

УДК 528.2+551

А. Л. Церклевич, А. С. Заяць, Е. А. Шило, О. М. Шило

Национальный университет «Львовская политехника»
ул. С. Бандеры 12, Львов, 79013
anatoltser@gmail.com

Генерация напряженного состояния литосферы Земли и Марса, обусловленная переориентацией их фигур

Выполнено компьютерное моделирование переориентации фигуры литосферы Земли и Марса. Показано, что фигура поверхности литосферы имеет иную ориентацию, чем фигура геоида (ареоида), и в процессе эволюционного саморазвития планеты в результате действия эндогенных и гравитационно-ротационных сил происходит перераспределение масс, что приводит к напряженному состоянию литосферы. Решение этой задачи рассматривается на примере аппроксимации высот поверхности литосферы двухосным эллипсоидом с семью параметрами. Введя понятие «эволюционного отклонения отвеса» и предположив, что тангенциальные силы пропорциональны углу между направлением линии отвеса в прошедшую геологическую эпоху и нынешним направлением в заданной точке, рассчитаны действующие горизонтальные силы в верхней оболочке планеты. Вычисленные поля векторов тангенциальных сил показывают хорошее совпадение с направлением пространственно-временного перемещения материков и тектонических плит на Земле и согласуются с результатами измерений горизонтальных составляющих векторов смещений станций GNSS. Это достаточно убедительно свидетельствует о том, что литосферные массы при длительном воздействии вихревых ротационно-гравитационных сил приобретают свойства ползучести. В результате взаимодействующие блоки и плиты в рамках вихревой ротационно-гравитационной модели могут быть связанными упругими полями, которые создают единое планетарное геодинамическое поле, формирующее эволюционное состояние геосреды.

Ключевые слова: фигура поверхности литосферы, геоид, ареоид, гравитационно-ротационные силы, эволюционное отклонение отвеса, тангенциальные массовые силы.

ВВЕДЕНИЕ

Среди планет земной группы относительно быстрое вращательное движение имеют Земля и Марс, которые, вероятно, в процессе эволюции изменяли ориентацию фигуры и угловую скорость. Вариации ротационного режима движения этих планет как космических тел, а также эндогенные и экзогенные процессы приводят к трансформации фигуры внешней поверхности литосферы на протяжении геологической истории. Сопутствующим фактором этих процессов является нарушение напряженно-деформированного состояния литосферы. Можно предположить, что доминирующим источником сил, влияющим на равновесное состояние планеты (состояние геоизостазии [15]), с большой вероятностью являются изменения угловой скорости и переориентация фигуры поверхности литосферы относительно фигуры, которая обобщенно представляет геоид Земли или ареоид Марса.

Уровненную поверхность (геоид или ареоид) в сравнении с физической поверхностью в планетарном масштабе отличает более устойчивое (стабильное) состояние, так как на ее формирование оказывает наибольшее влияние распределение неоднородных мантийных масс. Об этом свидетельствуют данные сейсмической томографии, которые указывают на глубокие мантийные неоднородности в горизонтальном простирании, а существование крупнейших мантийных горячих точек подтверждается их устойчивым положением во времени и пространстве. Если принять это предположение, то динамическую эволюцию фигуры Земли и Марса можно рассматривать как следствие процесса перераспределения масс в силовом поле. Внешним проявлением этого процесса является фигура планеты, которая под действием ротационно-гравитационных сил приобретает форму с минимальной потенциальной энергией. В то же время, очевидно, оказывают влияние и другие силы, которые определяют ход внутренних процессов, и направлены против действия гравитационных сил.

Таким образом, действие этих противоположных сил формирует общее напряженно-деформационное поле из-за деформации топологии поверхности планеты и соответствующей динамической реакции, возникающей вследствие перераспределения масс. Эти массы находятся под влиянием сил, действие которых порождает процессы перехода от одного состояния временного равновесия к другому в различных временных и пространственных масштабах в планетарном поле напряжений и деформаций. В зависимости от физико-механических свойств пород структурной среды, значений и масштабов геометрических параметров тектонических форм и продолжительности действия сил, этот непрерывный процесс реакции имеет свою критическую границу напряжений. После достижения критического напряжения фигура планеты трансформирует свою форму, а это приводит к тому, что в разных направлениях на ее поверхности могут происходить разрушения в виде трещин регионального масштаба, образования линеаментных структур и гигантских геологических разломов.

Кроме того, можно полагать, что на интегральное поле напряжений в эллипсоидальных оболочках планеты помимо гравитационно-ротационных сил, связанных с планетарным перераспределением масс, влияют другие факторы, которые проявляются во взаимодействии вещества в теле планеты в региональном или локальном масштабе на протяжении геологического времени. Поэтому учет всех факторов, воздействующих на напряженное состояние в оболочках планеты, представляется довольно сложной проблемой. Можно лишь высказать ряд предположений о возможных причинах возникновения планетарных напряжений, среди них в первую очередь выделим гравитационное взаимодействие оболочек планет. Кроме того, это действие центробежных и инерционных сил, связанных с вращением и перемещением полюса планеты, а также перераспределение массы, вызванные химически-плотностной дифференциацией вещества и конвекционными процессами, перемещением ядра, дегазацией Земли и тому подобное.

Цель данной работы показать, как в процессе эволюционного саморазвития планеты в результате действия ротационно-гравитационных сил происходит перераспределение масс, которое приводит к напряженно-деформированному состоянию литосферы и как следствие к трансформации фигуры поверхности Земли и Марса. Указанные силы, с нашей точки зрения, являются наиболее реалистичными, а не гипотетическими силами, и построение механико-математических моделей с их использованием может раскрыть новые возможности в интерпретации тектонических процессов исследуемых планет.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

О перемещении магнитного полюса известно давно, однако и географическое положение полюса вращения планеты может изменяться. Имеется в виду перемещение полюса в системе координат, связанной с корой, относительно положения полюса, координаты которого условно приняты в качестве начальной эпохи. Известно, что ось максимального момента инерции вращающейся планеты стремится совпадать с осью вращения. Хотя ось вращения фиксируется в пространстве согласно закону сохранения момента количества движения (сохраняется направление и величина момента импульса), процессы внутри планеты могут изменить момент инерции и переориентировать поверхность литосферы относительно полюса оси вращения. Небесные возмущения орбиты планеты могут также приводить к медленным изменениям ориентации направления оси вращения, и хотя эти изменения, возможно, связаны с тектоническими циклами, которые изучаются геологами, однако пока в научной литературе нет прямых расчетных доказательств, как такие изменения могут влиять на ее тектоническую активизацию [6, 16].

В своем исследовании У. Кэри [7] наиболее обстоятельно коснулся проблемы перемещения полюса вращения Земли. Он приводит оценки смещения оси вращения планеты за длительный период ее истории, которые были получены на основании многолетних прямых реконструкций годовых круговых перемещений полюсов вращения Земли по палеомагнитным и палеоклиматическим данным.

Аналогичные работы были выполнены А. В. Долицким [4]. В последнее время геологами А. Малуфом с сотрудниками [23] были высказаны предположение о том, что 800 млн лет назад произошло смещение географических полюсов Земли. Они обнаружили, изучая магнитные полезные ископаемые в древних осадочных породах норвежского архипелага, что северный магнитный полюс тогда сместился сразу на 50° за 20 млн лет. А поскольку тектонические плиты движутся намного медленнее, то это смещение поверхности относительно ядра, где формируется магнитное поле, можно объяснить переориентированием земного шара, то есть относительно быстрым изменением положения оси вращения. Такой процесс может начаться после возникновения некоторого заметного дисбаланса масс в мантии или в литосфере. Аналогичное событие, вероятно, произошло на Марсе в процессе зарождения гигантского вулкана Olympus Mons и других больших вулканов нагорья Tharsis.

Так, наши исследования [18] дают основания утверждать, что в процессе геологической эволюции Земли и Марса возникали тектонические структуры планетарного масштаба, которые существенно могли повлиять на параметры вращения этих планет. Было исследовано влияние роста и разрушения гипотетического реликтового поднятия Дарвина [9] на величину угловой скорости вращения и изменение положения оси вращения Земли. Аналогичные расчеты проведены также для оценки изменения угловой скорости вращения и положения оси вращения Марса, которые могли бы возникнуть в результате вулканического образования Tharsis [10]. В основу расчетов была положена простая механическая модель планеты в виде шара с радиусом R однородной плотности ρ , которая вращается вокруг оси Z (рис. 1). Тектоническая структура представляется обобщенно в виде сферической четырехугольной срезанной пирамиды однородной плотности ρ_1 , ограниченной сферическими координатами $r_1, r_2, \theta_1, \theta_2, \phi_1, \phi_2$. Понятно, что реальное распределение плотности вдоль радиуса планеты существенно отличается от однородного. Кроме того, механизм возникновения и растекания плюма, а также образование вулканических структур предусматривает перенос масс с большей плотностью из глубин мантии в верхние слои планеты. Поэтому плотность вещества в рассматриваемой пирамиде в период образования вулканической структуры может измениться до величины ρ_2 , а радиус сферической наружной поверхности этой пирамиды r_2 станет больше среднего радиуса шара R . Если принять, что масса объема пирамиды не изменилась в результате перераспределения масс, то получим выражения для оценки относи-

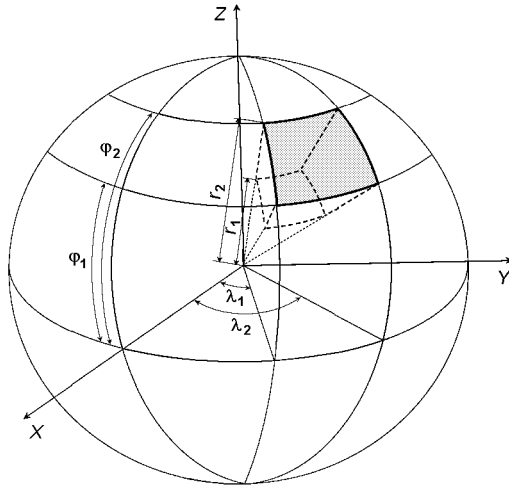


Рис. 1. Иллюстрация размещения четырехугольной сферической усеченной пирамиды однородной плотности выделенного объема

тельной величины изменения скорости вращения $d /$ и угла изменения положения оси вращения планеты:

$$\frac{d}{dt} = \frac{30}{8} \frac{H}{R^2} \frac{h}{R}, \quad \frac{H}{R} \frac{h}{R}, \quad (1)$$

где

$$H = R \left(r_1^2 - r_2^2 \right) \sin^2 \lambda_1 \cos^2 \lambda_2, \quad h = R \left(\sin^2 \lambda_1 - \sin^2 \lambda_2 \right) \cos^2 \lambda_2,$$

— динамическое сжатие. Таким образом, учитывая данные, приведенные в табл. 1, согласно формулам (1) для Земли поднятие Дарвина могло сместить полюс до 15 км, а скорость вращения замедлить на 0.09 с. На Марсе вулканическое поднятие Tharsis могло привести к изменению положения полюса на 6 км и скорости вращения на 0.06 с.

Полученные результаты, безусловно, являются оценочными, и их можно интерпретировать как возможный вариант развития динамических процессов, которые могут привести к изменению положения оси вращения, сжатия фигуры и, как следствие, вызвать напряженное состояние и возникновение разломных структур в литосфере планет.

Если представить земной шар без воды, то обнаружим, что рельеф земной поверхности существенно отличается от геоида. Сравнивая

Таблица 1. Исходные данные и полученные результаты для Земли (структура Дарвина [4]) и Марса (структура Tharsis [5])

Планета	R, км	H, км	h, км	λ_1	λ_2	ϕ_1	ϕ_2	$d / dt, 10^{-6}$	$\Delta \lambda$	
Земля [4]	6371	1000	2	1/300	20 N	35 N	155 W	195 W	1.1156	475
Марс [5]	3390	1000	15	1/200	12 N	106 S	101 W	125 W	0.65734	262

карту геоида с тектоническими картами, приходим к известному выводу об отсутствии связи высот геоида с тектоническими структурами. Высоты геоида проявляют абсолютно независимое распределение даже по отношению к самым крупным тектоническим структурам литосферы: континентальным поднятиям и океаническим впадинам. Таким образом, аномалии высот геоида отражают в основном не современный «структурный план» верхних оболочек Земли, а совокупное влияние более древних «структурных планов». В то же время лунные приливы приводили к перепаду гравитации и изменению формы Земли, создавая огромные ротационные механизмы, которые дополнительно влияли на перераспределение масс и на напряженное состояние нашей планеты.

Видимое отсутствие взаимосвязи высот геоида с поверхностью литосферы может быть также обусловлено и негомтетичным размещением планетарных структур физической поверхности Земли по отношению к фигуре геоида, вызванное перемещением литосферных плит. Последнее может приводить к вращению всей литосферы Земли относительно более устойчивой фигуры геоида, что, возможно, отразилось на различиях значений параметров и ориентирования геометрических фигур, аппроксимирующих физическую поверхность и геоид.

На рис. 2, *а* представлена картосхема распределения скользящих коэффициентов корреляции (СКК), характеризующая взаимосвязь между длинноволновыми особенностями топографической и гравитационной фигур Земли [17]. Видно преобладание отрицательных значений СКК и их симметричное расположение относительно сечения по дуге большого круга, наклоненного к экватору. Эта особенность распределения СКК может означать, что фигуры, которые аппроксимируют поверхность литосферы и геоид, не совпадают. Такое неустойчивое положение приводит к геодинамическому процессу, который проявляется в тенденции геосфер Земли приобрести состояние геостатического равновесия, при котором указанные фигуры должны совпадать, а это приводит к возникновению напряженного состояния в литосфере.

Для Марса количественный характер изменения СКК, показанный на рис. 2, *б*, существенно другой. Обращает на себя внимание исключительно преобладающая положительная корреляция между высотами рельефа уровневой и физической поверхностей для этой планеты. Наличие такой тесной корреляционной зависимости, особенно между высотами уровневой и физической поверхностями, вычисленными по гармоникам 2-го порядка их разложения в ряд по сферическим функциям, указывает на то, что длинноволновые особенности гравитационной и геометрической фигуры планеты, в противоположность Земле, гомотетично расположены в экваториальной части. Для северной и южной части характерно преобладание отрицательных значений СКК.

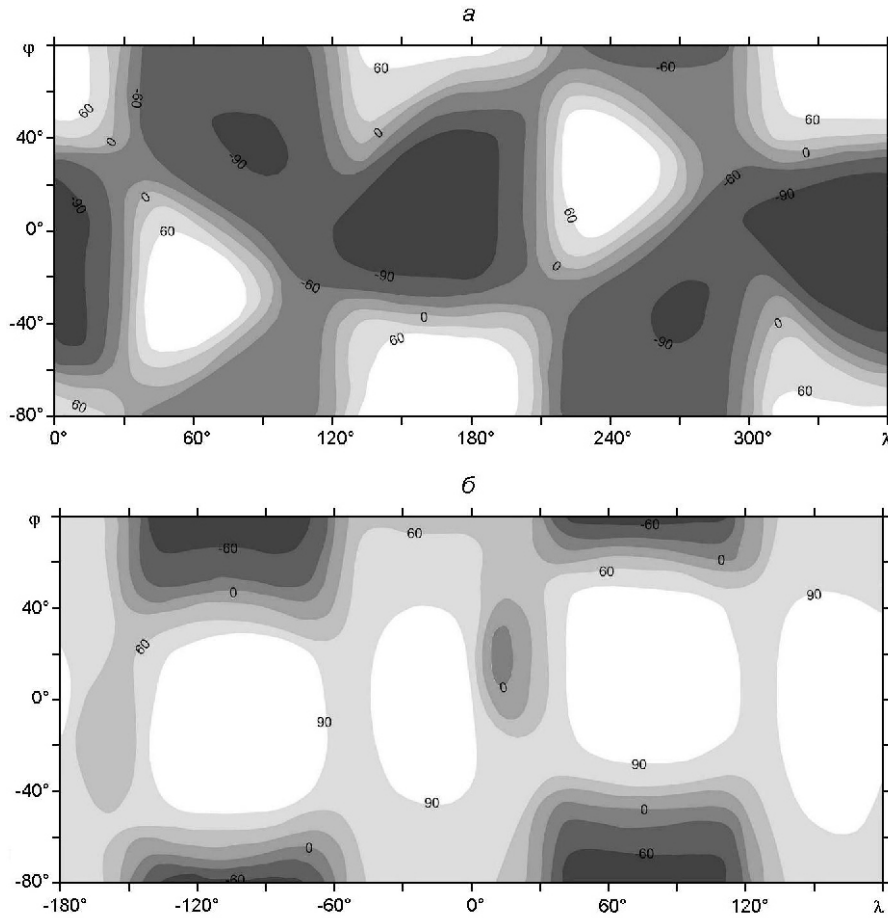


Рис. 2. Распределение скользящих коэффициентов корреляции (СКК) между высотами уровневой и физической поверхности Земли (а) и Марса (б) с учетом коэффициентов разложения по сферическим функциям до 2-го порядка. Изокореляты проведены через 30 %

На топографической карте Марса поражает прежде всего кардинальное отличие северного и южного полушарий планеты и огромный вулканический регион Tharsis. Возможно, что обе эти особенности — последствия одного и того же динамического процесса, который проходил на планете. По исследованиям планетологов, марсианская дихотомия возникла не менее чем 4.1 млрд лет тому назад, то есть вскоре после образования Марса как планеты [10]. Северная часть планеты — сплошная равнина, которая изредка пересекается невысокими горами и покрыта кратерами. Южная часть также изрыта метеоритными ударами, но более пересечена гористой местностью, с единственной равнинной впадиной Hellas. В среднем южное полушарие на 4—5 км выше, чем северное (относительно условного среднего уровня). Толщина коры южного полушария Марса примерно на 25 км больше, чем северного, а разница в толщине всей литосферы может быть в десять раз больше.

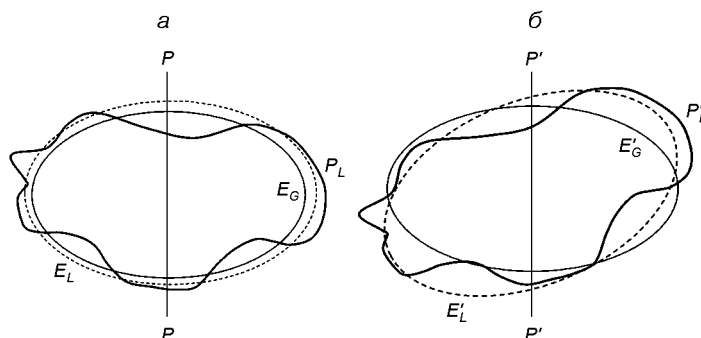


Рис. 3. Схема формирования фигуры Земли: *a* — в начальный период, когда Земля была ближе к гидростатическому состоянию; *б* — современное состояние фигуры и поверхности литосферы Земли

Научные концепции эволюции планет земной группы указывают на то, что в прошлом они были ближе к гидростатическому состоянию, чем сейчас [5]. В результате внешняя поверхность их литосферы совпадала с фигурой эллипсоида, который наилучшим образом описывал эквипотенциальную поверхность. Соответственно в тот далекий период времени направление линии отвеса совпадало с направлением нормали к эллипсоиду, который аппроксимировал внешнюю поверхность литосферы.

Схема эволюционного формирования фигуры Земли показана на рис. 3. На рис. 3, *a* для фигур и поверхности литосферы Земли в древнюю геологическую эпоху введены следующие обозначения: PP — ось вращения, P_L — поверхность литосферы, E_L — эллипсоид, который лучше всего подходит к поверхности литосферы, E_G — эллипсоид, изображающий фигуру Земли. Соответствующие фигуры и поверхности литосферы Земли в современную эпоху показаны на рис. 3, *б* (обозначены штрихом).

Таким образом, если сопоставить два положения внешних оболочек Земли на рис. 3, *a* и *б*, то можно допустить возникновения напряженного состояния с образованием зон сжатия и растяжения вследствие изменения положения оси вращения относительно ее фигуры. Фактические геологические данные свидетельствуют о том, что значительную роль в этом представляет тектонический фактор, обусловленный перемещением литосферных плит, которые могут влиять на изменение положения полюсов Земли.

Следовательно, можно предположить, что вертикальные (радиальные) силы нарушают осевую симметрию вращения Земли, а горизонтальные силы (за счет энергии вращения), возникающие при этом, восстанавливают эту симметрию путем соответствующего перемещения отдельных плит и блоков, а также «квазиджидкого» внутреннего вещества. Вполне возможно, что в этих же горизонтальных движениях участвуют все литосферные плиты, и их перемещение подчиняется

общему назначению горизонтальных перемещений — восстановлению осевой симметрии и сохранению момента количества вращения.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЙ

Для исследования динамики изменения фигуры Земли и Марса, а также оценки влияния изменённых параметров фигуры на распределение тангенциальных сил, которые могут приводить к напряженному состоянию литосферы, мы использовали идею аппроксимации высот физической поверхности этих планет двухосным эллипсоидом с семью параметрами. Кроме того, по материалам компьютерного моделирования высот палеореконокструкций размещения материков и водной поверхности на Земле в разные геологические периоды были определены соответствующие им параметры двухосных эллипсоидов и на их основе выполнено отслеживание вековых закономерностей трансформации ее фигуры. Путем решения обратной задачи по параметрам эволюционных изменений фигуры физической поверхности оценивались действующие силы, которые обуславливают динамику напряженного состояния литосферы Земли.

В соответствии с постановкой задачи прежде всего необходимо определить размеры и ориентировку такого эллипсоида, который наилучшим образом соответствует физической поверхности планеты. Алгоритм решения этой задачи был рассмотрен в работах [19, 20] на примере аппроксимации высот поверхности литосферы Земли двухосным эллипсоидом.

На рис. 4 показаны: P_L — физическая поверхность Земли, G — геоид, E_L — эллипсоид, параметры которого необходимо определить, O — центр масс Земли, O — геометрический центр эллипсоида, OZ — направление оси вращения Земли, OZ — линия, параллельная к оси OZ , OZ — направление малой полуоси эллипсоида E_L , α, β, γ — два из трех углов Эйлера. N — направление линии узлов, α, β, γ — углы и расстояние, которые определяют смещение эллипсоида относительно центра масс, x_0, y_0, z_0 — линейные параметры, которые определяют смещения искомого эллипсоида, T — точка на физической поверхности Земли, $OT = r$; $OO = r_0$; $OT = h$; $TT = h$; $OT = r$, H — высота точки T над уровнем моря.

Размер и ориентацию искомого эллипсоида E_L определим, используя условие $h^2 \rightarrow \min$. Это условие предполагает, что сумма квадратов расстояний между определяемым эллипсоидом и поверхностью литосферы минимальна.

В табл. 2 приведены значения параметров двухосного эллипсоида для Земли и Марса. Для Земли вычисления семи параметров эллипсоида выполнялось на основе данных цифровой модели поверхности Земли ETOPO1 [<https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>]. Для указанной модели высоты были усреднены в пределах трапеций

Рис. 4. Аппроксимация поверхности литосферы двuosным эллипсоидом с семью определяемыми параметрами (см. текст)

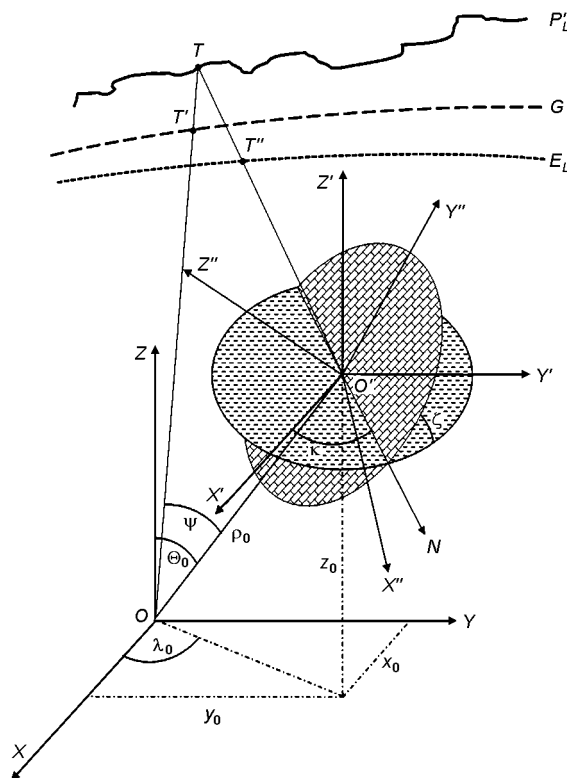


Таблица 2. Параметры двuosного эллипсоида

Планета	x_0 , м	y_0 , м	z_0 , м	a_{xy} , м	a_z , м	1/	, град	, град
Земля	-741.89	-491.57	1421.79	6375117.01	6355640.09	327.31650	133.77	2.61
Марс	549.71	925.06	3213.63	3396669.47	3360445.41	93.76834	-75.02	0.68

5 5°. В результате было получено 2592 значений высот поверхности литосферы h .

Для Марса определение параметров эллипсоида осуществлялось на основе набора данных, полученных благодаря марсианской космической миссии «Mars Global Surveyor» (MGS). Космический аппарат был выведен на орбиту вокруг Марса и проводил измерения высот топографической поверхности планеты с использованием лазерной альтиметрии [<https://attic.gsfc.nasa.gov/mola/index.html>]. Данные о высотах поверхности содержали 612 000 отметок над ареоидом в геодезической системе координат и были загружены с помощью сервиса «Mars Orbital Data Explorer» [<http://ode.rsl.wustl.edu/mars/indexProductSearch.aspx>].

Обратим внимание на то, что по результатам определения параметров эллипсоида полюс его наименьшей оси не совпадает с полюсом Земли, то есть экваториальная плоскость фигуры физической поверхности наклонена к экваториальной плоскости геоида, и соответ-

ствующий угол наклона составляет 2.6° , или 289 км по дуге меридиана. Для Марса отклонение наименьшей оси фигуры, которая обобщенно представляет поверхность литосферы, от оси вращения значительно меньше и составляет 0.7° , или 41 км по дуге меридиана.

Таким образом, по результатам исследований фигуры поверхности литосферы Земли оказалось, что эта фигура не гомотетично размещена относительно фигуры геоида. Такое размещение фигуры физической поверхности и фигуры геоида может создавать напряжение в литосфере Земли, которое направлено на приведение распределения масс в соответствии с фигурой геоида. Для Марса, очевидно, напряжения в литосфере из-за разной ориентации осей фигур, представляющих физическую поверхность и геоид, будут меньшими.

Для рассмотрения этого вопроса ограничимся определением только тангенциальных (горизонтальных) сил, возникающих в связи с этим перераспределением масс в верхних оболочках планеты (кора и верхняя мантия). Примем во внимание, что в прошлом планеты были ближе к гидростатическому состоянию, чем сейчас. Исходя из этого допущения, введем понятие «эволюционное отклонение отвеса» и предположим, что тангенциальные силы пропорциональны углу α , который определяется как угол между направлением линии отвеса в прошедшую геологическую эпоху и нынешним направлением в заданной точке. Заметим, что эллипсоид E_L в прошлом приближенно представлял уровневую поверхность планеты. Теперь ему соответствует эллипсоид E_L . Понятно, что размеры эллипсоида E_L в сравнении с E_L , претерпели изменение, поскольку изменилась поверхность литосферы, из-за чего параметры эллипсоидов E_L и E_L не являются идентичными. Однако можно предположить, что уровневая поверхность планеты E_L в прошлом примерно совпадала с поверхностью литосферы, и в случае такого предположения между направлениями линий отвеса (без нарушения общности к постановке задачи направления линии отвеса заменим на нормали к соответствующим эллипсоидам) образуется угол α .

При определении угла α не станем учитывать несовпадение центров эллипсоидов E_L и E_L , так как оно существенно не повлияет на результат. Долготы будем отсчитывать от линии узлов, т. е. от линии пересечения плоскости экватора эллипсоидов E_G и E_L .

Итак, для произвольной точки на эллипсоиде E_G можно записать такое соотношение для вычисления радиуса-вектора:

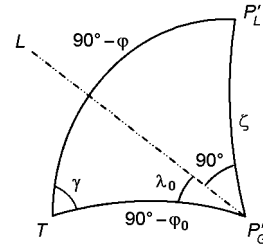
$$r_0 = a_0(1 - \sin^2 \theta_0), \quad (2)$$

где r_0 — радиус-вектор точки, θ_0 — широта, a_0 — сжатие планеты.

Радиус-вектор r_0 пересекает поверхность E_L в некоторой точке. Обозначим через r радиус-вектор этой точки, и соответственно получим соотношение для его вычисления:

$$r = a(1 - \sin^2 \theta), \quad (3)$$

Рис. 5. Иллюстрация к определению угла



где φ — широта, которая отсчитывается относительно плоскости экватора эллипсоида E_L , a и a_0 — соответственно большая полуось и сжатие этого эллипсоида.

Расстояние между эллипсоидами E_G и E_L определим, используя формулу

$$S = a_0 \left(a - a_0 \sin^2 \varphi_0 \right) \sin^2 \varphi_0 + a \sin^2 \varphi_0. \quad (4)$$

Рассмотрим рис. 5, где приняты следующие обозначения: P_G и P_L — точки расположения полюсов эллипсоидов E_G и E_L на единичной сфере, P_G — начальный меридиан, плоскость которого проходит через линию узлов, φ_0 — среднее расстояние между полюсами P_G и P_L , T — точка, в которой определяем угол γ . Выразим угол γ через углы φ_0 и λ_0 (угол λ_0 — долгота точки, которая отсчитывается от линии узлов):

$$\sin \gamma = \cos \varphi_0 \sin \lambda_0 + \sin \varphi_0 \sin \lambda_0. \quad (5)$$

Формулу (4) можно записать в виде

$$S = a - a_0 + (a_0 - a \cos^2 \varphi_0) \sin^2 \varphi_0 + a \sin^2 \varphi_0 \cos^2 \lambda_0 + \frac{1}{2} a \sin 2\varphi_0 \sin 2\lambda_0. \quad (6)$$

Для упрощения формулы (6) введём такие обозначения:

$$A = a - a_0, B = a_0 - a \cos^2 \varphi_0, C = a \sin^2 \varphi_0, D = \frac{1}{2} a \sin 2\varphi_0. \quad (7)$$

В результате получим

$$S = A + B \sin^2 \lambda_0 + C \cos^2 \lambda_0 \sin^2 \varphi_0 + D \sin 2\lambda_0 \sin \varphi_0. \quad (8)$$

Составляющие «эволюционного отклонения отвеса» в плоскости меридиана и в плоскости первого вертикала можно записать так:

$$\frac{1}{R} \frac{S}{\sin \varphi_0}, \quad \frac{1}{R \cos \varphi_0} \frac{S}{\sin \varphi_0}, \quad (9)$$

где R — средний радиус планеты.

Дифференцируя выражение (8), получим

$$\frac{S}{R} = 2B \sin \lambda_0 \cos \lambda_0 + 2C \sin \lambda_0 \cos \lambda_0 \sin^2 \varphi_0 + 2D \cos 2\lambda_0 \sin \lambda_0, \quad (10)$$

$$\frac{S}{0} = 2C \cos^2 \theta_0 \sin \theta_0 \cos \theta_0 + D \sin 2\theta_0 \cos \theta_0. \quad (11)$$

Соответственно для составляющих отклонений отвеса имеем

$$\frac{2B}{R} \sin \theta_0 \cos \theta_0 + \frac{2C}{R} \sin \theta_0 \cos \theta_0 \sin^2 \theta_0 + \frac{2D}{R} \cos 2\theta_0 \sin \theta_0, \quad (12)$$

$$\frac{2C}{R} \cos^2 \theta_0 \sin \theta_0 \cos \theta_0 + \frac{D}{R} \sin 2\theta_0 \cos \theta_0. \quad (13)$$

От составляющих «эволюционного отклонения отвеса» перейдем к тангенциальным составляющим сил, действующих на единицу массы в верхнем слое планеты. Для этого умножим выражения (12) и (13) на ускорение свободного падения g . Получим

$$m = \frac{Bg}{R} \sin 2\theta_0 + \frac{Cg}{R} \sin 2\theta_0 \sin^2 \theta_0 + \frac{2Dg}{R} \cos 2\theta_0 \sin \theta_0, \quad (14)$$

$$n = \frac{Cg}{R} \cos^2 \theta_0 \sin 2\theta_0 + \frac{Dg}{R} \sin 2\theta_0 \cos \theta_0. \quad (15)$$

Таким образом, формула (8) позволяет рассчитать расстояния между эллипсоидами E_G и E_L , т. е. понижение или возвышение литосферы относительно уровня геоида (ареоида) вследствие поворота жесткой литосферы планеты, вызванное ее смещением как целостной оболочки. Формулы (14) и (15) определяют потенциальные силы, которые воздействуют на распределения масс и приводят их в состояние равновесной механической системы, вращающейся вокруг оси наименьшего момента инерции.

Заметим, что коэффициент A в формуле (8) нуждается в корректировке с учетом неизменности объема эллипсоидов. Определяя A , будем исходить из того, что объем планеты за последние геологические эпохи существенно не изменился. Это условие приводит к равенству

$$a_0^2 b_0 = a^2 b. \quad (16)$$

Принимая

$$a = a_0 \left(1 + \frac{a}{a_0} \right), \quad (17)$$

$$b = a_0 \left(1 - \frac{a}{a_0} \right) = a \left(1 - \frac{a}{a_0} \right),$$

получим

$$1 - \frac{a}{a_0} = \left(1 + \frac{a}{a_0} \right)^2 \left(1 - \frac{a}{a_0} \right). \quad (18)$$

Учитывая малые величины первого порядка и выражение (18), получим

$$\frac{a}{a_0} = 3 \frac{a}{a_0}. \quad (19)$$

Соответственно с той же точностью имеем

$$a = a_0 + c, \quad (20)$$

где c — постоянная, которую вычисляют на основе замены a и α их значениями. После этого получим

$$\frac{A}{a_0}, \quad a = \frac{a_0}{3}(\alpha_0). \quad (21)$$

С учетом предыдущих упрощений выражение (8) можно представить в таком виде:

$$S = \frac{a}{2} \sin^2 \alpha_0 \sin 2\alpha_0 \sin 2\alpha + a \cos^2 \alpha \sin^2 \alpha_0 - a \sin^2 \alpha \sin^2 \alpha_0 \cos^2 \alpha_0 - a a_0. \quad (22)$$

Представляет интерес определение наибольшего поднятия одного эллипсоида над другим, которое может проходить по кривой линии (условно эту линию можно назвать «тектоническим водоразделом»). Вдоль этой линии может проходить разлом в литосфере или разделение литосферных плит.

Максимальное значение высоты в плоскости заданного меридиана можно определить из условия

$$\frac{S}{\alpha} = 0, \quad (23)$$

или

$$B \sin 2\alpha_0 - C \sin 2\alpha_0 \sin^2 \alpha_0 - 2D \cos 2\alpha_0 \sin \alpha_0 = 0. \quad (24)$$

Максимальная же высота эллипсоида над геоидом (ареоидом) находится в плоскости меридиана с долготой $\alpha_0 = 90^\circ$, т. е.

$$(B - C) \sin 2\alpha_0 - 2D \cos 2\alpha_0 = 0. \quad (25)$$

Подставив вместо B , C , D их выражения, получим

$$a_0 \alpha_0 - a (\cos 2\alpha_0 \sin 2\alpha \operatorname{ctg} 2\alpha_0) = 0. \quad (26)$$

Заменив в выражении (26) величины на их числовые значения, получим значение α_0 .

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСФОРМАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ФИГУРЫ ЗЕМЛИ НА ОСНОВЕ РАСТРОВЫХ КАРТ ПАЛЕОРЕКОНСТРУКЦИЙ РАЗМЕЩЕНИЯ МАТЕРИКОВ И ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В соответствии с современными представлениями геологическая среда является блоковой [2, 8, 12, 13]. Блоки и плиты поворачиваются. Вывод о вращательном движении блоков земной коры подтверждается многочисленными геофизическими и геологическими исследованиями [2, 3, 12, 14, 21, 24]. Механизм движения плит, как и источник

сил, влияющих на их перемещение, остается до конца не изученным. Вероятнее всего допустить, что их вращение происходит под действием собственных моментов количества движения на вращающейся Земле в силу воздействия ротационно-гравитационной динамики (вихревой планетарной геодинамики).

Характер перемещений материков в процессе эволюции Земли как планеты изучался многими исследователями [1, 4, 7, 11, 21]. Для моделирования трансформации фигуры Земли и оценки влияния ее переориентации на напряженно-деформированное состояние литосферы в далекие геологические эпохи использованы растровые карты палеореконструкций размещения материков и водной поверхности, которые были созданы Р. Блэки [21].

Для современной геологической эпохи растровое изображение цифровой модели поверхности ЕТОРО 1 приведено в работе [20]. Для других геологических эпох, кроме карт палеореконструкций размещения материков и водной поверхности, у нас нет даже приближенных данных о высотах физической поверхности Земли. Поскольку все растровые изображения созданы последовательно в определенных цветах, то с некоторыми предположениями, найдя связь между изображением высот модели ЕТОРО 1 и растровыми картами палеореконструкций, можно перейти к цифровой модели поверхности (ЦМП) для геологических эпох, которые привязаны к соответствующим картам с изображением материков и водной поверхности.

Если каждый пиксель этого изображения разложить на три цветных RGB-составляющих (красный, зеленый и синий) с определенным уровнем яркости, то на основе аппроксимации заданной функции, которая описывается тремя переменными, можно получить значения коэффициентов модели. Итак, например, если размеры изображения составляют 750 1500 пкл, то ЦМП будет соответствовать аналогичным размерам. Для каждого пикселя получаем соответствующее значение высоты и три цветных составляющих характеристики яркости, которые удобно представлять в виде полиномиального уравнения:

$$F(h) = \sum_{m=0}^n a_m R^i G^j B^k, \quad (27)$$

$i \quad j \quad k \quad m,$

где h — высота соответствующего пикселя, R, G, B — три цветовых составляющих этого пикселя, a_m — неизвестные коэффициенты.

Для описанного случая лучше всего подходит полином третьего порядка. Тогда первое уравнение системы (27) запишем так:

$$F(h) = a_1 + a_2 R + a_3 G + a_4 B + a_5 RG + \dots + a_{19} GB^3. \quad (28)$$

Значения неизвестных коэффициентов можно вычислить, используя способ наименьших квадратов. С правой части уравнения (28) формируется матрица коэффициентов при неизвестных, а левая — выступает в роли вектора свободных членов. В качестве весовой матрицы примем единичную диагональную матрицу. По результатам моде-

лирования было установлено, что для этой аппроксимации пиксельных цветов лучше использовать только первые 19 коэффициентов уравнения (28), т. е. степенной полином третьего порядка.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Рассмотрим вначале результаты аппроксимации двuosным эллипсоидом высот поверхности литосферы с использованием данных компьютерного моделирования расположения материков и водной поверхности на растровых картах палеореконокструкций в соответствии с геологической шкалой, начиная от современной эпохи и заканчивая 600 млн лет тому назад. Вполне очевидно, что конфигурация материков в какой-то мере должна повлиять на деформацию эллипсоида, аппроксимирующего литосферу Земли.

В табл. 3 приведены семь параметров эллипсоида, которые обобщенно характеризуют фигуру поверхности литосферы Земли для разных периодов геологического времени. Безусловно, значения параметров фигуры поверхности литосферы Земли необходимо воспринимать как некоторый ориентир возможных трансформаций земного шара. Однако весьма показательной является траектория движения се-

Таблица 3. Параметры двuosного эллипсоида, определенные по цифровой модели рельефа (ЦМР) палеореконокструкций расположения материков и водной поверхности

Эпоха, млн лет	dx , м	dy , м	dz , м	a , м	b , м	$1/f$, град	, град	
Современная	0	-742	-492	1422	6375117	6355640	327.3	133.8	2.6
Миоцен	20	-805	-513	1386	6375392	6355104	314.2	137.0	1.7
Олигоцен	35	-891	-469	1375	6375221	6355172	317.9	132.4	1.6
Эоцен	50	-1008	-554	1642	6375076	6355004	317.6	123.6	1.7
Третичный	65	-1200	-708	1441	6375311	6354762	310.2	125.3	1.6
Поздний мел	90	-1529	-989	871	6375180	6355007	316.0	123.5	0.9
Средний мел	105	-1463	-1013	844	6375102	6354953	316.4	222.2	0.7
Ранний мел	120	-1477	-1166	803	6375248	6354959	314.2	202.7	0.8
Поздний Юра	150	-1657	-1039	978	6375269	6354698	309.9	243.3	0.9
Средний Юра	170	-1665	-1046	1051	6375408	6354670	307.4	244.5	1.1
Ранний Юра	200	-1860	-946	1095	6375449	6354619	306.0	92.3	-0.7
Поздний Триас	220	-2048	-1055	740	6375452	6354539	304.8	262.1	1.0
Средний Триас	250	-1898	-1269	856	6375319	6354392	304.6	241.3	1.1
Поздний Пермь	260	-1780	-1214	1313	6375377	6354604	306.9	254.9	0.8
Ранний Пермь	280	-1669	-1018	1392	6375210	6354565	308.8	233.9	0.7
Пенсильваний	300	-1235	-815	1535	6374821	6354713	317.0	165.8	0.4
Миссисипий	340	-945	-502	1879	6374985	6354267	307.7	202.0	-1.0
Средний Девон	370	-859	-827	1578	6375166	6353724	297.3	182.9	-1.2
Ранний Девон	400	-443	-354	1564	6374892	6353973	304.7	227.5	-0.8
Силур	430	-7	0	1101	6375192	6353449	293.2	112.7	2.1
Поздний Ордовик	450	120	-187	1133	6375224	6353476	293.1	113.5	2.1
Средний Ордовик	470	191	150	1499	6375166	6353599	295.6	139.5	2.1
Поздний Кембрий	500	411	519	1445	6375284	6353293	289.9	193.8	1.6
Ранний Кембрий	540	575	363	1803	6375042	6353795	300.0	188.1	1.8
Последний Докембрий	560	209	41	1512	6374603	6353841	307.0	182.4	0.8
Поздний Докембрий	600	375	-106	1907	6374428	6354639	322.1	205.2	-0.8

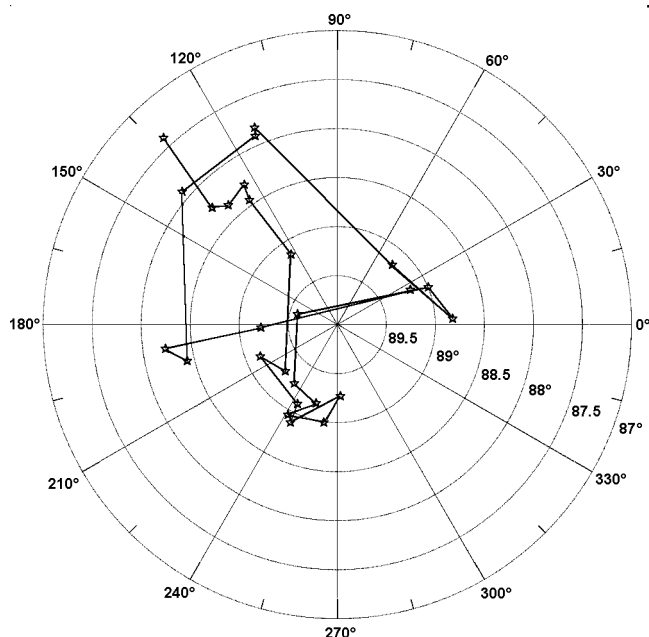


Рис. 6. Траектория движения северного полюса малой полуоси двухосного эллипсоида, аппроксимирующего поверхность литосферы Земли в разные периоды на протяжении 600 млн лет

верного полюса малой полуоси двухосного эллипсоида, аппроксимирующего поверхность литосферы Земли в разные геологические эпохи, которая показана на рис. 6. Максимальное отклонение полюса малой полуоси от оси вращения Земли среди всех полученных эллипсоидов не превышает 2.6° . Приведённое значение характеризует отклонение полюса малой полуоси от оси вращения Земли в современную эпоху и, возможно, приближенно соотносится с критическим значением. Это подтверждает высказанное ранее утверждение о перемещении литосферных плит в соответствии с геодинамическим процессом, направленным на восстановление осевой симметрии и сохранение момента количества вращения.

Проанализируем теперь, каким образом отклонения малой полуоси фигуры физической поверхности планеты от оси вращения могут влиять на напряженно-деформированное состояние литосферы и соответственно активизировать тектонические процессы на Земле и Марсе.

На рис. 7, а показана карта с нанесенными изолиниями высот, которые определяют расстояния между поверхностями эллипсоидов, обобщенно представляющие литосферу Земли и геоид. На этой карте в виде широкой дугообразной полосы отображен названный нами «тектонический водораздел», характеризующий наибольшее поднятие эллипсоида, аппроксимирующего поверхность литосферы, относительно поверхности общеземного эллипсоида, отображающий геоид. Как оказалось, эта полоса «тектонического водораздела» почти в точности совпадает с границами тектонических плит (за исключением Южно-Американской и Тихоокеанской плит). Кроме того, если соединить на этом рисунке дугообразной полосой наибольшие понижения одного эллипсоида над другим, то можно заметить аналогичное

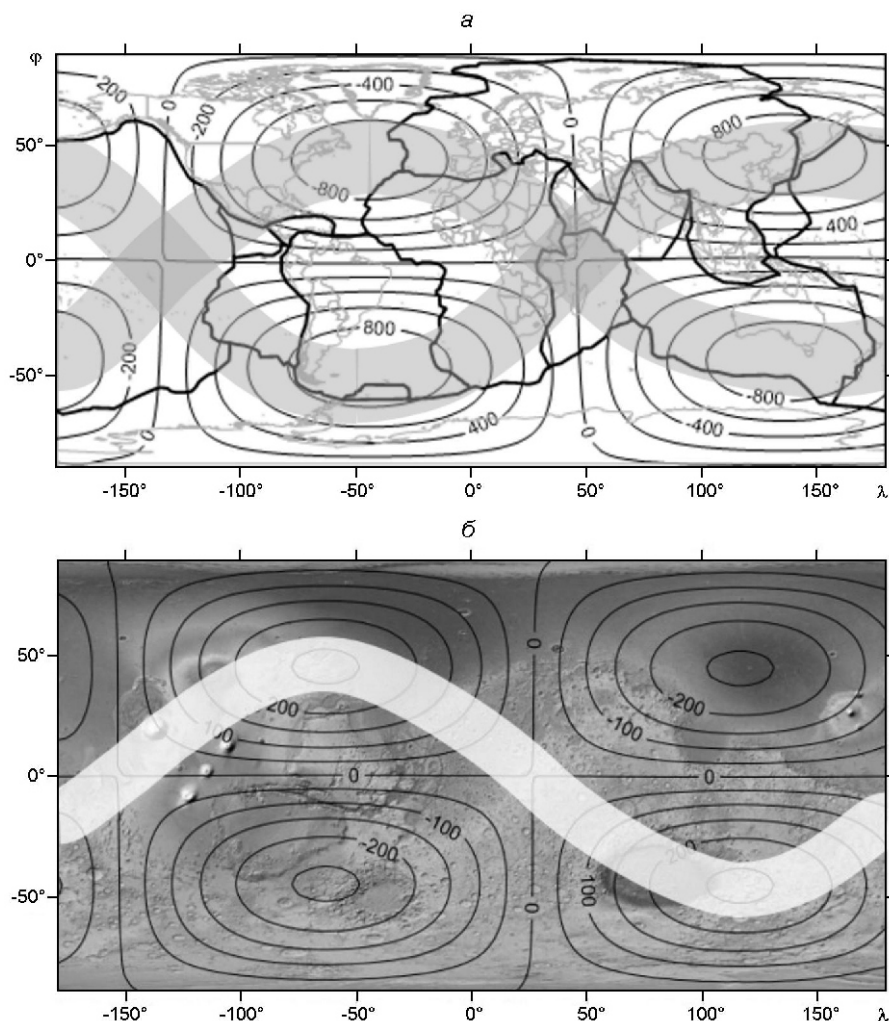


Рис. 7. Карты расстояний между эллипсоидами, аппроксимирующими поверхность литосферы и геоид Земли (а) и соответственно литосферу и ареоид Марса (б). Высоты, представленные в метрах. Кривая полоса соответствует «тектоническому водоразделу»

совпадение с другими границами тектонических плит. Таким образом, эти две полосы, которые выделяют своеобразный структурный планетарный «водораздел» и «талвег» на земном шаре, охватывают практически все границы основных литосферных плит. Этот факт наводит на мысль об определяющей роли взаимного расположения двух эллипсоидов, аппроксимирующих литосферу Земли и геоид, и ротационно-гравитационных сил в структурообразовательных процессах формирования границ литосферных плит. Максимальное поднятие или опускание эллипсоида, аппроксимирующего поверхность литосферы относительно общеземного эллипсоида, представляющего геоид, достигает ± 960 м.

Для Марса эта характеристика в отклонении эллипсоидов значительно меньшая и составляет ± 250 м (рис 7, б). «Тектонический водо-

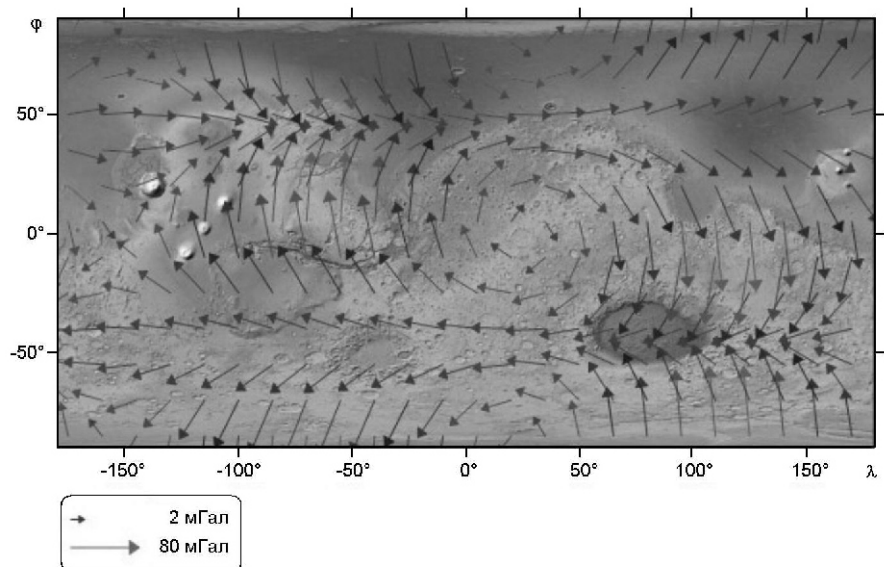


Рис. 8. Карта тангенциальных сил на фоне поверхности Марса. Стрелками показаны тангенциальные силы в миллигалах

раздел» расчленяет два полушария и явно указывает на тектоническую марсианскую дихотомию. Кроме того, интересной особенностью этого «водораздела» является то, что он охватывает крупнейший вулкан Olympus Mons и рядом расположенную цепь вулканов Arsia, Pavonis и Ascraeus, а на противоположной стороне равнину Hellas, которая характеризуется отрицательными высотами рельефа. Эти две особенности тектонического строения Марса могли бы быть динамически связанными в геологическом времени. Если предположить, что равнинная впадина Hellas образовалась в результате падения крупного астероида, то на противоположной стороне мог запуститься механизм образования мантийного плюма вследствие смещения жидкого ядра в этом направлении, в результате чего и возникли перечисленные вулканы и горная возвышенность Tharsis.

Отметим также, что литосфера Марса не разделена на плиты, как на Земле, но единственная сферическая плита, которая там есть, тоже, возможно, смещалась. Ее мог сместить поток горячего вещества, который поднялся от ядра, и оставил снаружи след в виде цепи потухших вулканов в районе Tharsis. Возраст древнейших структурных элементов Tharsis геологи оценивают в 3.7...4 млрд лет. Все застывшие (а может, просто неактивные) вулканы поднятия Tharsis размещены примерно вдоль одной линии. Такие цепочки встречаются и на Земле — например, вулканы Гавайских или Маршалловых островов, и считается, что они образуются на литосферных плитах, под которыми находится мантийный поток (плюм) горячего вещества, который перемещается от ядра планеты. Положение плюмов (струй) в мантии достаточно устойчивое, а плиты скользят над ними. Вулканическая активность, подпитываемая такими плюмовыми потоками, со временем

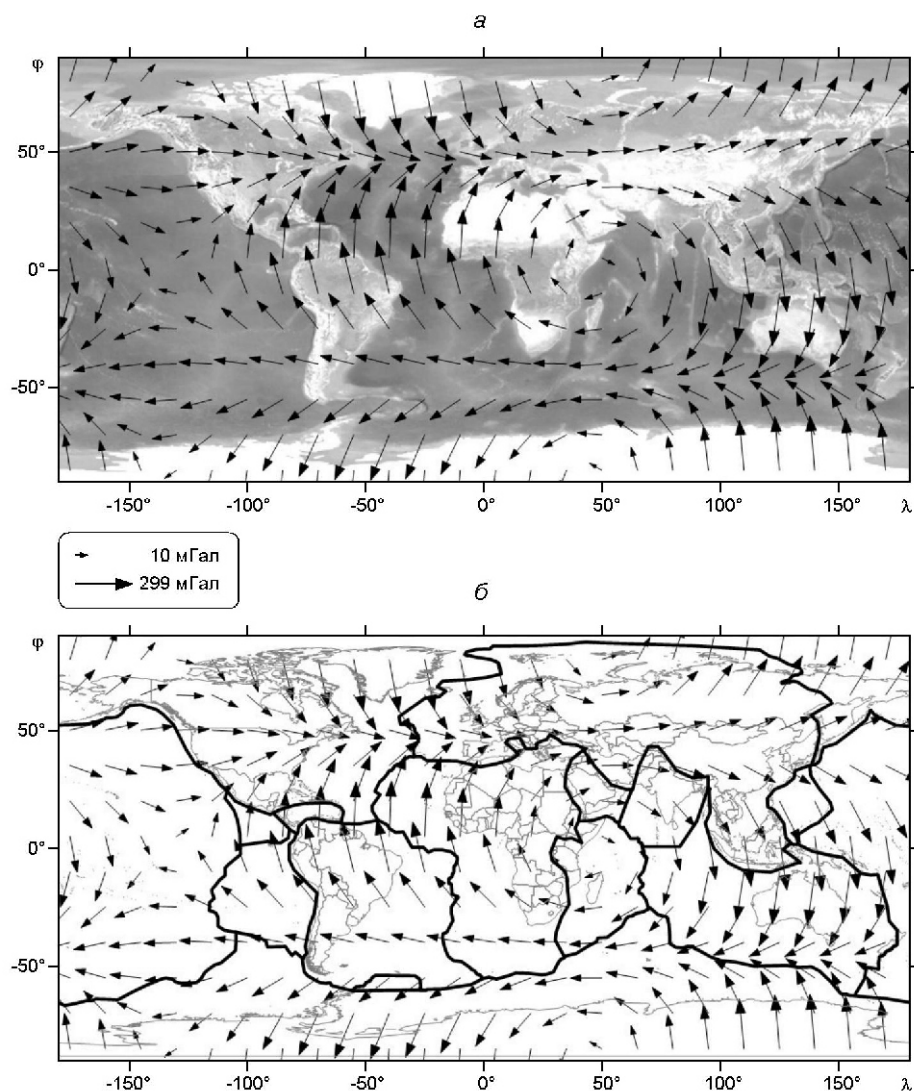


Рис. 9. Карты тангенциальных сил на фоне материков и океанов (а), и тектонических плит (б). Стрелками показаны тангенциальные силы в миллигалах

сдвигается к краю плиты, которая перемещается, изменяя при этом ротационный режим планеты. Характер перемещения литосферы Марса в прошедший геологический период, по-видимому, сохранился доныне. На рис. 8 отчетливо в виде стрелок векторов тангенциальных составляющих сил m и n прослеживается направление перемещения масс литосферы в провинции Tharsis, где возникла цепочка вулканов, и закрытие крупнейшей впадины Hellas. Таким образом, на рис. 8 в планетарном масштабе отображена система вихревых ротационно-гравитационных сил, влияющая на литосферные массы, под действием которых происходили структурообразовательные процессы на Марсе.

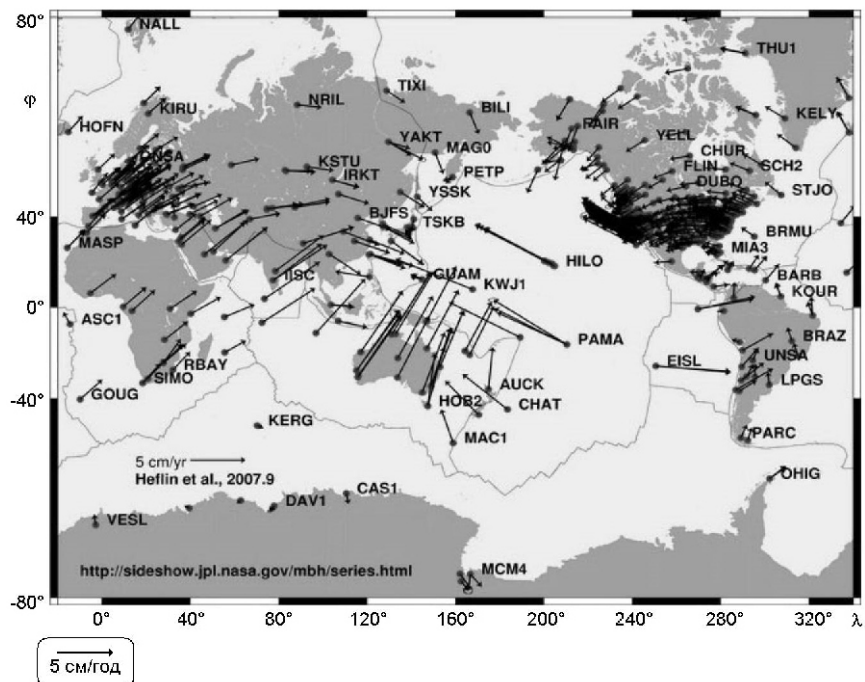


Рис. 10. Картографическое изображение векторов горизонтальных смещений permanentных станций GNSS по данным [https://i.ytimg.com/vi/KxJXiV4oTx0/maxresdefault.jpg]

Отметим также, что направления и распределения векторов тангенциальных сил на Земле (рис. 9) хорошо согласуются с перемещением материков и тектонических плит, т. е. стрелки векторов тангенциальных составляющих сил m и n явственно указывают на направление движения тектонических плит и материков. Немаловажно здесь указать на то, что представленная нами планетарная картина распределения векторов тангенциальных сил очень хорошо согласуется с направлением векторов горизонтальных смещений permanentных станций по GNSS-измерениям, которые показаны на рис. 10, заимствованном из сайта [https://i.ytimg.com/vi/KxJXiV4oTx0/maxresdefault.jpg]. Исключение составляют два материка: Северная Америка и Австралия, для которых векторы смещений permanentных станций по GNSS-измерениям имеют противоположное направление.

Не вдаваясь в причины отмеченных закономерностей, отметим еще одну важную, на наш взгляд, особенность, которая отчетливо проявляется в вихревом распределении векторов тангенциальных сил в планетарном масштабе. Если проследить всю цепочку пространственно-временных изменений в расположении материков и водной поверхности по растровым картам палеореконов и сопоставить их с полученными нами распределениями векторов тангенциальных сил (на рис. 11 показаны распределения векторов только для некоторых

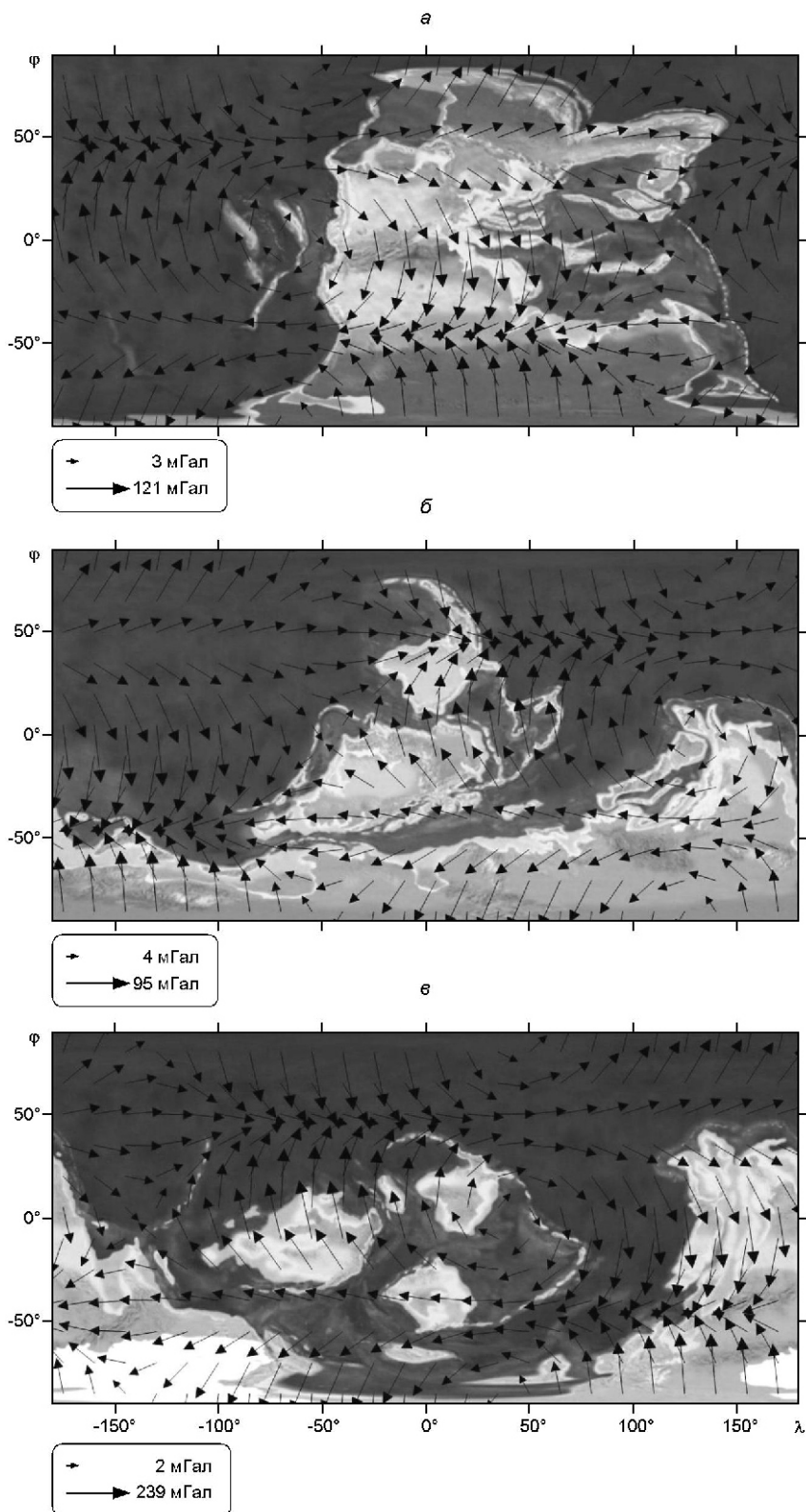


Рис. 11. Карты тангенциальных сил на фоне палеореконовструкций размещения материков и океанов: а — средний триас, 250 млн лет назад; б — ранний девон, 400 млн лет назад; в — поздний ордовик, 450 млн лет назад. Стрелками показаны тангенциальные силы в миллигалах

геологических эпох), то можно заметить, что вихревая (вращательная) направленность векторов является доминирующей в перемещении литосферы Земли (такая закономерность прослеживается и для Марса). Объясняет такое распределение тангенциальных сил взаимное расположение двух эллипсоидов и ориентация малой оси эллипсоида, аппроксимирующего литосферу, относительно оси вращения.

Так, на рис. 7, а можно обнаружить строгую закономерность в размещении двух возвышенностей и понижений одного эллипсоида над другим. В соответствии с таким размещением эллипсоидов формируется распределение направлений векторов тангенциальных сил, под действием которых происходит перетекание литосферных масс с возвышенностей в направлении понижения. Эпицентр вихревого закручивания тангенциальных сил совпадает с точкой на экваторе, где практически соприкасаются нулевые изолинии, разграничивающие возвышения и понижения в распределении высот (расстояний) между поверхностями двух эллипсоидов. Поблизости северного и южного полюсов формируются компенсаторные вихри, что напоминает подобие механической системы из трех шестеренок.

Таким образом, вследствие изменения ориентации эллипсоида, описывающего литосферу, происходит формирование обновленного поля потенциальных горизонтальных сил, которые в соответствии с сохранением момента количества движения перемещают литосферные массы и генерируют напряжения и деформации в литосферной оболочке.

Сформированные нами представления могут дать общее понимание природы относительных перемещений масс — их горизонтальное перемещение происходит вследствие вращения Земли, стремления малой оси эллипсоида, аппроксимирующего литосферу, приблизиться к оси вращения и соответствующих вертикальных (радиальных) смещений вещества, обусловленных эндогенным источником энергии. По мере поднятия некоторого объема вещества в процессе регионального расширения значительной территории происходит изменение ориентации фигуры литосферы Земли, что приводит к генерации горизонтальных сил, направленных на уравнивание симметрии относительно оси вращения. И эти силы, приложенные ко всему объему вещества, неизбежно создают соответствующие деформации.

Таким образом, с вращением Земли и динамикой переориентации внешней поверхности литосферы, очевидно, связаны характерные тектонические структуры планетарного масштаба — границы плит, трансформные разломы, протяжённые линеаменты.

ВЫВОДЫ

Выполненные исследования компьютерного моделирования переориентации фигуры литосферы Земли и Марса позволили выявить определенные закономерности, которые отображают новые возможности в

интерпретации структурообразовательных процессов как следствие динамического перераспределения масс.

Результаты исследования по материалам палеореконструкций положения малой полуоси эллипсоида, аппроксимирующего поверхность литосферы в разные геологические эпохи, показали, что максимальное отклонение полюса малой полуоси от оси вращения Земли не превышает 3° . Это может указывать на критическую величину отклонения географического полюса от оси вращения Земли для любой конфигурации размещения материков и водной поверхности.

Рассмотренные поля векторов тангенциальных сил показывают хорошую согласованность с направлением пространственно-временного перемещения материков и тектонических плит на Земле. Эти результаты подтверждаются измеренными векторами горизонтальных смещений перманентных станций GNSS. Для Марса поля векторов тангенциальных сил создали условия для перемещения масс литосферы в провинции Tharsis и в регионе крупнейшей впадины Hellas, которые сформировали структурообразовательные процессы в прошедший геологический период. Показанный нами на картографическом изображении Марса «тектонический водораздел» явно указывает на тектоническую марсианскую дихотомию.

Феноменальная картина размещения на поверхности Земли планетарного «тектонического водораздела» и «тальвега», которые почти полностью совпадают с положением границ тектонических плит, указывает на то, что это далеко не случайность. Напрашивается вывод о наличии геометрически обобщенного размещения двух возвышенностей и понижений одного эллипсоида над другим, которые аппроксимируют поверхность литосферы и геоида. Вследствие такого расположения эллипсоидов на поверхности Земли образуются по дуге большого круга две зоны напряжений (полосы), наклоненные по диагональным направлениям к оси вращения планеты, где формируются трещины в планетарном масштабе (скалывание оболочки коры). Безусловно, можно подобрать другую систему сил, которые, возможно, объясняли бы такую закономерность для отдельных тектонических плит или размещения материков в данном месте. Однако трудно было бы даже представить, что есть достаточно простая система горизонтальных сил, которая так согласованно описывает конфигурацию материков в динамике их геологического развития. Это достаточно убедительно свидетельствует о том, что литосферные массы при длительном воздействии вихревых ротационно-гравитационных сил приобретают свойства ползучести, а верхняя, более упругая оболочка коры, сохраняет следы разломов и планетарных трещин. Все это приводит к тому, что взаимодействующие между собой блоки и плиты в рамках вихревой ротационно-гравитационной модели могут быть взаимосвязанными упругими полями, которые создают единое планетарное геодинамическое поле, формирующее эволюционное состояние геосферы.

Таким образом, на примере компьютерного моделирования эволюции фигуры Земли прослеживается взаимосвязь динамических процессов, которые связаны с вертикальными и горизонтальными перемещениями масс и направлены на геоизостатическое уравновешивание литосферной оболочки под действием сил вращения и перемещения полюса. Последние создают планетарные поля геолого-геофизических вихревых структур, формирующие лик Земли в процессе ее эволюции. Все это может служить основой для построения новой геологической парадигмы — вихревой геодинамики.

1. Вегенер А. Возникновение материков и океанов / Пер. с нем. П. Г. Каминского под ред. П. Н. Кропоткина. Л.: Наука, 1984. 285 с.
2. Викулин А. В. Новый тип упругих ротационных волн в геосреде и вихревая геодинамика. *Geodynamics and Tectonophysics*. 2010. 1. № 2. Р. 119—141.
3. Геологическая история территории СССР и тектоника плит. М.: Наука, 1989. 206 с.
4. Долицкий А. В. Образование и перестройка тектонических структур. М.: Недра, 1985. 219 с.
5. Жарков В. Н. Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука, 1978. 192 с.
6. Карпенко И. В. Синергетическая тектоника. 1. Физическая природа глобальных цикличностей. *Геофиз. журн.* 2012. 34. № 5. С. 60—71.
7. Кэри У. В поисках закономерностей развития Земли и Вселенной. М.: Мир, 1991. 448 с.
8. Маслов Л. А. Геодинамика литосферы Тихоокеанского подвижного пояса. Хабаровск — Владивосток: Дальнаука, 1986. 200 с.
9. Менард Г. У. Геология дна Тихого океана. М.: Мир, 1966. 275 с.
10. Мещеряков Г. А., Церклеви́ч А. Л. Гравитационное поле, фигура и внутреннее строение Марса. Киев: Наук. думка, 1987. 240 с.
11. Новая глобальная тектоника. М.: Мир, 1974. 471 с.
12. Пейве А. В. Тектоника и магматизм. Изв. АН СССР. Сер. геологическая. 1961. № 3. С. 36—54.
13. Ротационные процессы в геологии и физике / Ред. Е. Е. Милановский. М.: Дом-Книга, 2007. 528 с.
14. Слензак О. И. Вихревые системы литосферы и структуры докембрия. Киев: Наук. думка, 1972. 182 с.
15. Тяпкин К. Ф., Довбнич М. М. Новая ротационная гипотеза структурообразования и ее геолого-математическое обоснование. Донецк: Ноулидж, 2009. 342 с.
16. Хаин В. Е. Об основных принципах построения подлинно глобальной модели динамики Земли. *Геология и геофизика*. 2010. 51. № 6. С. 753—760.
17. Церклеви́ч А. Л. Кореляційний аналіз гравітаційного поля і топографії планет земної групи. *Геодинаміка*. 2013. № 1 (14). С. 11—20.
18. Церклеви́ч А. Л., Заяць О. С. Геодинамічна еволюція фігури Землі та Марса. *Геодинаміка*. 2012. № 2 (13). С. 38—42.
19. Церклеви́ч А., Заяць О., Шило Є. Апроксимація висот фізичної поверхні Землі двовісним і тривісним еліпсоїдами. *Геодинаміка*. 2016. № 1 (20). С. 40—49.
20. Церклеви́ч А., Заяць О., Шило Є. Динаміка трансформації фігури Землі. *Кінематика і фізика небес. тел.* 2017. 33. № 3. С. 54—69.
21. Blakey R. *Global Paleogeography*. URI: <https://www2.nau.edu/rcb7/globaltext2.html>

22. Geist E. L., Childs J. R., Scholl D. W. The origin of basins of the Aleutian ridge: implications for block rotation of an arc massif. *Tectonics*. 1988. 7. N 2. P. 327—341.
23. Maloof A. C., Halverson G. P., Kirschvink J. L., et al. Combined paleomagnetic, isotopic, and stratigraphic evidence for true polar wander from the Neoproterozoic Akademikerbreen Group, Svalbard, Norway. *Geol. Soc. Amer. Bull.* 2006. 118. N 9/10. P. 1099—1124.
24. Nur A., Ron H., Scotti O. Fault mechanics and the kinematics of block rotation. *Geology*. 1986. 14. P. 746—749.

Статья поступила в редакцию 07.06.2017

A. Л. Церклевич, О. С. Заяць, Є. О. Шило, О. М. Шило
Національний університет «Львівська політехніка»

ГЕНЕРАЦІЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ЛИТОСФЕРИ ЗЕМЛІ ТА МАРСА, ОБУМОВЛЕНА ПЕРЕОРІЄНТАЦІЄЮ ЇХНІХ ФІГУР

Виконано комп'ютерне моделювання переорієнтації фігури літосфери Землі та Марса. Показано, що фігура поверхні літосфери має іншу орієнтацію, ніж фігура геоїда (ареоїда), і у процесі еволюційного саморозвитку планети в результаті дії ендегенних і гравітаційно-ротаційних сил відбувається перерозподіл мас, що призводить до напруженого стану літосфери. Вирішення цієї задачі розглядається на прикладі апроксимації висот поверхні літосфери двовісним еліпсоїдом із сімома параметрами. Ввівши поняття «еволюційного відхилення виска» і припустивши, що тангенціальні сили пропорційні куту між напрямком лінії виска у минулу геологічну епоху і нинішнім напрямком в заданій точці, розраховані діючі горизонтальні сили у верхній оболонці планети. Обчислені поля векторів тангенціальних сил показують хороший збіг з напрямком просторово-часового переміщення материків і тектонічних плит на Землі і узгоджуються з результатами вимірювань горизонтальних складових векторів руху станцій GNSS. Це досить переконливо свідчить про те, що літосферні маси при тривалому впливі вихрових ротаційно-гравітаційних сил набувають властивостей повзучості. Внаслідок цього взаємодія блоків і плит в рамках вихрової ротаційно-гравітаційної моделі може бути пов'язана з пружними полями, які створюють єдине планетарне геодинамічне поле, що формує еволюційний стан геосередовища.

Ключові слова: фігура поверхні літосфери, геоїд, ареоїд, гравітаційно-ротаційні сили, еволюційне відхилення прямовисних ліній, тангенціальні масові сили.

A. Tserklevych, O. Zayats, Ye. Shylo, O. Shylo
National University «Lviv Politekhnik», Lviv, Ukraine

GENERATION OF THE STRESSED STATE OF THE LITHOSPHERE OF THE EARTH AND MARS CAUSED BY THE REORIENTATION OF THEIR FIGURES

The computer simulation of the reorientation of the Earth and Mars lithosphere figure has been performed, which due to the dynamic redistribution of masses, allowed to reveal certain regularities of the structure-forming processes. It has been shown that the shape of the lithosphere surface has a different orientation relatively to the geoids (aroids) figure. This causes redistribution of masses leading to a strained state of the lithosphere as a result of endogenous and gravitational-rotational forces action in the evolutionary processes of planet's self-development. The solution of this problem is considered on the example of lithosphere surface heights approximation by a biaxial ellipsoid with seven parameters.

The acting horizontal forces in the upper shell of the planet has been calculated, introducing the concept of «evolutionary deviation of the plumb» and assuming that the tangential forces are proportional to the angle between the direction of the plumb line in the past geological epoch and the plumb line direction at a given point. The calculated fields of tangential force vectors show good consistency with the direction of space-time displacement of Earth's continents and tectonic plates and consistent with the results of the horizontal movements of GNSS stations. This is quite convincing evidence that under the long-term action of vortex rotational-gravitational forces, the lithospheres masses acquire the properties of creep. All this leads to the fact that interacting blocks and plates within the vortex rotational-gravitational model can be interconnected to elastic fields that creates a single planetary geodynamic field that forms the evolutionary state of the geo-environment.

Keywords: shape of lithosphere surface, geoid, areoid, gravitational-rotational forces, evolutionary plumb line deflection, tangential mass forces.