

УДК 550.3

Б.В. ЛЕВИН, Е.В. САСОРОВА, А.В. ДОМАНСКИЙ

Свойства «критических широт», вариации вращения и сейсмичность Земли

Проведен краткий анализ причин возникновения «критических широт» на медленно вращающейся планете, получена фундаментальная связь величины сжатия планеты с ее угловой скоростью вращения и даны основные понятия о слабых пульсациях сфероида. Показана бимодальность распределения сейсмичности Земли, которая указывает на несомненную связь сейсмической активности планеты с эффектом «критических широт».

Ключевые слова: неравномерность вращения Земли, бимодальное широтное распределение землетрясений, вариации угловой скорости вращения, критические широты, кинетическая энергия вращения.

Features of “critical latitudes”, variations of rotation and seismicity of the Earth. B.W. LEVIN, E.V. SASOROVA, A.V. DOMANSKIY (Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk).

Short analysis of “critical latitudes” occurrence on slowly rotating planet was carried out. The basic connection of planet ellipticity with its angular rate of rotation was received, and the main concepts about spheroid weak pulsations were given. Bimodal distribution of the Earth seismicity which indicates clear connection of the planet seismic activity with the effect of “critical latitudes” was shown.

Key words: irregularity in rate of rotation of the Earth, bimodal latitudinal distribution of earthquakes, variations of angular speed of rotation, critical latitudes, kinetic energy of rotation.

В 2012 г. исполнилось 100 лет со дня опубликования в Париже трактата Алекса Веронне, в котором излагается точная теория вращения Земли [15]. Блестящие классические работы Маклорена, Клеро, Ньютона, Гюйгенса, посвященные выявлению основных характеристик вращающихся небесных тел, были проанализированы Пуанкаре [11], который тогда не мог отметить особенностей «критических широт». Эти широты, которые получили название критических в начале XX в., впервые отмечены французским математиком А. Веронне. Он же впервые привел вычисленное значение этих широт, равное $\pm 35^{\circ}15'52''$, и указал на существование в этих стационарных зонах перехода от сжатия к растяжению пород Земли.

Обсуждению вопросов планетарной геологии и особенностям «критических широт» была посвящена переписка между В.И. Вернадским и Б.Л. Личковым в середине XX в. [4]. Влияние средних широт на геолого-геофизические процессы в твердой Земле отмечалось многими геологами и геофизиками и выделено в монографии В.Е. Хаина и Н.В. Короновского [7]. Анализируя проблемы геофизики, О.Ю. Шмидт отметил, что вопрос, когда и почему стали происходить землетрясения, в конечном счете упирается в решение вопроса о происхождении Земли [8].

В настоящей работе приведен краткий анализ особенностей «критических широт» во вращающемся небесном теле, представлена связь величины сжатия тела с угловой

*ЛЕВИН Борис Вульфович – член-корреспондент РАН, директор (Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск), САСОРОВА Елена Васильевна – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник (Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва), ДОМАНСКИЙ Андрей Владимирович – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник (Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск). *E-mail: levinbw@mail.ru

Статья подготовлена по материалам доклада, прочитанного Б.В. Левиным на заседании Президиума ДВО РАН 25 октября 2012 г.

скоростью вращения, сформулированы понятия о слабых пульсациях геоида и продемонстрированы бимодальные распределения основных параметров сейсмичности Земли, указывающие на закономерную связь усиления сейсмоактивности планеты с эффектом критических широт.

Фигура Земли и «критические широты»

Фигура Земли под влиянием гравитационного и центробежного потенциала сформировалась как сфероид (геоид), обладающий сжатием: $\varepsilon = (R - H) / R$.

Здесь R, H – экваториальный и полярный радиусы планеты. Радиус-вектор r сфероида при малых сжатиях определяется формулой общего вида

$$r = R_0 [1 + \varepsilon (1/3 - \sin^2\varphi)],$$

в которой R_0 – радиус сферы, эквивалентной по объему сфероиду, φ – геоцентрическая широта [13]. Из приведенного равенства видно, что радиус-вектор $r = R_0$ совпадает со средним радиусом планеты и в первом приближении не зависит от ее сжатия на «критических широтах», определяемых равенством $\sin^2\varphi_1 = 1/3$, $\varphi_1 = \pm 35^\circ 15' 52''$.

На рис. 1 дана схема эволюции сфероида и образования «критических широт».

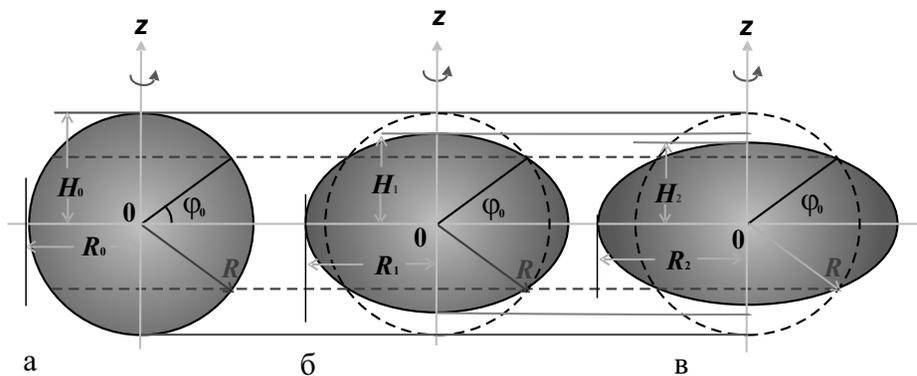


Рис. 1. Схема вращающегося небесного тела: три фрагмента для трех различных величин угловой скорости (ω). а – $\omega_0 \approx 0$; б – $\omega_1 > \omega_0$; в – $\omega_2 > \omega_1 > \omega_0$. Штриховые прямые линии обозначают критические широты для трех фрагментов вращающегося тела. Штриховые черные круги на фрагментах б и в определяют сферу, объем которой равен объему вращающихся эллипсоидов

Анализ фигур вращения [11] показал, что для всех рассмотренных подходов к определению формы поверхности планеты: эллипсоида вращения (Маклорен), самогравитирующего тела – постоянного геопотенциала (Ньютон) и упруго-деформируемой сферы [3] – сжатие не зависит от инерционных характеристик планеты и существует *универсальная связь* между сжатием и угловой скоростью вращения планеты

$$\varepsilon = C(R_0)\omega^2,$$

где $C(R_0)$ – некоторая постоянная, зависящая от среднего радиуса планеты.

Полная (гауссова) кривизна поверхности эллипсоида вращения при малых сжатиях в первом приближении определяется уравнением

$$\kappa = \kappa_1 [1 - 8\varepsilon P_2(\sin\varphi)/3],$$

где $\kappa_1 = 1/R_0^2$ – полная кривизна сферы и $P_2(\sin\varphi) = 1,5\sin^2\varphi - 0,5$ – зональная сферическая функция второго порядка. Зависимости полной кривизны сфероида от широты при различных сжатиях ε даны на рис. 2. Значения полной кривизны приведены к кривизне сферы. Видно, что общие точки пересечения пучка гауссовых кривых при различных малых сжатиях сфероида находятся на «критических широтах», в первом приближении не зависят от сжатия, а полная кривизна равна кривизне эквивалентной по объему сферы.

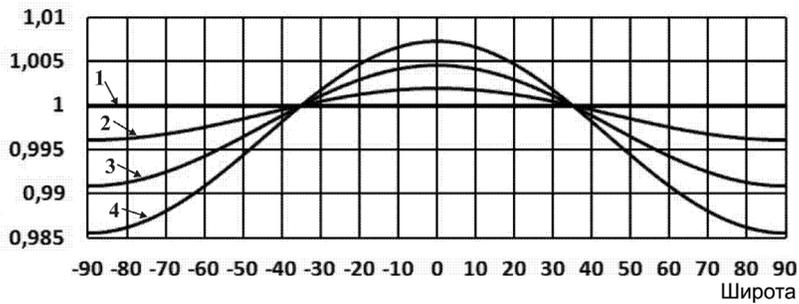


Рис. 2. Зависимость полной (гауссовой) кривизны поверхности сфероида от широты для различных величин сжатия: 1. $\varepsilon = 0$ – (сфера), 2. $\varepsilon = 0,00135$; 3. $\varepsilon = 0,00335$ (Земля); 4. $\varepsilon = 0,00535$

Энергия вращения геоида и широтная зависимость объемной плотности кинетической энергии

Для выявления особенностей широтного распределения кинетической энергии введем функции:

$$L(\varepsilon, \varphi) = (\sin^2 \varphi + x^{12} \cos^2 \varphi)^{1/2}, \quad N(\varepsilon, \varphi) = (\sin^2 \varphi + x^6 \cos^2 \varphi)^{1/2}, \quad x = (1 - \varepsilon)^{1/3}.$$

Согласно работе [5] можно показать, что элементы площадей поверхности эллипсоида вращения σ и сферы равного объема σ_0 относятся как

$$\sigma / \sigma_0 = x^4 L / N^4.$$

Точная формула для радиус-вектора эллипсоида вращения имеет вид

$$r = R_0 \cdot x^2 / N.$$

Из двух последних формул следует формула для изменения элемента объема эллипсоида вращения при изменении радиус-вектора

$$\Delta V = \sigma_0 R_0^3 |1 - x^6 L / N^5| / 3.$$

Кинетическая энергия вращения эллипсоида массы M равна

$$E = MR_0^2 \omega^2 / 5x^2, \quad \Delta E = E - E_0 = MR_0^2 \omega^2 (1 - x^2) / 5x^2 = E_0 (1 - x^2) / x^2.$$

Из двух последних формул следует, что

$$\Delta E / \Delta V = 3E_0 (1 - x^2) \cdot N^5 / (\sigma_0 R_0^3 x^2 |N^5 - x^6 L|),$$

и относительная объемная плотность кинетической энергии равна

$$V_0 \cdot \Delta E / (E_0 \cdot \Delta V) = (1 - x^2) N^5 / (x^2 |N^5 - x^6 L|), \quad V_0 = \sigma_0 R_0^3 / 3.$$

Зависимость относительной объемной плотности кинетической энергии вращения эллипсоида от широты приведена на рис. 3.

Отметим, что две критические зоны, в которых фиксируются пиковые значения плотности энергии вращения геоида, отделяют полярные области эллипсоида, где ярко выражена деформация сжатия среды, от экваториальной области, в которой преобладают деформации растяжения.

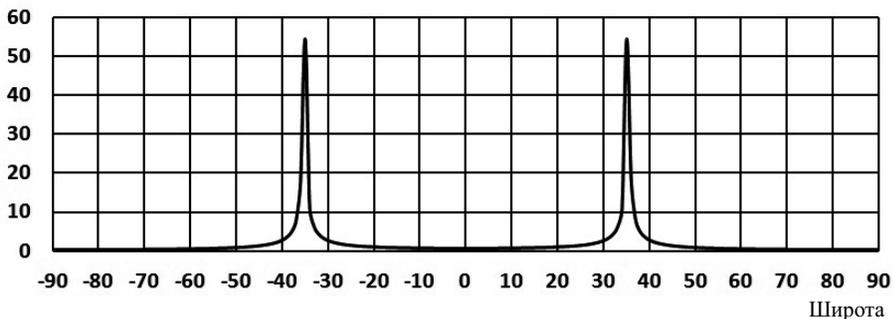


Рис. 3. Зависимость относительной объемной плотности энергии вращения эллипсоида от широты

Изменение угловой скорости вращения Земли и его вклад в вариацию энергии вращения

Наблюдаемая зависимость величины угловой скорости вращения от времени (т.е. нестабильность вращения) должна оказывать влияние на общую энергию вращения тела*. При выполнении условия $\omega = \omega(t)$, для вариации кинетической энергии вращения тела получаем

$$dE = 2E \cdot d\omega / \omega + \frac{1}{2} dI \cdot \omega^2.$$

Таким образом, энергия тела в результате нестабильности вращения должна возрастать в результате прибавления величины угловой скорости и величины момента инерции тела. Наиболее существенным здесь является рост относительной величины угловой скорости вращения, которая оценивается, по наблюдениям [6], как $d\omega / \omega \approx 10^{-8}$. В результате оценка величины вариации энергии вращающегося тела составит

$$dE = 2E \cdot d\omega / \omega \approx 10^{29} \cdot 10^{-8} = 10^{21} \text{ Дж в год.}$$

Отметим, что эта величина по порядку совпадает с величиной ежегодно выделяемой энергии землетрясений на всей Земле. Таким образом, при ускорении вращения тела появляется дополнительная энергия, которая выделяется неравномерно по широтным поясам (рис. 3).

На рис. 4 приведен график изменения скорости вращения Земли по данным IERS [9], из которого следует, что вариация угловой скорости в среднем составляет величину порядка 10^{-8} . Рис. 5 показывает результаты спектрального анализа колебаний. В спектре наряду с годовыми и полугодовыми колебаниями присутствуют месячные и полумесячные вариации, связанные с движениями системы Земля–Луна.

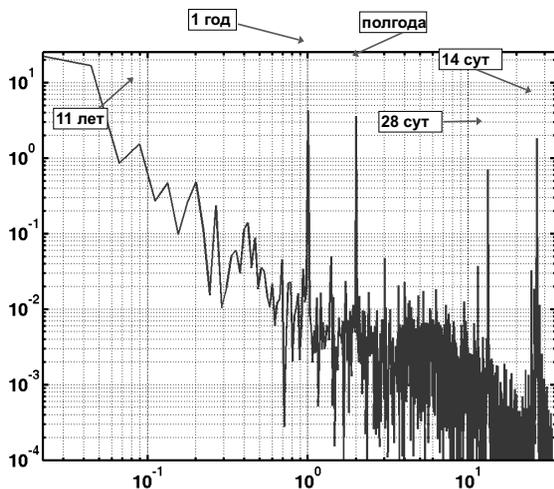
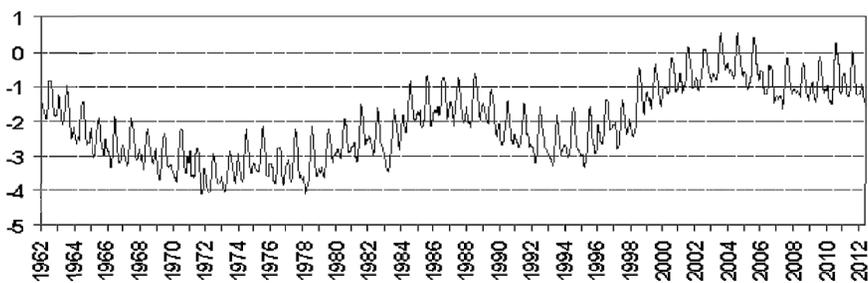


Рис. 4. Среднемесячные значения величины относительной угловой скорости вращения Земли ($v = 43200\omega / \pi - 1$) за последние 50 лет. На вертикальной оси показаны значения $v \cdot 10^{10}$

Рис. 5. Спектр ежемесячных средних значений величины v в двойном логарифмическом масштабе. Линии со стрелками определяют представительные пики спектра. По горизонтальной оси — количество циклов в год

* Фридман А.М. Частное сообщение. 2007 г.

Материалы каталогов землетрясений и широтная зависимость сейсмичности Земли

Анализ глобальных закономерностей в широтном распределении землетрясений показал, что даже в эпоху формирования сейсмологии как науки отмечалась неоднородность в распределении эпицентров землетрясений на Земле. Концепция зависимости сейсмичности от широтного расположения событий сформировалась за последние два десятилетия [1, 2, 12, 14]. Для статистической обработки событий мы использовали данные из каталога ISC UK [10] с предварительной стандартизацией магнитуд и очисткой списка событий от афтершоков. Анализу подвергался массив событий с магнитудой $M \geq 4,0$ за период с 1964 по 2011 г. (всего более 250 000 событий). Сопоставление количества землетрясений в различных широтных поясах и плотности землетрясений (количество событий, отнесенное к единице длины границы литосферных плит в каждом широтном поясе) показало, что сейсмическая активность планеты практически отсутствует на полюсах и в полярных шапках, имеет четко выраженные пики в средних широтах Северного и Южного полушарий ($40\text{--}50^\circ \text{ N}$ и $20\text{--}35^\circ \text{ S}$) и стабильный локальный минимум возле экватора ($10\text{--}20^\circ \text{ N}$). Аналогичную форму широтного распределения демонстрирует плотность высвобожденной энергии событий (рис. 6). Совпадение особенностей распределения сейсмичности Земли и объемной плотности энергии вращения (рис. 3) представляется очевидным. Это свидетельствует в пользу наличия некоей физической закономерности, которая связывает особенности вращения Земли с проявлением сейсмичности планеты.

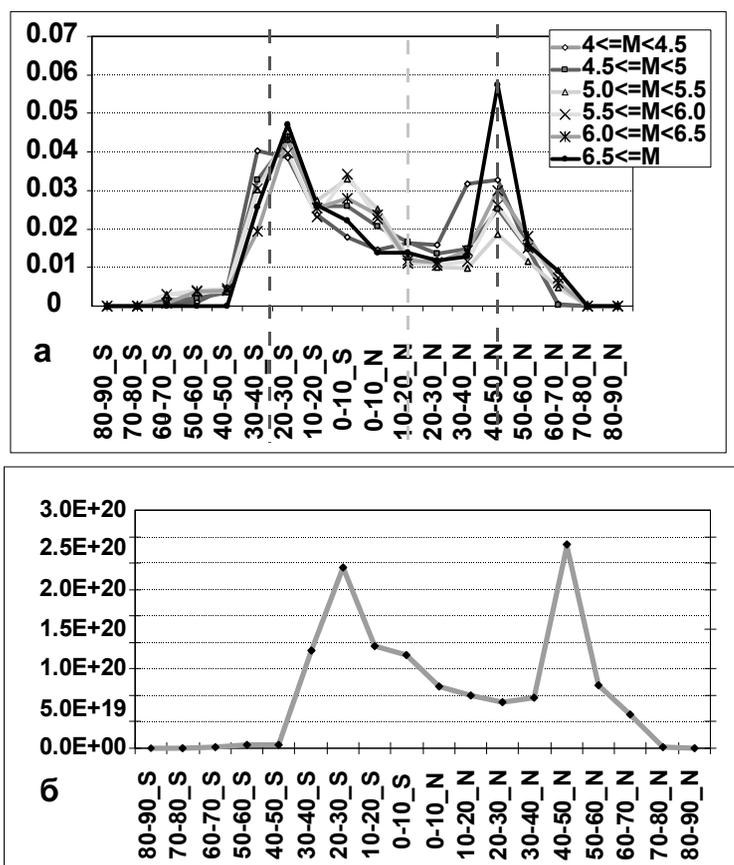


Рис. 6. Распределение относительной плотности сейсмических событий для 6 магнитудных диапазонов (а) и плотности энергии землетрясений по широтным поясам (б). Черные штриховые линии соответствуют максимальным значениям наблюдаемых величин, серые – минимальным

Выводы

Наблюдаемые вариации скорости вращения Земли должны приводить к попеременным изменениям величины сжатия упругой оболочки геоида. Рост скорости вращения планеты вызывает увеличение общего сжатия (увеличение экваториального радиуса), а уменьшение скорости – снижение сжатия (и уменьшение экваториального радиуса). Учитывая особенности «критических широт», мы должны осознавать, что сжатие планеты сопровождается сжатием пород в полярных шапках и растяжением – в экваториальной зоне. Соответственно, уменьшение общего сжатия (при замедлении вращения) вызывает уменьшение сжатия пород в полярных шапках и увеличение сжатия в области экваториальной зоны. В результате должна возникать попеременная пульсация геоида относительно стационарных плоскостей, расположенных в области «критических широт». Очевидно, пульсации геоида должны сопровождаться изменениями площади поверхности фигуры планеты и, следовательно, вызывать деформации и напряжения в породах упругой оболочки геоида. Этот процесс по мере накопления поврежденности в среде должен завершаться землетрясениями.

Проверка сформулированной гипотезы возможна путем постановки спутниковых наблюдений. Серия ежесуточных измерений величины радиуса Земли в пяти точках (на экваторе, на полюсах и на широте $\pm 35^\circ$) с точностью порядка 200 м позволит получить необходимые материалы наблюдений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Левин Б.В., Сасорова Е.В. Бимодальный характер широтных распределений землетрясений в Тихоокеанском регионе как проявление глобальной сейсмичности // ДАН. 2009. Т. 424, № 4. С. 538–542.
2. Левин Б.В., Сасорова Е.В. Сейсмичность Тихоокеанского региона: выявление глобальных закономерностей. М.: Янус-К, 2012. 308 с.
3. Лейбензон Л.С. Собрание трудов. Т. 4. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 399 с.
4. Личков Б.Л. Природные воды Земли и литосфера. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1960. 163 с.
5. Рашевский П.К. Курс дифференциальной геометрии. 3-е изд. М.: ГИТТЛ, 1950. 428 с.
6. Сидоренков Н.С. Физика нестабильностей вращения Земли. М.: Наука, Физматлит, 2002. 384 с.
7. Хаин В.Е., Короновский Н.В. Планета Земля от ядра до ионосферы. М.: КДУ, 2007. 244 с.
8. Шмидт О.Ю. Четыре лекции о теории происхождения Земли и планет. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 140 с.
9. IERS Annual Report. Intern. Earth Rot. Service. Observ. de Paris. 2000. 144 p. – www.iers.org
10. International Seismological Catalogue (ISC). – <http://www.isc.ac.uk>
11. Poincaré H. Figures d'équilibre: d'une masse fluide. Paris: C. Naud, 1902. 210 p.
12. Riguzzi F., Panza G., Varga P., Doglioni C. Can Earth's rotation and tidal despinning drive plate tectonics? // *Tectonophysics*. 2010. Vol. 484. P. 60–73.
13. Stacey F.D., Davis P.M. *Physics of the Earth*. N.Y.: Cambridge Univ. Press, 2008. 552 p.
14. Sun W. Seismic energy distribution in latitude and a possible tidal stress // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1992. Vol. 71. P. 205–216.
15. Véronnet A. Rotation de l'ellipsoïde hétérogène et figure exacte de la Terre // *J. mathématiques pures et appliquées*. 1912. Série 6e, t. 8. P. 331–463.