

---

doi: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.01.067>

УДК 528.2+551

**А.Л. Церклевич, Е.А. Шило**

Национальный университет “Львовская политехника”

E-mail: anatoltser@gmail.com

## **Фигура литосферы Земли и геотектоника**

*Представлено академиком НАН Украины В.И. Старостенко*

*По результатам исследования компьютерного моделирования переориентации фигуры литосферы Земли выявлены определенные закономерности, которые отображают структурообразовательные процессы. Показано, что фигура поверхности литосферы имеет иную ориентацию относительно фигуры геоида. На основе понятия “эволюционного отклонения отвеса” и предположения, что тангенциальные силы пропорциональны углу, который определяется как угол между направлением линий 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 хорошую согласованность с направлением пространственно-временного перемещения материков и тектонических плит и почти полное совпадение с горизонтальными составляющими векторов смещений станций GNSS. Это убедительно свидетельствует о том, что литосферные массы под действием вихревых ротационно-гравитационных сил при их длительном воздействии могут приобретать свойства ползучести.*

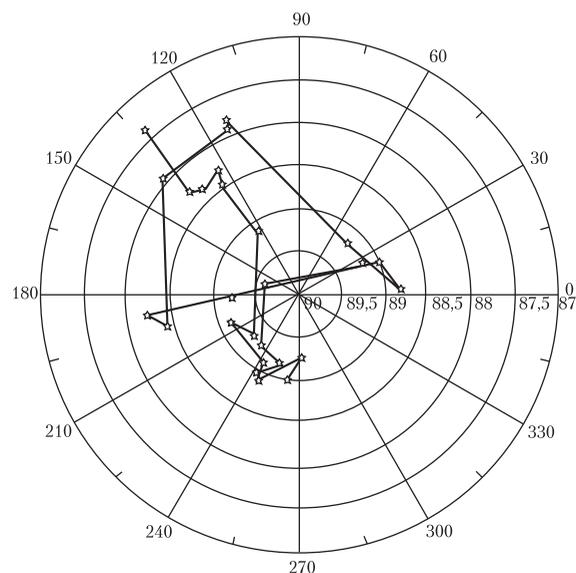
**Ключевые слова:** *фигура литосферы, эволюционное отклонение отвеса, вихревая геодинамика.*

Геодинамическую эволюцию Земли можно рассматривать как следствие процесса перераспределения ее массы в силовом поле, которое динамически меняется, а внешним проявлением этого процесса является фигура поверхности литосферы, которая должна приобретать форму с минимальной потенциальной энергией [1]. В то же время, очевидно, нельзя исключать действие переменных сил, которые определяют ход внутриземных процессов и направлены против действия гравитационных сил. Таким образом, действие этих противоположных сил формирует общее геодеформационное поле из-за деформации топологии поверхности планеты и соответствующей динамической реакции, которая сопровождается перераспределением масс.

Для исследования динамики изменения фигуры Земли, а также оценки влияния, изменённых параметров фигуры на распределение тангенциальных сил, действующих на напряженное состояние литосферы, нами использована идея аппроксимации высот физической поверхности планеты двухосным эллипсоидом с семью параметрами. Алгоритм решения этой задачи был рассмотрен в статьях [2, 3].

© А.Л. Церклевич, Е.А. Шило, 2018

ISSN 1025-6415. Допов. Нац. акад. наук Укр. 2018. № 1



**Рис. 1.** Траектория расположения северного полюса малой полуоси двухосного эллипсоида, аппроксимирующего поверхность литосферы Земли в разные периоды на протяжении 600 млн лет

Вычисления семи параметров эллипсоида выполнялись на основе данных цифровой модели поверхности Земли ETOPO1 [4]. Для указанной модели высоты были предварительно усреднены в пределах трапеций  $5^\circ \times 5^\circ$ . В результате получено 2592 значений высоты поверхности литосферы  $h$ . Для моделирования трансформации фигуры Земли и оценки влияния ее переориентации на напряженно-деформированное состояние литосферы в

прошедшие геологические эпохи использованы растровые карты палеореконструкций размещения материков и водной поверхности, которые были предложены Р. Блэки [5]. Поскольку все растровые изображения созданы последовательно в определенных цветах, то с некоторыми предположениями, установив связь между изображением высот модели ETOPO1 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.

Расчитанные значения параметров двухосного эллипсоида для Земли в современную эпоху следующие:

$$\begin{array}{llll} x_0, \text{ м} & -741,89; & y_0, \text{ м} & -491,57; & z_0, \text{ м} & 1421,79; \\ a_{xy}, \text{ м} & 6375117,01; & a_z, \text{ м} & 6355640,09; & 1/\alpha & 327,31650; \\ \kappa & 133,774^\circ; & \zeta & 2,612^\circ. \end{array}$$

Весьма показательной является траектория положения северного полюса малой полуоси двухосного эллипсоида, аппроксимирующего поверхность литосферы Земли в разные геологические эпохи, которая показана на рис. 1. Максимальное отклонение полюса малой полуоси от оси вращения Земли для 26 эллипсоидов, параметры которых вычислены на основании данных ЦМП для геологических эпох, не превышает  $2,6^\circ$ .

Таким образом, по результатам исследований оказалось, что фигура поверхности литосферы Земли 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 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 Земля была ближе к гидростатическому состоянию, чем сейчас. Исходя из этого допущения, введем понятие «эволюционное отклонение отвеса» и предположим, что тангенциальные

силы пропорциональны углу  $\gamma$ , который определяется как угол между направлением линий отвеса в прошедшую геологическую эпоху и нынешним направлением в заданной точке. При определении угла  $\gamma$  не станем учитывать несовпадение центров эллипсоидов  $E'_G$  — аппроксимирующий геоид и  $E'_L$  — аппроксимирующий поверхность литосферы, так как оно существенно не повлияет на результат.

Расстояние между эллипсоидами  $E'_G$  и  $E'_L$  определим, используя формулу:

$$S = A + B \sin^2 \varphi_0 + C \cos^2 \varphi_0 \sin^2 \lambda_0 + D \sin 2\varphi_0 \sin \lambda_0, \quad (1)$$

где

$$A = a - a_0; B = a_0 \alpha_0 - a \alpha \cos^2 \zeta; C = -a \alpha \sin^2 \zeta; D = \frac{1}{2} a \alpha \sin 2\zeta,$$

где  $\varphi_0$  — широта,  $a_0$  — большая полуось,  $\alpha_0$  — сжатие для эллипсоида  $E'_G$ ; соответственно,  $\varphi$  — широта,  $a$  — большая полуось,  $\alpha$  — сжатие для эллипсоида  $E'_L$ ;  $\zeta$  — сферическое расстояние между полюсами осей двух эллипсоидов.

Составляющие «эволюционного отклонения отвеса» в плоскости меридиана и в плоскости первого вертикала можно определить из соотношений:

$$\xi = \frac{1}{R} \frac{\partial S}{\partial \varphi_0}, \quad \eta = \frac{1}{R \cos \varphi_0} \frac{\partial S}{\partial \lambda_0}, \quad (2)$$

где  $R$  — средний радиус планеты.

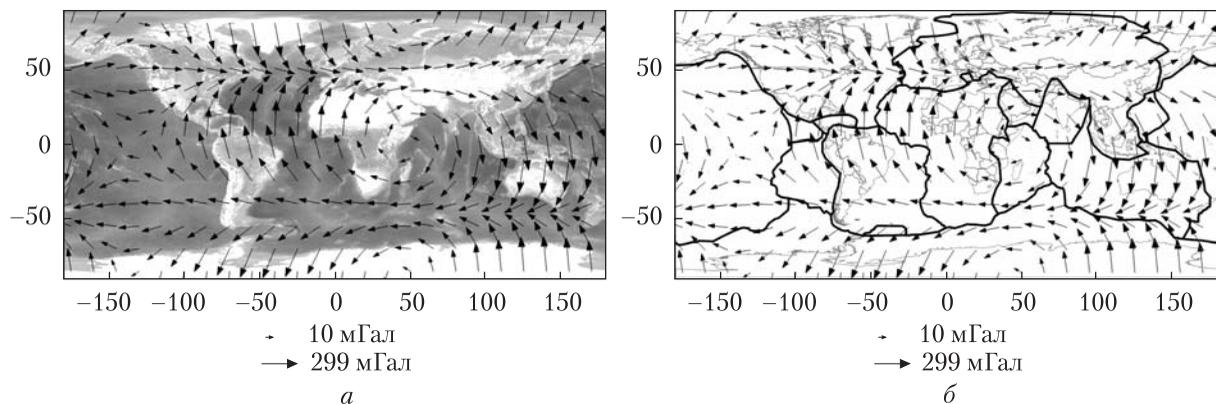
От составляющих «эволюционного отклонения отвеса» перейдем к тангенциальным составляющим сил, действующих на единицу массы в верхнем слое планеты:

$$F_\varphi = \frac{Bg}{R} \sin 2\varphi_0 - \frac{Cg}{R} \sin 2\varphi_0 \sin^2 \lambda_0 + \frac{2Dg}{R} \cos 2\varphi_0 \sin \lambda_0, \quad (3)$$

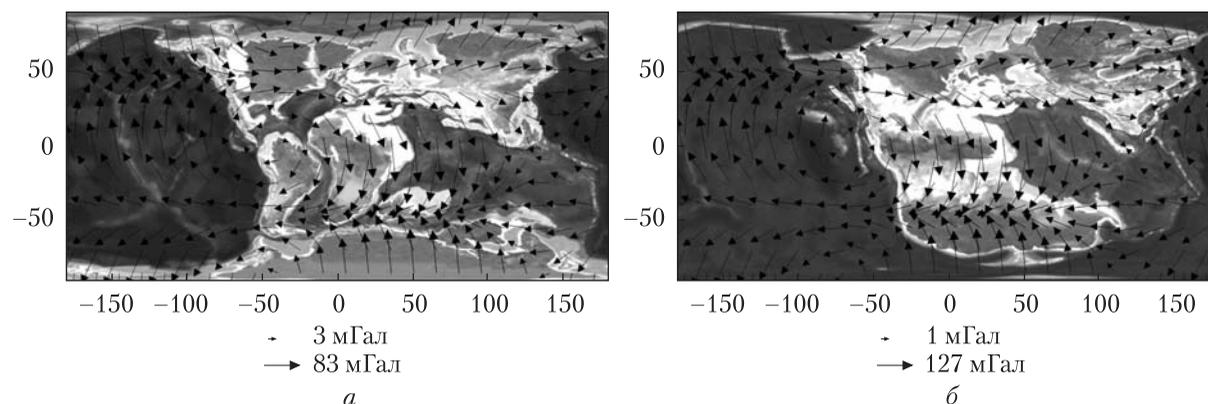
$$F_\lambda = \frac{Cg}{R} \cos^2 \varphi_0 \sin 2\lambda_0 + \frac{Dg}{R} \sin 2\varphi_0 \cos \lambda_0, \quad (4)$$

где  $g$  — ускорение силы тяжести.

Направление и распределение векторов тангенциальных сил  $F_S = \sqrt{F_\varphi^2 + F_\lambda^2}$  на Земле (рис. 2) хорошо согласуются с направлением перемещения материков и тектонических



**Рис. 2.** Карты тангенциальных сил в современную эпоху на фоне материков и океанов (а) и тектонических плит (б). Стрелками показаны тангенциальные силы в миллигалах



**Рис. 3.** Карты тангенциальных сил на фоне палеореконокструкций размещения материков и океанов: *а* — средний мел, 105 млн лет назад; *б* — средний юра, 170 млн лет назад. Стрелками показаны тангенциальные силы в миллигалах

плит. Немаловажно здесь указать на то, что представленная нами планетарная картина распределения векторов тангенциальных сил очень хорошо совпадает с направлением векторов горизонтальных смещений перманентных станций по GNSS измерениям, которые представлены на сайте Facts and Details [6]. Исключение составляют два материка: Северная Америка и Австралия, для которых векторы смещений перманентных станций по GNSS измерениям имеют противоположное направление.

Отметим, на наш взгляд, еще одну важную особенность, которая отчётливо 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 палеореконокструкций и сопоставить их с полученными нами распределением векторов тангенциальных сил (на рис. 3 показано распределение векторов тангенциальных сил только для некоторых геологических эпох), то можно заметить, что вихревая (вращательная) направленность векторов является доминирующей в перемещении литосферы Земли. Объясняет такое распределение тангенциальных сил взаимное расположение двух эллипсоидов и ориентация малой оси эллипсоида, аппроксимирующего литосферу, относительно оси вращения. 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. 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 как бы дают общее понимание природы относительных перемещений масс – их горизонтальное перемещение происходит вследствие вра-

щения Земли, а также 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. Это достаточно убедительно свидетельствует о том, что литосферные массы под действием вихревых ротационно-гравитационных сил при их длительном воздействии приобретают свойства ползучести. 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 геосреды.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Шен Э.Л. Гравитационная энергия и внутренняя структура планет: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук / Институт геофизики им С.И. Субботина АН УССР. Киев, 1980.
2. Церклевич А.Л., Заяць О.С., Шило Є.О. Апроксимація висот фізичної поверхні Землі двовісним і тривісним еліпсоїдами. *Геодинаміка*. 2016. № 1. С. 40–49.
3. Церклевич А.Л., Заяць О.С., Шило Є.О. Динаміка трансформації фігури Землі. *Кинематика и физика небесных тел*. 2017. **33**, № 3. С. 54–69.
4. National Centers for Environmental Information. ETOPO1 Global Relief Model. NOAA. URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>
5. Blakey R. Global Paleogeography. NAU. URL: <http://jan.ucc.nau.edu/rcb7/index.html>
6. Facts and Details. JH. URL: <https://i.ytimg.com/vi/KxjXiV4oTx0/maxresdefault.jpg>

Поступило в редакцию 18.07.2017

#### REFERENCES

1. Shen, E. L. (1980). The gravitational energy and internal structure of the planets. (Extended abstract of candidate thesis). S.I. Subbotin Institute of Geophysics of the AS of UkrSSR, Kiev (in Russian).
2. Tserklevych, A. L., Zaiats', O. S. & Shylo, Y. O. (2016). Approximation of the physical surface of the Earth by biaxial and triaxial ellipsoid. *Heodynamika*, No. 1, pp. 40-49 (in Ukrainian).
3. Tserklevych, A. L., Zaiats', O. S. & Shylo, Y. O. (2017). Dynamics of the Earth shape transformation. *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel*, 33, No. 3, pp. 54-69 (in Ukrainian).
4. National Centers for Environmental Information. ETOPO1 Global Relief Model. Retrieved from <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>
5. Blakey, R. Global Paleogeography. Retrieved from <http://www2.nau.edu/rcb7/globaltext2.html> (in USA).
6. Facts and Details. Retrieved from <http://i.ytimg.com/vi/KxjXiV4oTx0/maxresdefault.jpg>

Received 18.07.2017

А.Л. Церклевич, Є.О. Шило

Національний університет “Львівська політехніка”

E-mail: anatoltser@gmail.com

#### ФІГУРА ЛІТОСФЕРИ ЗЕМЛІ І ГЕОТЕКТОНІКА

За результатами дослідження комп'ютерного моделювання переорієнтації фігури літосфери Землі виявлено певні закономірності, які відображають структуротвірні процеси. Показано, що фігура поверхні літосфери має іншу орієнтацію щодо фігури геоїда. На основі поняття “еволюційного відхилення виска” і припущення, що тангенціальні сили пропорційні куту, який визначається як кут між напрямком лінії виска в минулу геологічну епоху і нинішнім напрямком в заданій точці, розраховані діючі горизонтальні сили у верхній оболонці планети. Обчислені поля векторів тангенціальних сил показують хорошу узгодженість з напрямком просторово-часового переміщення материків і тектонічних плит і майже повний збіг з горизонтальними складовими векторів руху станцій GNSS. Це переконливо свідчить про те, що літосферні маси під дією вихрових ротаційно-гравітаційних сил через їх тривалий вплив можуть набувати властивостей повзучості.

**Ключові слова:** *фігура літосфери, еволюційне відхилення виска, вихрова геодинаміка.*

A.L. Tserklevych, Y.A. Shylo

Lviv Polytechnic National University

E-mail: anatoltser@gmail.com

#### SHAPE OF EARTH'S LITHOSPHERE AND GEOTECTONICS

The studies of the computer simulation results of the Earth lithosphere figure reorientation allow revealing the certain regularities reflecting structure-forming processes. It has been shown that the shape of the lithosphere surface has a different orientation relative to the geoid figure. The acting horizontal forces in the upper shell of the planet are calculated, introducing the concept of “evolutionary deviation of a plumb” and assuming that the tangential forces are proportional to the angle, which is defined as 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 a good consistency with the directions of the space-time displacements of Earth's continents and tectonic plates and consistent with the results of the horizontal movements of GNSS stations. This is a quite convincing evidence that, under the long-term action of vortex rotational-gravitational forces, the lithospheric masses acquire the property of creep.

**Keywords:** *shape of the lithosphere, evolutionary deviation of a plumb, vortex geodynamics.*