль земной поверхности потенциала силы тяжести и определяют разницу углов отвесной линии от нормали к физической поверхности Земли. Важность понимания в современном мире данных изменения такой важнейшей задачи гравиметрии требует и переосмысления многих проблем в рамках наук о Земле, и в частности проблемы расчета ТМС и порождающих ими планетарных напряжений. Реальность или нереальность полученных в настоящей статье результатов оценок ТМС связана с достоверностью утверждения о несовпадении степени сжатости физической поверхности Земли и геоида в приближении эллипсоидами вращения.

В пользу этой гипотезы следует рассматривать значение полярного сжатия модели геоида Джеффриса [Jeffreys, 1952] $\varepsilon_\sigma \approx 1/299.7$ ($\delta R \approx 21.29$ км), полученное в предположении малости дифференциальных напряжений в мантии планеты – гидростатическое напряженное состояние. Оно несколько меньше, чем полярное сжатие современного

геоида ($\varepsilon_\sigma \approx 1/298.26$), что в ряде работ [Stacey, 1969; и др.] интерпретировалось как запаздывание восстановления формы при замедлении суточного вращения Земли. На самом деле обе поверхности характеризуют не поверхность физической Земли, а форму современного и идеализированного (гидростатического) геоида. Сравнить необходимо геоид и параметры физической поверхности Земли, в частности, вытекающие из динамического коэффициента (3).

Отметим, что в модели Г. Лэмба [Lamb, 1945], использующей идеально жидкую Землю, динамическое и полярное сжатия совпадают и равны $\varepsilon_H \approx 1/232$ ($\delta R \approx 27.5$ км). В работе [Evernden, 1997] различия реального полярного сжатия Земли ($\varepsilon \approx 1/298.26$) и динамического сжатия ($H \approx 1/305.51$) трактовались как отсутствие текучести в нижней мантии (дифференциальные напряжения не преодолели предела дислокационной текучести).

Следует отметить, что эллипсоид вращения, отвечающий динамическому сжатию Земли (4), имеет меньшее полярное сжатие ($\delta r \approx 20.88$ км), чем эллипсоид, соответствующий усреднению потенциала силы тяжести (разница около 510 м). Такую ситуацию прямо нельзя объяснить замедлением только скорости вращения Земли, так как в этом случае физическая поверхность Земли должна была бы быть более сплюснутой, чем уровневая поверхность потенциала силы тяжести. Это означает, что помимо вращения Земли существует какой-то фактор, который определяет получаемое соотношение двух важнейших земных параметров. Возможно, этим фактором является движение твердого ядра Земли относительно ее геоцентра [Barkin, 2005].

В завершение следует отметить, что предлагаемая автором концепция на самом деле возрождает идею А. Вегенера [Wegener, 1929], который возникновение движущих сил литосферных плит связывал с особенностями формы геоида. В частности, он опирался на идею Л. Этвёша [Eötvös, 1913] и расчеты П. Эпштейна [Epstein, 1921]. Утверждалось, что из-за уменьшения полярного сжатия уровневой поверхности силы тяжести для внутренних объемов Земли (подтверждено позднее в работах К. Буллена [Bullen, 1936; Bullen, Haddon, 1973]) «плавающие тела подвержены воздействию разнонаправленных сил, равнодействующая которых обращена от полюсов к экватору» (перевод из [Wegener, 1929]). Т.е. здесь, так же как и в настоящей статье, речь идет о ТМС, которые, по [Epstein, 1921], вычисляются согласно следующему выражению:

$$K_\theta = |K_\theta| \sin 2\theta \text{ при } |K_\theta| = 1.5\rho h\omega^2, \quad (7)$$

где h – половина разности высот между морским дном и поверхностью материков, а ρ и ω – соответственно плотность пород и угловая скорость вращения Земли.

Полагая $h = 2.5$ км, находим $|K_\theta| = 3.4 \cdot 10^{-5}$ г/см³. Как видно, величина $|K_\theta|$ почти на порядок меньше значений сил, которые вытекают из сопоставления формы геоида и физической поверхности Земли ($|F_\theta| \approx 2.5 \cdot 10^{-4}$). Полученному значению ТМС $|K_\theta|$ отвечает угол уклонения отвеса порядка 2.6 с. Именно очень маленькое значение ТМС было причиной неверия ученых начала прошлого века в гипотезу А. Вегенера.

Силы дрейфа континентальных плит, рассматривавшиеся А. Вегенером, много меньше тех сил, которые рассмотрены в этой статье. Кроме того, ТМС, по А. Вегенеру, однонаправленные и действуют только от полюса к экватору. ТМС, вытекающие из сопоставления формы геоида и физической поверхности Земли, могут быть ориентированы и к экватору, и к полюсам, и вообще в любом направлении. Все зависит от конкретного момента времени и соотношения вышеупомянутых поверхностей. Следует отметить, что в начале прошлого века в работе [Schweydar, 1921] также предполагалось отличие формы физической поверхности Земли от приближения эллипсоидом вращения геоида.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Когда речь идет о планетарных напряжениях, то имеют в виду влияние на напряженное состояние литосферы изменения суточного вращения Земли. Проведенные исследования показали необходимость не столько изучения роли изменения суточного вращения Земли, сколько выявления несоответствия усредненной формы коры и литосферы характерным параметрам геоида, отвечающего уровневой поверхности потенциала силы тяжести. В настоящее время, говоря о форме Земли, практически всегда имеют в виду форму геоида, отвечающего уровневой поверхности потенциала силы тяжести. На самом деле, эти две поверхности достаточно близки по общей форме, но между ними существуют как глобальные (планетарные), так и региональные различия.

Предложены способы оценки ТМС на основе несовпадения нормалей к уровневой поверхности потенциала силы тяжести и обобщенной физической поверхности Земли в виде эллипсоида вращения. Если за основу расчета принять отклонения отвесной линии от нормали к поверхности среднего от эллипсоидов вращения, наилучшим образом отвечающих поверхности Земли в ее континентальной и океанической части, то тогда максимальные зна-

чения ТМС на широте 45° составят $|F_\theta| \approx 2.5 \cdot 10^{-4}$ г/см³.

Установлено что параметры такого среднего глобального эллипсоида физической поверхности Земли ($\bar{\epsilon}_R \approx 1/308$) близки к параметрам коэффициента динамического сжатия Земли ($H \approx 1/305.51$), полученного из спутниковых измерений. Особо отметим, что установленные в работе различия эллипсоидов, отвечающих потенциалу силы тяжести и физической поверхности Земли, нельзя связывать с изменением скорости вращения Земли.

В рамках проведенных исследований высказана гипотеза о существенном вкладе ТМС в геодинамику литосферных плит, которая, конечно, требует критического рассмотрения и сопоставления с имеющимися данными. Основу деформирующих сил составляет не изменение скорости вращения Земли [Stovas, 1975a, 1975b; Morozov, 2007], а систе-

матическое отклонение отвесной линии от нормали к усредненной физической поверхности Земли. Выполненные оценки ТМС, вытекающие из данной гипотезы, показывают возможность меридионального движения континентальных литосферных плит со скоростями в первые сантиметры в год. Важно отметить, что взаимосвязи сил, ответственных за дрейф литосферных плит, с формой геоида и физической поверхностью Земли позволяют объяснить не только субмеридиональные движения плит.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке программы ОНЗ № 8 (рук. академик Ю.Г. Леонов) и программы РФФИ (проект № 16-05-01115).

7. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Artyushkov E.V., 1979. Geodynamics. Nauka, Moscow, 327 p. (in Russian) [Артюшков Е.В. Геодинамика. М.: Наука, 1979. 327 с.].
- Avsyuk Yu.N., 1993. Evolution of the Earth–Moon system, and its place among the problems of nonlinear geodynamics. *Geotektonika (Geotectonics)* (1), 13–22 (in Russian) [Авсюк Ю.Н. Эволюция системы Земля–Луна и ее место среди проблем нелинейной геодинамики // *Геотектоника*. 1993. № 1. С. 13–22].
- Barkin Yu.V., 2005. Celestial mechanics of the Earth's core and mantle: geodynamic and geophysical implications. In: Yu.V. Karyakin (Ed.), *Tectonics of the Earth's crust and mantle. Tectonic regularities in distribution of mineral deposits*. Vol. 1. GEOS, Moscow, p. 30–33 (in Russian) [Баркин Ю.В. Небесная механика ядра и мантии Земли: геодинамические и геофизические следствия // *Тектоника земной коры и мантии. Тектонические закономерности размещения полезных ископаемых* / Ред. Ю.В. Карякин. М.: ГЕОС, 2005. Т. 1. С. 30–33].
- Bullen K.E., 1936. The variation of density and the ellipticities of strata of equal density within the Earth. *Geophysical Supplements to the Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 3 (9), 395–401. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.1936.tb01747.x>.
- Bullen K.E., Haddon R.A.W., 1973. The ellipticities of surfaces of equal density inside the Earth. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 7 (2), 203–212. [http://dx.doi.org/10.1016/0031-9201\(73\)90010-1](http://dx.doi.org/10.1016/0031-9201(73)90010-1).
- Cox A., Hart R.B., 1986. *Plate Tectonics: How It Works*. Wiley-Blackwell, Boston, 418 p. [Русский перевод: Кокс А., Харт Р. Тектоника плит. М.: Мир, 1989. 427 с.].
- Dobretsov N.L., 2010. Global geodynamic evolution of the Earth and global geodynamic models. *Russian Geology and Geophysics* 51 (6), 592–610. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2010.05.002>.
- Eötvös L., 1913. Verhandlungen der 17. Allgemeinen Konferenz der Internationalen Erdmessung. Teil I. Berlin, s. 111.
- Epstein P.S., 1921. Über die Polflucht der Kontinente. *Die Naturwissenschaften* 9 (25), 499–502. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01494987>.
- Evernden J.F., 1997. What $\epsilon_a=1/298$ and $C/Ma^2=0.333$ really tell us about the Earth. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 33 (2), 162–170.
- Grikurov G.E., Leichenkov G.L., Mikhalsky E.V., 2010. Tectonic Evolution of the Antarctic in the light of the current state of geodynamic ideas. In: Y.G. Leonov (Ed.), *The structure and history of the lithosphere. Russia's contribution to the International Polar Year 2007/08*. Paulsen, Moscow, p. 91–110 (in Russian) [Грикуров Г.Э., Лейченков Г.Л., Михальский Е.В. Тектоническая эволюция Антарктики в свете современного состояния геодинамических идей // *Строение и история развития литосферы. Вклад России в Международный полярный год 2007/08* / Ю.Г. Ред. Леонов. М.: Paulsen, 2010. С. 91–110].
- Jeans J.H., 1917. Gravitational instability and the figure of the Earth. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 93 (653), 413–417. <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.1917.0027>.
- Jeffreys H., 1952. *The Earth: Its Origin, History and Physical Constitution*. Third edition. Cambridge University Press, Cambridge, 574 p.
- Lamb H., 1945. *Hydrodynamics*. 6th Edition. Dover Publications, New York, 768 p. [Русский перевод: Ламб Г. Гидродинамика. М.-Л.: ОГИЗ, 1947. 929 с.].

- Leibenzon L.S., 1910. Deformation of the Elastic Sphere in Relation to the Problem of the Earth's Structure. Scientific Notes of the Imperial Moscow University. Physics and Mathematics Department, vol. 27. Printing House of the Imperial Moscow University, Moscow, 125 p. (in Russian.) [Лейбензон Л.С. Деформация упругой сферы в связи с вопросом о строении Земли. Ученые записки Императорского Московского университета, отдел физико-математический. Вып. 27. М.: Типография Императорского Московского университета, 1910. 125 с.]
- Love A.E.H., 1909. The yielding of the Earth to disturbing forces. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 82 (551), 73–88. <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.1909.0008>.
- Love A.E.H., 1927. A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity. Fourth edition. Cambridge University Press, Cambridge, 643 p. [Русский перевод: Ляв А. Математическая теория упругости (перевод с 4-го английского издания). М.–Л.: ОНТИ НКТП СССР, 1935. 674 с.]
- Molodensky M.S., 1945. Main Problems of Geodesic Gravimetry. Trudy TsNIIGAiK, vol. 42. Geodezizdat, Moscow, 111 p. (in Russian) [Молоденский М.С. Основные вопросы геодезической гравиметрии. Труды ЦНИИГАиК. Вып. 42. М.: Геодезиздат, 1945. 111 с.]
- Molodensky M.S., 1948. The external gravitational field and the shape of the physical surface of the Earth. *Izvestiya AN SSSR, Geography and Geophysics Series* 12 (3), 193–211 (in Russian) [Молоденский М.С. Внешнее гравитационное поле и фигура физической поверхности Земли // Известия АН СССР, серия географическая и геофизическая. 1948. Т. 12. № 3. С. 193–211].
- Molodensky M.S., 1989. The General Theory of Elastic Oscillations. Nedra, Moscow, 79 p. (in Russian) [Молоденский М.С. Общая теория упругих колебаний. М.: Недра, 1989. 79 с.]
- Moritz H., 1980. Advanced Physical Geodesy. Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe, 500 p. [Русский перевод: Мориц Г. Современная физическая геодезия. М.: Недра, 1983. 391 с.]
- Moritz H., 2001. Molodensky's theory and GPS (Tribute to M.S. Molodensky). *Geodeziya i Kartografiya (Geodesy and Cartography)* (6), 7–17 (in Russian) [Мориц Г. Теория Молоденского и GPS (Памяти М.С. Молоденского) // Геодезия и картография. 2001. № 6. С. 7–17].
- Morozov Yu.A., 2007. To the phenomenology of structures and processes of rotational genesis. In: E.E. Milanovsky (Ed.), *Rotation processes in geology and physics*. KomKniga, Moscow, p. 471–504 (in Russian) [Морозов Ю.А. К феноменологии структур и процессов ротационного генезиса // Ротационные процессы в геологии и физике / Ред. Е.Е. Милановский. М.: КомКнига, 2007. С. 471–504].
- Parkovich P.F., 1939. The Theory of Elasticity. OBORONGIZ, Moscow, 640 p. (in Russian) [Папкович П.Ф. Теория упругости. М.: ОБОРОНГИЗ, 1939. 640 с.]
- Rebetskii Y.L., 2009. Estimation of stress values in the method of cataclastic analysis of shear fractures. *Doklady Earth Sciences* 428 (1), 1202–1207. <http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X09070368>.
- Rebetskii Y.L., 2016. Estimation of the influence of daily rotation of the earth on the stress state of the continental crust. *Doklady Earth Sciences* 469 (1), 743–747. <http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X1607014X>.
- Rebetsky Y.L., 2015. On the specific state of crustal stresses in intracontinental orogens. *Geodynamics & Tectonophysics* 6 (4), 437–466 (in Russian) [Ребецкий Ю.Л. Об особенности напряженного состояния коры внутриконтинентальных орогенов // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6. № 4. С. 437–466]. <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2015-6-4-0189>.
- Rebetsky Y.L., Kuchai O.A., Marinin A.V., 2013. Stress state and deformation of the Earth's crust in the Altai–Sayan mountain region. *Russian Geology and Geophysics* 54 (2), 206–222. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2013.01.011>.
- Rebetsky Y.L., Marinin A.V., 2006. Preseismic stress field before the Sumatra-Andaman earthquake of 26.12. 2004: a model of metastable state of rocks. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 47 (11), 1173–1185.
- Schultz S.S. (Ed.), 1973. Planetary Fracturing. Leningrad State University, Leningrad, 176 p. (in Russian) [Планетарная трещиноватость / Ред. С.С. Шульц. Л.: Изд-во ЛГУ, 1973. 176 с.]
- Schultz S.S., Nikolaeva T.V. (Eds.), 1976. Issues of Planetary Fracturing. The USSR Geographical Society, Leningrad, 103 p. (in Russian) [Вопросы изучения планетарной трещиноватости / Ред. С.С. Шульц, Т.В. Николаева. Л.: Географическое общество СССР, 1976. 103 с.]
- Schweydar W., 1921. Bemerkungen zu Wegeners Hypothese der Verschiebung der Kontinente. *Zeitschrift der Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin* 1921, 120–125.
- Siddoway C.S., 2008. Tectonics of the West Antarctic rift system: new light on the history and dynamics of distributed intracontinental extension. In: A.K. Cooper, P.J. Barrett, H. Stagg, B. Storey, E. Stump, W. Wise (Eds.), *Antarctica: A Keystone in a Changing World. Proceedings of the 10th International Symposium on Antarctic Earth Sciences*. The National Academies Press, Washington, DC, p. 91–114.
- Stacey F.D., 1969. Physics of the Earth. John Wiley and Sons, New York, 324 p. [Русский перевод: Стейси Ф. Физика Земли. М.: Мир, 1972. 342 с.]
- Stovas M.V., 1975a. Selected Works. Nedra, Moscow, 155 p. (in Russian) [Стовас М.В. Избранные труды. М.: Недра, 1975. 155 с.]
- Stovas M.V., 1975b. Some problems of planetary deep faulting in the Earth's crust. In: Selected works. Nedra, Moscow, p. 103–110 (in Russian) [Стовас М.В. Некоторые вопросы образования планетарных глубинных разломов в земной коре // Избранные труды. М.: Недра, 1975. С. 103–110].

Trubitsyn V.P., 2000. Principles of the tectonics of floating continents. *Izvestiya Physics of the Solid Earth* 36 (9), 708–741.

Wegener A., 1929. Die Entstehung der Kontinente und Ozeane. Friedr. Vieweg & Sohn Akt.-Ges., Braunschweig, 231 s.
[Русский перевод: *Вегенер А.* Происхождение континентов и океанов. Л.: Наука, 1984. 285 с.].



Ребецкий Юрий Леонидович, докт. физ.-мат. наук, зав. лабораторией
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН
123242, ГСП-5, Москва Д-242, ул. Большая Грузинская, 10, Россия
Тел.: 89031739602; ✉ e-mail: reb@ifz.ru

Rebetsky, Yuri L., Doctor of Physics and Mathematics, Head of Laboratory
O.Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS
10 Bol'shaya Gruzinskaya street, Moscow D-242 123242, GSP-5, Russia
Tel.: 89031739602; ✉ e-mail: reb@ifz.ru