

ГЕНЕЗИС ТАНГЕНЦИАЛЬНЫХ МАССОВЫХ СИЛ В ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТАХ И ИХ РОЛЬ В ГЕОДИНАМИКЕ

© 2020 Ю.Л. Ребецкий, Д.С. Мягков

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия, 123242; e-mail: reb@ifz.ru

Приведена постановка задачи по определению малых тангенциальных массовых сил в литосфере Земли. Показано, что современное состояние в понимании формы физической поверхности Земли и данные о ее геоиде позволяют в масштабе усреднения в первые сотни километров определять отклонения отвесной линии от нормали к земной поверхности. Установлено, что для больших площадей литосферных плит наблюдаются систематические однонаправленные отклонения отвесной линии от нормали к поверхности. Рассчитанные по этим данным малые тангенциальные массовые силы имеют порядок $n 10^{-4}$ Г/см³. При наличии устойчивого градиента поверхности на площадях в первые тысячи километров (океанские части литосферных плит) тангенциальные массовые силы могут создать дополнительные сжимающие или растягивающие горизонтальные напряжения порядка 10–15 Мпа. Эти силы, суммируясь по глубине литосферы, способны преодолеть уровень касательных напряжений 0.2–0.3 Мпа на ее подошве и поэтому они могут рассматриваться как источник движения плит.

Ключевые слова: геодинамика, физическая поверхность Земли, геоид, тангенциальные массовые силы.

ВВЕДЕНИЕ

После работ (Jeans, 1917; Jeffreys, 1952; Love, 1909) принято считать, что форма Земли близка к уровенной поверхности потенциала силы тяжести, представляющего собой сумму гравитационного потенциала и потенциала центробежных сил. Общепринятой считается точка зрения, что отклонения формы Земли от геоида мало и влиянием таких отклонений можно пренебречь (Turcotte, Shubert, 2014). Сейчас необходимость учета центробежных сил связывают с ускорением или замедлением вращения планеты (Стовас, 1975). Из-за этой неравномерности вращения форма Земли не соответствует изменившейся форме уровенной поверхности потенциала силы тяжести, и поэтому в литосфере могут появляться дополнительные тангенциальные массовые силы (ТМС). Впервые подобные расчеты были сделаны в работе (Лейбензон, 1910). Аналогичные оценки были выполнены также в работе (Стовасом, 1975) в предположении замедления вращения планеты. Цитируемый автор опирался на данные о том, что за последние 2.5 тысячи лет увеличение земных суток соста-

вило 0.0024 секунд (около 10^{-6} секунды за год), что привело к изменению полярного сжатия на 10^{-7} . При изменении угловой скорости вращения на величину сек⁻¹, принятое изменение полярного сжатия произойдет за время порядка 125 тысяч лет. Эти расчеты дали очень низкие значения меридиональных нормальных напряжений в диапазоне от –0.023 до 0.013 Мпа. Это уровень напряжений, много меньший (на 4–4.5 порядка) величины напряжений, действующих в сейсмоактивных областях (Ребецкий, 2009; Ребецкий и др., 2013; Ребецкий, Маринин, 2006).

Полученный М.В. Стовасом (1975) результат ничего не доказывает, т.к. сами расчеты делались для неких гипотетических значений. Следует при этом отметить, что в самом подходе М.В. Стоваса лежала важная идея. Более ранняя форма геоида и физическая поверхность Земли (ФПЗ) имели близкую форму, то есть, имело место равновесное состояние. Дальнейшее замедление вращения изменило земной геоид, но не успело сказаться на форме ФПЗ. Таким образом, влияние замедления вращения М.В. Стовасом рассчитывалось на основе сопоставления двух конечных форм земного геоида, отвечавших разным временам

процесса, разным скоростям суточного вращения. Во времена, когда Л.С. Лейбензон и М.В. Стюарт проводили свои исследования, не было цифровых моделей земной поверхности, и поэтому им приходилось отталкиваться от некоторых гипотетических форм Земли. В нашем подходе предлагается сопоставлять земной геоид с усредненной определенной образом ФПЗ, полученной по спутниковым данным. Предварительные оценки показывают значимость отклонений этих двух поверхностей на континентах и океанах.

Появились исследования (Doglioni, Panza, 2015), в которых развиваются работы по изучению роли тангенциальных сил, возникающих на подошве литосферы (тяговые касательные напряжения) из-за более быстрого вращения внутренних слоев Земли. Эти напряжения вызывают западный дрейф литосферных плит. Следует отметить, что лежащая в их основе идея рассматривалась и хорошо была изучена в работах российского ученого Ревуженко, например, (Ревуженко, 1991), то есть, он обошел западных исследователей в этом вопросе более чем на 20 лет. В недавно вышедшей работе (Coltice et al., 2019) показано, что почти две трети поверхности литосферы движется быстрее нижележащей мантии. Таким образом, можно говорить, что литосферные плиты формируют мантийную конвекцию.

В настоящее время учет ТМС вновь стал востребованным для объяснения механизма движения литосферных плит. Существует много геологических свидетельств, говорящих о влиянии вращения планеты на тектонику (Добролюбов, 2005; Морозов, 2004; Хаин, Полетаев, 2007). Однако нет практических оценок величины этих сил, либо сделанные оценки базировались на неверных исходных параметрах задачи (Стюарт, 1975). Достоверные оценки ТМС позволят уточнить существующие расчетные модели мантийной конвекции и движения литосферных плит. Так, метеорологи при расчете воздушных потоков начинают учитывать ТМС в атмосфере, связанные с разностью моделей, построенной на данных о земном геоиде и на уточненных гравиметрических данных. Здесь, конечно, другая постановка физической проблемы. Но суть все же одна — уточнение исходных уравнений.

В настоящее время появляются свидетельства возможности достаточно быстрых изменений напряженного состояния в коре после произошедших сильных землетрясений. В частности, после землетрясения Тохоку по данным афтершоков в работах (Hardebeck, 2012; Hasegawa et al., 2012) установлено резкое изменение напряженного состояния в коре. Если до землетрясения в литосфере зоны субдукции к

западу от оси океанического желоба существовал режим субгоризонтального сжатия с пологим ($20\text{--}30^\circ$) погружением напряжения максимального сжатия под океаническую плиту (Ребеккий, Полец, 2014; Rebetsky et al., 2016), то после него произошло резкое изменение ориентации главных напряжений. Здесь возник режим субгоризонтального растяжения, при котором оси минимального сжатия или девиаторного растяжения ориентированы ортогонально оси желоба. Подобные резкие изменения вполне объяснимы и связаны с большими амплитудами смещений в очаге этого землетрясения (более 45 м).

Анализ афтершоковых последовательностей (Hardebeck, 2012) показал, что со временем напряженное состояние литосферы к западу от оси желоба стало восстанавливаться и приближаться к режиму субгоризонтального сжатия, действовавшему до землетрясения Тохоку. Следует особо отметить, что такое восстановление напряженного состояния сложно объяснить при известных скоростях движения литосферных плит в первые сантиметры в год и отвечающих им скоростях деформаций (10^{8-9} год⁻¹). Выполненные нами оценки показывают, что для смены геодинамического режима горизонтального растяжения на горизонтальное сжатие требует дополнительное сжатие на глубине 25–30 км порядка 2–3 Мпа, что при указанной выше скорости деформаций может быть достигнуто не менее чем за 1 млн лет.

Можно предположить, что причиной подобного быстрого восстановления являются существующие в литосфере малые ТМС. В любом случае фактор, приводящий к быстрому восстановлению напряженного состояния до предкритического, должен иметь возможность быстро закачивать энергию в область недавно произошедшего землетрясения. Движения плит и вязкое течение в мантии такой возможности не дают из-за наблюдаемых малых скоростей латеральных смещений в постсейсмическую фазу и высокой вязкости соответственно.

ТАНГЕНЦИАЛЬНАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ МАССОВЫХ СИЛ

Выполненный краткий обзор исследований в области глобальной геодинамики показывает, что ключевым их элементом является объяснение причин формирования тангенциальной составляющей массовых сил тяжести. В случае подтверждения значимости вклада малых ТМС в геодинамику будет, по нашему мнению, получен новый инструмент исследования эволюции движения литосферных плит.

Следует отметить, что основатель тектоники дрейфа материков Альфред Вегенер в качестве

источника движения плит предлагал силы Кориолиса, приливные явления и некоторые другие, связанные с силой тяжести. Однако простейшие расчёты показывают, что амплитуд всех этих сил недостаточно для перемещения огромных континентальных блоков (Ребецкий, Мягков, 2016).

Наши оценки показывают, что источником движения плит может являться отклонение формы поверхности Земли от формы геоида. То есть здесь мы полагаем, что форма ФПЗ не отвечает равновесному состоянию.

Земля является достаточно неоднородной по плотности (мантия, ядро) динамически подвижной системой, на которую оказывает влияние взаимодействия пары Луна–Земля. Поэтому можно ожидать достаточно быстрых (по геологическим меркам) изменений геоида не только за счет замедления суточного вращения Земли. При этом форма ФПЗ не имеет возможности столь же быстрой перестройки.

В геодинатике в качестве основных рассматриваются три энергетических источника напряжений в литосфере (Turcotte, Shubert, 2014). Это энергия упругих деформаций от массовых сил тяжести, тепловая энергия, выделяющаяся из мантии, и кинетическая энергия вращающейся планеты. Роль первых двух источников напряжений достаточно изучена. Третий энергетический источник, связанный с действием центробежных сил вращающейся Земли, часто упоминается в исследованиях по геодинатике. Но в настоящее время превалируют представления о том, что влияние этих сил настолько мало, т.к. форма Земли близка к геоиду (уровенной поверхности потенциала силы тяжести, определяемого суммой гравитационных и инерционных центробежных сил). Известно, что идеальное совпадение формы Земли с геоидом имеет место в случае жидкой модели планеты.

Главная идея проведенных нами исследований — необходимость учета малых тангенциальных составляющих массовых сил оправдывается тогда, когда эти силы имеют одно направление на площадях в тысячи километров. То есть здесь речь идет о низкочастотной компоненте отклонения ФПЗ от геоида, полученной в масштабе усреднения 300–500 км и более.

Задача учета ТМС более широкая, чем учет влияния вращения Земли, т.к. отклонения отвесной линии (УОЛ) от нормали к геоиду или ФПЗ могут быть связаны не только с длиннопериодными отклонениями поверхности от равновесного состояния, но и с глубинными неоднородностями плотности, приводящими к появлению длиннопериодных гармоник уровенной поверхности потенциала силы тяжести.

Объясняя возможность появления УОЛ, заметим, что постоянство высот рельефа рав-

нин на больших расстояниях не означает, что нормаль к эллипсоиду, полученному для этого участка ФПЗ, совпадает с нормалью к земному референс-эллипсоиду, который определяет наибольшее сглаживание уровенной поверхности потенциала силы тяжести в рамках всей планеты. Это связано с тем, что уровенные поверхности потенциала силы тяжести на разных глубинах / высотах не параллельны (они не совпадают в окрестности точки при смещении вдоль нормали). Если принять для Русской равнины, что точки ее поверхности находятся на одинаковых высотах 170 м (средняя высота равнины) от земного референс-эллипсоида, то можно найти значение угла между нормалью к такой усредненной равнине и уровенной поверхности потенциала силы тяжести, приближенной в виде эллипсоида вращения. Он составит около 5.5". На самом деле, и такие достаточно «плоские» равнины, как Русская и Западно-Сибирская имеют малые однонаправленные градиенты высот, что отражается в течении крупнейших рек в одном направлении (на север для Западно-Сибирской равнины и на юг для Восточно-Европейской равнины, за исключением северной ее части).

Для того, чтобы определить ТМС, нам необходимо знать УОЛ от нормали к ФПЗ. Когда гравиметристы говорят об УОЛ, они имеют в виду отклонение в данной точке на сфере Земли отвеса от нормали к ее референс-эллипсоиду. То есть, в этом определении не фигурирует понятие ФПЗ. Понятно, что в таком случае этот угол может существенно отличаться от угла между отвесом и нормалью к ФПЗ, полученного при площади усреднения, отвечающей детальной гравиметрическим данным, т.к. высоты рельефа планеты также отсчитываются от ее референс-эллипсоида.

Более 60 лет назад М.С. Молоденский (1953) сформулировал задачу по определению ФПЗ, если на ней произведены измерения g (ускорение силы тяжести) и рассчитаны значения потенциала силы тяжести. Сейчас, когда спутниковые технологии позволили с очень высокой точностью получить данные о топографии по отношению к референс-эллипсоиду, задача ставится совершенно иначе (Кашеев, 2010; Моризц, 2001; Hofmann-Wellenhof, Moritz, 2005). Необходимо определить значение потенциала силы тяжести на ФПЗ при измеренных на ней значений ускорения свободного падения g . Данные о градиентах вдоль земной поверхности потенциала силы тяжести и определяют разницу углов отвесной линии от нормали к ФПЗ.

Моменты инерции Земли можно использовать для приближения на первом этапе физической ее поверхности эллипсоидом

вращения — сфероидом. В гравиметрии существует понятие коэффициента динамического сжатия Земли (Стейси, 1972) или механического сжатия (Молоденский, 1953), представляющего собой соотношение полярного и экваториального моментов инерции физической Земли. Он определен из прецессии оси вращения Земли (влияние Солнечных и Лунных приливов) и равен $H = 1:305.51$. Именно данные о значении полярного и экваториального моментов инерции входят в выражение для потенциала силы тяжести при описании физической формы Земли, и, следовательно, эти значения мы можем принять для описания ФПЗ. Для того, чтобы от коэффициента динамического сжатия перейти к соотношению радиусов на экваторе и полюсе, необходимо знать глубинное распределение масс. Если положить, что Земля состоит из слоев, с увеличивающейся в глубине плотности и одинаковой степени сжатости, то, используя малость величины сжатия Земли, находим (Стейси, 1972) полярное сжатие 20.877 км. При этом полярное сжатие земного референс-эллипсоида –21.385 км и оно определяется коэффициентом $e = 1:298.26$.

Понятно, что моменты инерции Земли, которые определяют значение коэффициента динамического сжатия планеты, определяются не только формой ФПЗ, но и формой и плотностью ее внутренних слоев. Это и послужило тому, что полученные фактически данные в начале космической эры Земли не изменили основные представления о равновесности ее состояния.

По мере увеличения глубины и плотности внутренних слоев Земли степень сплюснутости уровенной поверхности потенциала силы тяжести должна уменьшаться, т.к. меняется соотношение между вкладом в силы тяжести вращения Земли и гравитации. Учет этого фактора должен увеличить момент инерции Земли относительно оси, проходящей через экватор, следовательно, увеличит значение коэффициента динамического сжатия H .

ПРИБЛИЖЕННЫЕ ОЦЕНКИ ТМС

Если для оценки полярного сжатия ФПЗ принять $H = 1:305.51$, то в этом случае максимальное отклонение нормали к поверхности усредняющего эллипсоида физической Земли от отвесной линии (нормаль к поверхности земного референс-эллипсоида) составит около 16.4" на широте 45°. К полюсу и экватору этот угол снижается до нуля. Наличие отклонения отвесной линии от нормали к поверхности твердой Земли определяет появление ТМС, действующих вдоль меридианов в одном направлении (в данном случае от полюса к экватору). Если принять плотность пород 2700 кг/м³, то максимальное

значение ТМС на широте 45° составит 0.215 кГ/м³, что, конечно же, очень мало (в 10000 раз меньше силы тяжести). Но ТМС, действуя в литосфере на протяжении около 10000 км (расстояние от полюса до экватора), суммируются, что может создать достаточно значимый эффект.

В работе (Ребецкий, 2016) была выполнена оценка напряжений, возникающих в коре из-за действия ТМС в случае, когда максимальное отклонение между рассматриваемыми эллипсоидами порядка 10". Установлено, что вблизи экватора в коре возникают дополнительные напряжения порядка 10 МПа. Показано, что дополнительные напряжения, вызванные ТМС, способны изменить геодинамический тип напряженного состояния в верхних (до 4 км) слоях коры.

В настоящее время существуют достаточно точные данные по топографии земной поверхности (до 1–2") как на континентах, так и для океанического и морского дна. Поэтому сейчас имеется возможность рассчитать усредненную ФЗП в виде эллипсоида вращения, наиболее хорошо приближенного к реальной топографии. Нами в очень приближенном виде были выполнены расчеты полярного сжатия и среднего экваториального радиуса эллипсоида, наилучшим образом приближенного к ФПЗ отдельно для континентальной и океанической ее частей. При этом для континентальной поверхности (высоты >10 м) не учитывались горные области с высотами >1000 м, а для океанической поверхности (глубины дна >10 м) не учитывались глубины океанского дна >5000 м. Для океанической поверхности вода сжималась до плотности коры (2700 кг/м³). Таким образом, в расчетах континентов и океанского дна использовались наиболее ровные участки поверхности.

Результаты расчетов показали, что для континентальной поверхности наилучшее приближение дает эллипсоид $e = 1:300.6$ (полярное сжатие 21.219 км), а для океанической поверхности $e = 1:311.5$ (полярное сжатие 20.468 км). Видно, что полученные значения полярного сжатия, так же как и коэффициент динамического сжатия, определяют эллипсоиды вращения, менее сжатые, чем земной референс-эллипсоид. Если рассчитать простое среднее для океанической и континентальной поверхности полярное сжатие, то оно составит $e = 1:307.8$. Это значение достаточно близко к величине динамического сжатия Земли. Результаты наших отдельных оценок для океанической и континентальных частей поверхности Земли показывают, что в литосфере континентов ТМС меньше, чем в океанической литосфере. Это может свидетельствовать о большем вкладе в тектонические движения именно ТМС, действующих в океанической литосфере.

Еще раз повторим, что генезис возникновения ТМС можно связывать не только с суточным вращением планеты, но и с изменением положения ядра внутри планеты (Баркин, 2005), а также влиянием взаимодействия вращающейся пары Луна-Земля (Авсюк, 1993).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Технология расчета углов УОЛ базировалась на нахождении коэффициентов ряда при разложении ФЗП по сферическим функциям. Это позволяло выполнять расчеты ТМС до широкого спектра масштабов их усреднения. В наших расчетах масштаб усреднения ФПЗ соответствовал 200–400 км, что отвечало усреднению геоида в модели EGM 96. После расчетов коэффициентов сферических функций ФПЗ производилась их нормировка в соответствии с параметрами модели EGM 96 (Дмитриенко, 2012). Затем находилась разница рассчитанных коэффициентов сферических функций ФПЗ и коэффициентов сферических функций для геоида модели EGM 96. Полученные значения углов УОЛ позволяют рассчитать ТМС в их компонентах по широтам и долготам в каждой точке плиты.

На основе расчета коэффициентов разложения рельефа литосферных плит в ряды по сферическим функциям было рассчитано поле распределения углов уклонения нормалей

рельеф авдоль широт и меридианов от нормали к референс-эллипсоиду Земли, полученному для геоида согласно модели EGM 96. При построении такого поля использовалось разное количество членов ряда, что дает разные масштабы усреднения рельефа. При использовании первых 16 членов ряда усреднение топографии отвечает 300–500 км (больше мощности литосферы), а при использовании 24 членов ряда 200–250 км (порядка мощности литосферы). При таких построениях поля углов уклонения нормалей рельефа области с высокоамплитудным рельефом исключались. Далее, используя данные о поле углов уклонения нормалей рельефа, рассчитывались ТМС, действующие вдоль широт и меридианов. Результаты расчетов позволили выявить литосферные плиты, для которых поле ТМС отличалось относительной стабильностью, и литосферные плиты с наибольшим разнообразием ориентации и величины ТМС. Производилось сопоставление поля углов уклонения нормалей рельефа, усредненного в масштабах плит с результатами расчета средних углов отклонения для одиночных плит.

Принятая на рис. 1 цветовая раскраска векторов ТМС, соответствует азимутам их простирания. Следует обратить внимание, что обширные области квазимеридионального простирания ТМС до тысячи километров и даже более располагаются вдоль субширотных границ

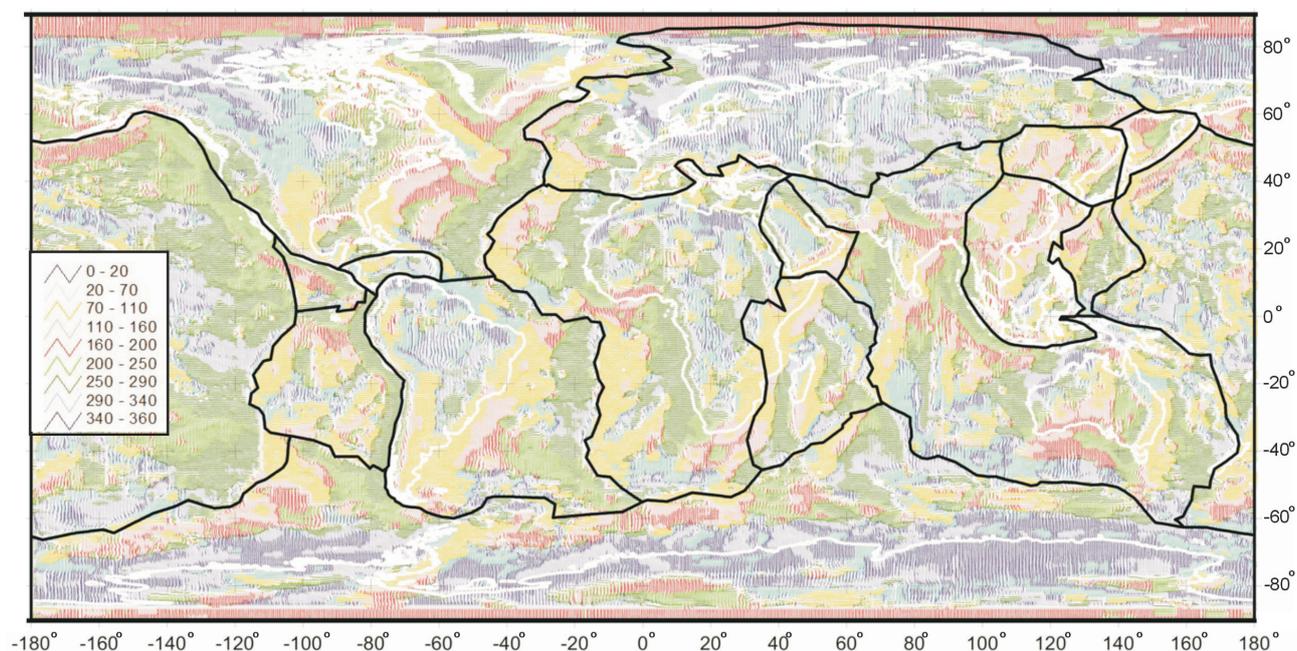


Рис. 1. Азимуты тангенциальных массовых сил (шаг сетки 0.5°). Темно-синий цвет для сил с направлением на север, голубой — на северо-восток, желтый — на восток, светло-красный — на юго-восток, темно-красный — на юг, светло-зеленый — на юго-запад, зеленый — на запад, светло-синий — на северо-запад. Белые линии — границы континентов, черные — границы плит (таблица цветов слева в градусах).

Fig. 1. The azimuths of tangential mass forces (grid spacing 0.5°) are dark blue for forces with northward direction, blue for north-east, yellow for east, light red for south-east, dark red for south, light green for southwest, green for west, light blue for northwest. White lines - continent borders, black lines are plate boundaries (color table on the left in degrees).

литосферных плит. Субмеридиональным границам плит отвечают субширотные ориентации ТМС.

На рис. 2 показано, что большая часть континентальной части литосферных плит имеет низкий уровень ТМС с отвечающими им УОЛ до 10". Для океанских частей литосферных плит существуют обширные участки от нескольких сотен и даже в тысячу километров с высоким уровнем ТМС, определяемым УОЛ более 30–60". Для океанов в зонах спрединга они составляют 5–15" для субмеридиональных зон (Атлантическая, Индийская, Тихоокеанская) и 30–50" для субширотных зон (Антрактическая и Арктическая).

Для континентов отклонения отвесной линии (нормаль к геоиду) от нормали к земному референс-эллипсоиду на таких же дистанциях не превышают 5'. Составляющая силы тяжести, направленная параллельно ФПЗ, является ТМС и в среднем для континентов может составлять 0.3 кГ/м³ (отклонения нормалей 20"). Подобные значения «горизонтальной» составляющей массовой силы на дистанции в 1000 км способно создать тангенциальное напряжение 3 Мпа.

Для зон спрединга эти ТМС на дистанции 500 км (средняя ширина зоны аномальных градиентов) могут создать тангенциальные напряжения для субмеридиональных структур 1.5 Мпа, а для субширотных — 3 Мпа.

Интегрирование ТМС по площади литосферной плиты позволяет рассчитать суммарную

силу, действующую на плиту в латеральном направлении, а интегрирование по мощности плиты оценить касательные напряжения на ее подошве. Используя такой подход, был выполнен расчет интегральных значений ТМС для литосферных плит. Для этого использовались первые члены ряда разложения ФПЗ по сферическим функциям.

По результатам таких расчетов Африканская плита имела очень низкий уровень ТМС, что соответствует ее стабильному современному состоянию. Также невысокий уровень ТМС наблюдается для Евразийской плиты. Континентальная часть Антрактической плиты имеет наиболее высокий уровень ТМС. В случае ее свободного движения в мантии должны были бы возникнуть напряжения порядка 3 Мпа. Однако достаточно симметричное ее расположение на южном полюсе приводит к тому, что эти массовые силы создают в ней горизонтальное растяжение вдоль меридианов с уровнем порядка 15–25 Мпа.

Из малых плит, для которых полученные результаты можно классифицировать как надежные, следует выделить Амурскую и Охотскую. Для них также наблюдался очень высокий уровень суммарных ТМС и соответствие их направления известному из GPS данных направлению движения этих литосферных плит. Для этих плит уровень ТМС при их свободном движении способен индуцировать сдвиговые напряжения в мантии более 1 Мпа. В случае наличия

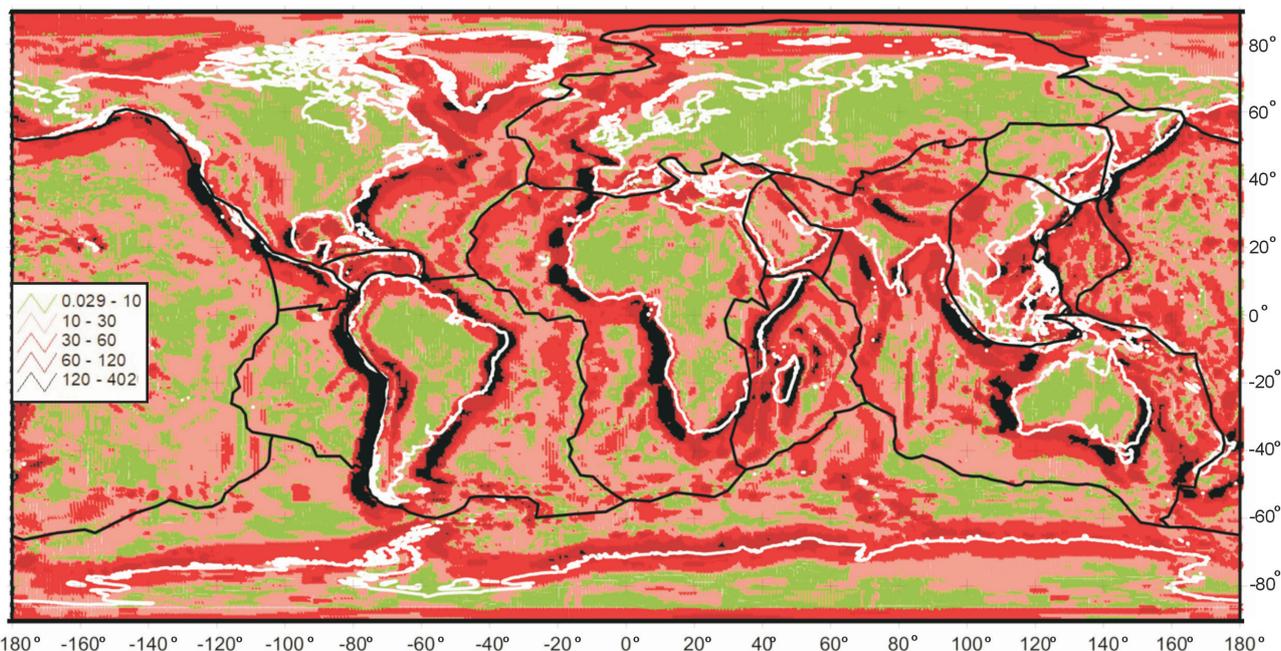


Рис. 2. Амплитуды тангенциальных массовых сил в секундах градиента рельефа (шаг сетки 0.5°). Зеленый — 0–10", изменение оттенков от светло-красного к темно-красному определяет повышение градиента рельефа (таблица амплитуд слева в секундах).

Fig. 2. Amplitudes of tangential mass forces, in seconds, of relief gradient (grid spacing 0.5°). Green — 0–10", change from light red to dark red determines the relief gradient increase (amplitude table on the left in seconds).

препятствия их латеральному движению ТМС способны индуцировать в литосферной плите средние напряжения горизонтального сжатия около 10 МПа. Поскольку наибольшая жесткость плиты приходится на ее коровую часть, то можно ожидать повышения в ней горизонтальных сжимающих напряжений на 25 МПа.

Оценки напряжений, возникающих из-за действия ТМС, выполнялись для литосферных плит, имеющих наименьшие перепады ФПЗ (не орогены). К таким тестовым плитам относились Тихоокеанская, Евразийская, Наска, Филиппинская, Охотская, Амурская, Аравийская, Кокос, Карибская. Для Аравийской плиты были удалены краевые субконтинентальные части, а Евразийская была взята целиком с северным океанским сегментом. Для этих плит были рассчитаны средние значения и направления действия ТМС. По их величинам наибольшие значения отвечали Охотской, Кокос, Амурской, Карибской и Филиппинской плитам, а наименьшие Тихоокеанской, Наска, Евразийской и Аравийской (рис. 2). Обращаем внимание на тот факт, что практически для всех плит, имеющих большие значения средних ТМС, направление суммарных ТМС очень близко к направлениям движения плит (рис. 1). Исключением здесь является плита Кокос.

Поскольку площади плит разные, то ТМС в этих плитах создавали у границ разные уровни напряжений. По величинам напряжений, которые создавали ТМС на границах, плиты располагались в таком порядке: Кокос, Охотская, Филиппинская, Тихоокеанская, Амурская, Наска, Карибская, Евразийская и Аравийская. При этом для первых плит в этой последовательности напряжения достигали значений 5–10 МПа, а для последних — 2–2.5 МПа. Этот уровень соответствует уровню коровых напряжений, полученных из тектонофизической реконструкции для зон субдукции (Ребецкий, 2007, 2009).

Отметим, что уровень ТМС и создаваемых ими напряжений не очень высок и поэтому их нельзя рассматривать в качестве структурообразующих сил в тектонике континентальной литосферы. Но при этом указанные значения ТМС способны преодолеть касательные напряжения на подошве плит в 0.1–0.3 МПа и поэтому могут рассматриваться как движущие силы литосферных плит.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты проведенных исследований подтвердили, что существовавшие представления о близком к гидростатическому состоянию Земли являются неверными. Впервые выводы Х. Джеффриса (Jeffreys, 1952) были поставлены под сомне-

ние в начале космической эры (начало 1960-х гг.) из-за отличия коэффициента динамического сжатия Земли — 305.51 и коэффициент сжатия референс-эллипсоида, полученного по данным гравиметрии (земной геоид), — 298.26. Подобный результат показывает, что нижняя мантия земли имеет прочность порядка прочности литосферы 2–3 МПа (Жарков, 2013).

Наши исследования базировались на полученных в последние десятилетия из спутниковой геодезии уникальных данных о топографии внешней оболочки Земли и данных о ее геоиде. Разработанный нами алгоритм позволил подобрать наилучшие значения коэффициентов сжатия референс-эллипсоида ФПЗ для каждой из литосферных плит (региональные референс-эллипсоиды), а также отдельно для океанской и континентальной их частей (когда это имело место). Было установлено, что наибольшее отклонение таких региональных референс-эллипсоидов от земного референс-эллипсоида по модели WGS 84 (Дмитриенко, 2012) наблюдается для Амурской (1/315), Аравийской (1/306), Наска (1/306), Охотской (1/326), Кокос (1/268) и Филиппинской (1/322) плит. Для Тихоокеанской и Африканской плит их региональные референс-эллипсоиды лучше всего соответствовали данным земного референс-эллипсоида (1/295–1/300). Эти расчеты выполнялись с использованием сферических функций для наиболее плоских участков плит. Из таких расчетов можно получить интегральные (по толщине литосферы) ТМС, которые действуют на плиты только в меридиональном направлении. Для плит, у которых полярное сжатие региональных референс-эллипсоидов больше, чем для земного референс-эллипсоида (1/298.26), эти силы направлены к полюсам, а для тех, у которых меньше — к экватору.

Важно отметить, что в данных исследованиях предполагалось постоянство мощности литосферы, т.е. ее подошва опущена или приподнята в соответствии с положением ФПЗ.

Мы сопоставляли напряжения, полученные по результатам расчетов ТМС, с существующими оценками в рамках иных концепций моделей движения литосферных плит. Значения, полученные нами для субширотных зон спрединга, меньше оценки горизонтальных сил в зонах спрединга, сделанной в работе (Gloshetal, 2006) на основе влияния динамической топографии, в 3–4 раза. Мы это связываем с тем фактом, что приведенные здесь значения тангенциальных напряжений получены по данным только о градиентах ФПЗ. Для более достоверных оценок необходимо знать градиенты подошвы литосферных плит, а еще лучше — срединной поверхности литосферы. В зонах спрединга градиент

ФПЗ меньше, чем градиент подошвы литосферы почти на порядок, т.к. мощность литосферы в разы возрастает от океанского рифта к зоне субдукции. Это приводит к тому, что срединная поверхность литосферы для океанов имеет градиент в 3–5 раза выше, чем для ФПЗ. Если этот факт принять во внимание в наших оценках, то составляющая силы тяжести, направленная параллельно срединной поверхности литосферы, для зон спрединга может составлять $0.7\text{--}3.0 \text{ кГ/м}^3$ (отклонения нормалей $50\text{--}200''$), что даже на дистанции в 500 км способно создать тангенциальные напряжения $10\text{--}15 \text{ Мпа}$. Эти значения уже соответствуют оценкам работы (Gloshetal, 2006). Таким образом, для океанских плит возможно увеличение градиента срединной поверхности литосферы в сравнении с результатами оценки ФПЗ в несколько раз, что дает определенное увеличение и влияния ТМС.

Для континентальных литосферных плит такой взаимосвязи между градиентами ФПЗ и подошвой литосферной плиты нет. В наших исследованиях мы, прежде всего, обращали внимание на внутреннее строение платформ. Вероятно, существует различие взаимосвязи формы интересующих нас поверхностей для древних и молодых платформ. Складчатые пояса, как и орогены, сложны по внутреннему строению и поэтому на начальном этапе наших исследований не рассматривались. Анализ супердлинных профилей глубинного сейсмического зондирования (Павленкова, 2007) показал, что в некоторых случаях можно говорить, что для полого приподнятых относительно плоских участков ФПЗ (не орогены) толщина литосферы несколько меньше (первые десятки километров), а для пониженных несколько больше. Но это не является постоянной закономерностью. Так, из работы (Трифонов, Соколов, 2017) следует, что для отдельных небольших континентальных и субконтинентальных плит подобное соотношение выполняется (Амурская и Охотская плиты), но для Евразийской плиты это если и выполняется, то только на площадях в первые сотни километров. Здесь подсказку могут дать данные остаточных гравитационных аномалий, получаемые после удаления влияния коры в работе (Сеначин, Баранов, 2016). В силу выводов, сделанных в этой работе, в наших исследованиях для континентов мы исходили из постоянства мощности континентальной и субконтинентальной литосферы, что рассматривали как консервативную оценку ТМС.

Результаты наших исследований еще не достигли той степени детальности, когда их можно сопоставлять с имеющимися сегодня моделями движения плит или литосферных напряжений. К этому можно приступить, когда

на основе полученных данных о ТМС будет создана численная модель движений и напряжений в литосферных плитах. Сейчас сопоставление возможно на концептуальном уровне и на тех первых численных оценках интегральных движущих сил для некоторых литосферных плит, которые уже получены.

В настоящее время нет данных, которые бы позволили однозначно установить причину движения литосферных плит. В работах (Добрецов и др., 2001; Лобковский, Котелкин, 2000; Трубицын, Рыков, 2000) к этой проблеме подходят с позиции существования в мантии земли общемантийной однослойной или двухслойной тепловой или термохимической конвекции. Созданные математические численные модели опираются на директивно установленные параметры вязкости нижней мантии ($10^{22}\text{--}10^{23} \text{ па}\cdot\text{с}$), которые могут не соответствовать реальной. Фактически вязкость была подобрана такой, чтобы скорости движения литосферных плит отвечали измеряемым. Эти численные модели были созданы в конце XX в., когда технология сейсмотомографии для получения данных о строении верхней и нижней мантии только начала создаваться. В настоящее время большое число новых данных сейсмической томографии (стабильно существующие изометричные суперплюмы, стагнант блоки, отсутствие восходящей ветви конвекции в зонах спрединга) не находят своего объяснения в рамках таких моделей. Кроме этого, идея о вовлечении в конвекцию всей мантии предопределяет ее перемешивание. Это противоречит установленному в начале космической эры (начало 1960-х гг.) факту об отличии коэффициента динамического сжатия земли (305.51) от значения, полученного из данных гравиметрии — коэффициент сжатия земного референс-эллипсоида (298.26).

В наших исследованиях показана возможность формирования в литосферных плитах тангенциальных массовых сил порядка 0.32 кГ/м^3 при градиенте рельефа порядка $20''$. Такой наклон ФПЗ относительно геоида наблюдается на площадях (15 первых коэффициентов разложения по сферическим функциям) в $500\text{--}1000 \text{ км}$, а иногда и более. Интегрируя эти ТМС по глубине литосферы ($80\text{--}100 \text{ км}$ модель PREM), получим значения уравнивающих на подошве касательных напряжений порядка 0.32 Мпа . Этот уровень касательных напряжений отвечает скоростям течения в астеносфере, позволяющим получить скорости движения литосферных плит в первые десятки сантиметров в год (при вязкости $10^{19} \text{ Па}\cdot\text{с}$, и мощности астеносферного слоя 200 км).

В частности, для Охотской плиты средний уровень ТМС, полученный в наших расчетах,

соответствует 0.18 Мпа, что при отсутствии сопротивления соседних плит могло бы дать значение скорости движения плиты около 11 см/год. Данные GPS дают сегодня для этой плиты скорости порядка 2–3 см/год. Важно также отметить, что для этой плиты интегральная по площади литосферы горизонтальная массовая сила имеет азимут простирания 158 град, что вполне соответствует GPS данным. Таким образом, предложенная и апробированная нами в рамках данных исследований концепция источника движения литосферных плит может рассматриваться как альтернативная общемантийной конвекции.

Другим базисом сопоставления наших результатов можно рассматривать работы по математическим расчетам литосферных напряжений, выполняющихся в рамках изучения роли динамической топографии. Здесь рассматриваются несколько подходов для объяснения современного поля напряжений в литосфере, данные о котором получают, используя сейсмологические каталоги механизмов очагов землетрясений. Считалось, что правильное задание сил, действующих на границах плит, вместе с учетом рельефа поверхности и плотностных неоднородностей в литосфере должно позволить получить данные об ориентации главных осей напряжений, близких к тем, что даются на известной карте мировых напряжений (M.-L. Zoback, 1992).

Большая часть таких работ при формулировке воздействий на литосферу опиралась на директивно задаваемые скорости движения плит. Другим источником напряжений рассматривались данные о топографии поверхности и о внутреннем строении литосферы (модели коры Crust 5.1 (Mooney et al., 1998), Crust 2.0 (Bassin et al., 2000) и Crust 1.0 (Laske et al., 2001)), которые определяли силы плавучести и тяги вниз со стороны подлитосферной мантии. Третьим типом сил являлись боковые силы на границах плит со стороны зон спрединга и тангенциальные силы (касательные напряжения), прикладываемыми на подошве литосферы, которые оценивались из градиентов вертикальных сил (Gloshetal., 2006). Разные авторы создавали разный комплект источников литосферных напряжений.

В тех численных моделях, где движения плит получали из мантийных течений, а учет динамической топографии был небольшим (Steinberger et al., 2001; Tutu et al., 2017), не удалось получить хорошего соответствия с современными напряжениями в океанской литосфере между зонами спрединга и субдукции, а также для горных поднятий Высокой Азии. Для численных моделей, где основным источником напряжений и движений литосферных плит считалась в большей части динамическая топография (Glosh et al., 2006), удалось получить хорошее соответствие

с современными напряжениями в океанской литосфере между зонами спрединга и субдукции. В модели, где основным источником напряжений и движений литосферных плит считалось директивно задаваемое движение литосферных плит (в полном объеме или большая их часть), а также учитывался вклад динамическая топография (Bird et al., 2008), также удалось получить хорошее соответствие с современными напряжениями в океанской литосфере между зонами спрединга и субдукции. Во всех моделях не удалось получить хорошего соответствия напряжений в горных областях, в особенности для крупных платообразных поднятий Тибета, Памира и Антипано.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненных нами исследований показали, что на больших площадях (первые тысячи километров) океанских участков литосферных плит имеет место однонаправленное уклонение нормали к ФПЗ от отвесной линии. Это отклонение наиболее часто достигает 10–15°, но также существуют плиты, для которых эти уклонения достигают 30°. В целом можно заключить, что соотношение формы поверхности Земли и ее геоида не отвечает равновесному состоянию.

Выполненные оценки касательных напряжений, которые ТМС силы способны создать на подошве литосферных плит, могут достигать 0.3 Мпа, что позволяет объяснить скорости движения литосферных плит в 3–10 см/год.

Действие ТМС также способно создать дополнительные напряжения сжатия или растяжения в латеральном направлении. Но уровень этих напряжений не превышает первых десятков Мпа, что не позволяет их рассматривать как структурообразующие для прочной континентальной коры.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ 17-05-01193а.

Список литературы [References]

- Авсюк Ю.Н.* Эволюция системы Земля-Луна и ее место среди проблем нелинейной геодинамики // Геотектоника. 1993. № 1. С. 13–22 [*Avsyuk Yu.N.* Evolution of the Earth-Moon system and its place among the problems of nonlinear geodynamics // Geotectonics, 1993. № 1. P. 13–22 (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. Т. 1. М.: ГЕОС, 2005. С. 30–33 [*Barkin Yu.V.* Celestial mechanics of the earth's core and mantle: geodynamic and geophysical consequences. Tectonics of the earth's crust and mantle.

- Tectonic regularities of mineral deposits placement. Ed. Yu. V. Karyakin. V. 1. M.: GEOS. 2005. P. 30–33 (in Russian).
- Дмитренко А.П.* Современные трансформации определения геоида. Кривой Рог: Минерал, 2012. 218 с. [*Dmitrenko A.P.* Modern transformations of the geoid definition. Kryvyi Rih: Mineral, 2012. 218 p. (in Russian)].
- Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А.* Глубинная геодинамика. Новосибирск: Гео, 2001. 2-е изд. 409 с. [*Dobretsov N.L., Kirdyashkin A.G., Kirdyashkin A.A.* Deep geodynamics. Novosibirsk: Гео, 2001. 2nd ed. 409 p. (in Russian)].
- Добролюбов А.И.* Волновой перенос вещества. М.: КомКнига, 2005. 256 с. [*Dobrolyubov A.I.* Wave transfer of matter. Moscow: KomKniga. 2005. 256 p. (in Russian)].
- Жарков В.Н.* Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука. 2013. 416 с. [*Zharkov V.N.* Internal structure of the Earth and planets. M: Nauka, 2013. 416 p. (in Russian)].
- Кащеев Р.А.* Современный взгляд на проблему изучения фигуры земли и фигур тел солнечной системы // Ученые записки Казанского государственного университета. 2010. Т. 152. Кн. 1. Естественные науки. С. 261–269 [*Kashcheev R.A.* Modern view on the problem of studying the figure of the earth and the figures of bodies of the solar system // Scientific notes of the Kazan state University. 2010. V. 152. Book 1. Natural Sciences. P. 261–269 (in Russian)].
- Лейбензон Л.С.* Деформация упругой сферы в связи с вопросом о строении Земли. 1910. 125 с. [*Leibenzon L.S.* Deformation of an elastic sphere in connection with the question of the structure of the Earth. 1910. 125 p. (in Russian)].
- Лобковский Л.И., Котелкин В.Д.* Двухъярусная термохимическая конвекция в мантии и ее геодинамические следствия // Проблемы глобальной геодинамики. М.: ГЕОС, 2000. С. 29–53 [*Lobkovsky L.I., Kotelkin V.D.* Two-tier thermochemical convection in the mantle and its geodynamic consequences // Problems of global geodynamics, Moscow: GEOS, 2000. P. 29–53 (in Russian)].
- Молоденский М.С.* Упругие приливы, свободная нутация и некоторые вопросы строения Земли / Труды Геофиз. Ин-та АН СССР. 1953. Т. 19. 146 с. [*Molodensky M.S.* Elastic tides, free nutation and some problems of the structure of the Earth / Proceedings Geophys. In-ta AS USSR. 1953. V. 19. 146 p. (in Russian)].
- Мориц Х.* Геодезия и картография. 2001. 27 с. [*Moritz Kh.* Geodesy and cartography. 2001. 27 p. (in Russian)].
- Морозов Ю.А.* Цикличность кинематических инверсий в подвижных поясах в свете лунно-земных связей // Геотектоника. 2004. № 1. С. 21–50 [*Morozov Yu.A.* Cyclicity of kinematic inversions in mobile belts in the light of lunar-terrestrial connections // Geotektonics. 2004. № 1. P. 21–50 (in Russian)].
- Павленкова Н.И.* Ротационные движения крупных элементов Земли и глобальная геодинамика // Ротационные процессы в геологии и физике. М.: КомКнига, 2007. С. 103–114 [*Pavlenkova N.I.* Rotational movement of major elements of the Earth and global geodynamics // Rotational processes in Geology and physics. M.: Komkniga, 2007. P. 103–114 (in Russian)].
- Ребецкий Ю.Л.* Тектонические напряжения и прочность горных массивов. М.: Академкнига, 2007. 406 с. [*Rebetsky Yu.L.* Tectonic stresses and strength of mountain massifs. M.: Akademkniga, 2007. 406 p. (in Russian)].
- Ребецкий Ю.Л.* Оценка величин напряжений в методе катакластического анализа разрывов // ДАН. 2009. Т. 428. № 3. С. 397–402 [*Rebetsky Yu.L.* Estimation of stress values in the method of cataclastic analysis of shear fracture // Doklady Earth Sciences. 2009. V. 428. № 3. P. 397–402].
- Ребецкий Ю.Л.* Оценка влияния суточного вращения Земли на напряженное состояние континентальной коры // ДАН. 2016. Т. 469. № 2. С. 230–234. <https://doi.org/10.1134/S1028334X1607014X> [*Rebetsky Yu.L.* Estimation of the Influence of Daily Rotation of the Earth on the Stress State of the Continental Crust // Doklady Earth Sciences. 2016. V. 469. № 2. P. 230–234].
- Ребецкий Ю.Л., Кучай О.А., Маринин А.В.* Напряженное состояние и деформации земной коры Алтае-Саян // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 2. С. 271–291. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2013.01.011> [*Rebetsky Yu.L., Kuchai O.A., Marinin A.V.* Stress state and deformation of the Earth's crust in the Altai-Sayan mountain region // Russian Geology and Geophysics. 2013. V. 54. № 2. P. 271–291].
- Ребецкий Ю.Л., Маринин А.В.* Поле тектонических напряжений до Суматра-Андаманского землетрясения 26.12.2004. Модель метастабильного состояния горных пород // Геология геофизика. 2006. Т. 47. № 11. С. 1192–1206 [*Rebetsky Yu.L., Marinin A.V.* Preseismic stress field before Sumatra-Andaman earthquake of 26.12.2004. A model of Metastable state of rocks // Russian Geology and Geophysics. 2006. V. 47. № 11. P. 1192–1206].
- Ребецкий Ю.Л., Мягков Д.С.* Обратные задачи геодинамики и роль ротационных инерционных сил (Ответ на работу А.В. Викулина «Проблема ротационных движений в геологии» // Вестник КРАУНЦ. 2016. Вып. 30. № 2. С. 88–95 [*Rebetsky Yu.L., Myagkov D.S.* Inverse problems of geodynamics and the role of rotational inertial forces (Response to the work of A.V. Vikulin «the Problem of rotational movements in Geology» // Vestnik KRAUNTs. 2016. № 2 (30). P. 88–95 (in Russian)].
- Ребецкий Ю.Л., Полец А.Ю.* Напряженное состояние литосферы Японии перед катастрофическим землетрясением Тохоку 11.03.2011 // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. Вып. 2. С. 469–506. <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2014-5-2-0137> [*Rebetsky Yu.L., Polets A.Yu.* The state of stresses of the lithosphere in Japan before the catastrophic Tohoku earthquake of 11 march 2011 // Geodynamics & Tectonophysics. 2014. V 5. Iss. 1. P. 469–506 (in Russian)].
- Ревуженко А.Ф.* О приливном механизме переноса масс // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1991. № 6. С. 13–20 [*Revuzhenko A.F.* On the mechanism of tidal transfer of mass // Izv. ASUSSR. Physics of the Earth. 1991. P. 13–20 (in Russian)].
- Сеначин В.Н., Баранов А.А.* гравитационные аномалии коры и верхней мантии Центральной и Южной Азии // Геодинамика и тектонофизика. 2016.

- Вып. 7. № 4. С. 513–528. <https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-4-0220> [Senachin V.N., Baranov A.A. Gravity anomalies of the crust and upper mantle for central and south Asia. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2016. V. 7. Iss. 4. P. 513–528 (in Russian)].
- Стейси Ф. Физика Земли. М.: Мир, 1972. 342 с. [Stacey F.D. *Physics of the Earth*. New York. John Wiley & Sons, Inc. 1969. 344 p.].
- Стовас М.В. Избранные труды. М.: Недра, 1975. 155 с. [Stovas M.V. *Selected works*. М.: Nedra, 1975. 155 p. (in Russian)].
- Трифонов В.Г., Соколов С.Ю. Подлитосферные течения в мантии // Геотектоника. 2017. № 6. С. 3–17. [Trifonov V.G., Sokolov S.Y. Sublithospheric flows in the mantle // *Geotectonics*. 2017. № 6. P. 535–548].
- Трубицын В.П., Рыков В.В. Мантийная конвекция с плавающими континентами / Проблемы глобальной геодинамики / Д.В.Рундквист (ред.). М.: ГЕОС. 2000. С. 7–28. [Trubitsyn V.P., Rykov V.V. Mantle convection with floating continents / *Problems of global geodynamics* / D.V. Rundqvist (ed.). Moscow: GEOS. 2000. P. 7–28 (in Russian)].
- Хаин В.Е., Поletaев А.И. Ротационная тектоника Земли // Наука в России. 2007. № 6. С. 14–21 [Khain V.E., Poletaev A.I. Rotational tectonics of the Earth // *Science in Russia*. 2007. № 6. P. 14–21 (in Russian)].
- Bassin C., Laske G., Masters G. The Current Limits of Resolution for Surface Wave Tomography in North America, *EOS Trans AGU*. 2000. V. 81. F897.
- Bird P., Liu Z., Rucker W.K. Stresses that drive the plates from below: Definitions, computational path, model optimization, and error analysis // *JGR*. 2008. V. 113. B11406. <https://doi.org/10.1029/2007JB005460>.
- Coltice N., Husson L., Faccenna C., Arnould M. What drives tectonic plates? *Science Advances*. 2019. V. 5. № 10. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax4295>.
- Dogliani C., Panza G. Polarized Plate Tectonics // *Advances in Geophysics*. 2015. V. 56. P. 1–167. <http://dx.doi.org/10.1016/bs.agph.2014.12.001/>.
- Ghosh A., Holt W.E., Haines A.J., Flesch L.M. Gravitational potential energy of the Tibetan Plateau and the forces driving the Indian plate // *Geology*. 2006. V. 34. P. 321–324.
- Hardebeck J. Coseismic and postseismic stress rotations due to great subduction zone earthquakes // *Geophysical Researches Letters*. 2012. V. 39. L21313.
- Hasegawa A., Yoshida K., Asano Y. et al. Change in stress field after the 2011 great Tohoku-Oki earthquake // *Earth Planetary Science Letters*. 2012. V. 355. P. 231–243.
- Hofmann-Wellenhof B., Moritz H. *Physical Geodesy*. 2005. Springer Wien New York. 403 p.
- Jeans J.H. *Proc. Roy. Soc. London*. 1917. ser. A. V. 93. P. 293.
- Love A.E.H. *Proc. Roy. Soc. London*. 1909. Ser. A. V. 82. P. 73.
- Jeffreys H. *The Earth*. London: Cambridge University Press. 1952. 485 p.
- Laske G., Masters T.G., Reif C. CRUST 2.0: A new global crustal model at 2 x 2 / 2001. 1070 .degrees, edited, <http://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust2.html>.
- Mooney W.D., Laske G., Masters T.G. CRUST 5.1: A global crustal model at 5°x5°, 1097 *Journal of Geophysical Research*, 1998. V. 103 (B1). P. 727–747.
- Rebetsky Yu.L., Polets A.Yu., Zlobin T.K. The state of stress in the Earth's crust along the northwestern flank of the Pacific seismic focal zone before the Tohoku earthquake of 11 March 2011 // *Tectonophysics*. 2016. V. 685. P. 60–76. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2016.07.016>.
- Steinberger B., Schmelting H., Marquart G. Large-scale lithospheric stress field and topography induced by global mantle circulation // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2001. V. 186. P. 75–91.
- Turcotte D., Shubert G. *Geodynamics*. Cambridge University Press; 3rd Edition. 2014. 636 p.
- Tutu A.O., Steinberger B., Sobolev S.V. et al. Effects of upper mantle heterogeneities on lithospheric stress field and dynamic topography // *Solid Earth*. 2018. V. 9. № 3. P. 649–668. <https://doi.org/10.5194/se-9-649-2018>.
- Zoback M.L. First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: The World Stress Map Project // *JGR*. 1992. B897. P. 11703–11728.

ГЕНЕЗИС ТАНГЕНЦИАЛЬНЫХ МАССОВЫХ СИЛ
**THE GENESIS OF TANGENTIAL MASS FORCES
IN LITHOSPHERIC PLATES, AND THEIR ROLE IN GEODYNAMICS**

Yu.L. Rebetsky, D.S. Myagkov

Schmidt Institute of Earth physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, 123242; e-mail: reb@ifz.ru

The problem of determining small tangential mass forces in the Earth lithosphere is formulated. It is shown that the current state in understanding the shape of The Earth's physical surface and data on its geoid allow us to determine deviations of the vertical line from the normal to the Earth's surface on the scale of averaging in the first hundreds of kilometers. It is established that for large areas of lithospheric plates, systematic unidirectional deviations of the vertical line from the normal to the surface are observed. Small tangential mass forces calculated from these data are of the order $n 10^{-4} \text{ G/cm}^3$. If there is a stable surface gradient over areas of the first thousand kilometers (the oceanic part of the lithospheric plates) tangential mass forces can create additional compressive or tensile horizontal stresses of the order of 10–15 MPa. These forces, summed up by the depth of the lithosphere, are able to overcome the level of tangential stresses of 0.2–0.3 MPa at its bottom, and therefore they can be considered as a source of plate motion.

Keywords: geodynamics, physical surface of the Earth, geoid, tangential mass forces.

Поступила в редакцию 20.07.2020 г.

После доработки 18.09.2020 г.

Принята к публикации 21.09.2020 г.