

ГЕОФИЗИКА

УДК 551.24

## ВЕКОВОЕ ИЗМЕНЕНИЕ СРЕДНЕГО РАДИУСА ЗЕМЛИ

**Ю. В. Баркин**  
(ГАИШ)

**Показано, что механизм субдукции и аккумуляции масс океанических плит приводит к медленному уменьшению среднего радиуса Земли со скоростью  $\sim 0,35$  мм/год**

Проблеме векового изменения радиуса Земли уже более ста лет. Концепция расширения Земли от ее зачатков вплоть до современного состояния подробно изло-

жена в монографии Кэри [1], поэтому отметим лишь те работы, которые имеют непосредственное отношение к проводимому здесь исследованию.

Согласно современным воззрениям, почти 95% поверхности Земли находится в состоянии напряжения сжатия, что можно рассматривать как прямое указание на существование процесса сокращения радиуса Земли [2]. Предложенная Кропоткиным геодинамическая модель [2] опирается на теорию движения плит и пульсационную гипотезу Обручева. Согласно [2], изменение площади поверхности Земли является знакопеременным, имеет декадный и иррегулярный характер и согласуется с вариациями скорости вращения Земли. То есть периоды расширения Земли сменяются периодами ее сжатия. В работе [2] указывается, что наблюдаемое сжатие земной коры могло возникнуть в результате сокращения радиуса Земли в последние 10 млн лет на неотектоническом этапе ее развития.

К аналогичному выводу об уменьшении радиуса Земли в современную эпоху пришел Бурша [3, 4] в результате тщательного анализа интегралов кинетического момента системы Земля–Луна с использованием современных данных о приливных изменениях параметров этой системы, вековой вариации коэффициента геопотенциала  $J_2$  и угловом ускорении вращения Земли.

В последние годы появились работы [5, 6], в которых предпринимаются попытки определения скорости изменения радиуса Земли  $\dot{R}$  на основе данных высокоточных лазерных наблюдений спутников Lageos. Авторы придерживаются противоположных взглядов на проблему, а их результаты по определению  $\dot{R}$  носят противоречивый характер (так, найденные ими значения  $\dot{R}$  варьируются в больших пределах: от 16 до  $-20$  мм/год).

Еще более запутанным является вопрос о механизмах, порождающих изменение среднего радиуса Земли. Например, соображения известного последователя гипотезы расширяющейся Земли Кэри [1] основаны на идее российского инженера Ярковского о поглощении Землей эфира, а также на законе Хаббла расширения Вселенной. Привлекаются для оценок возможных геодинамических эффектов также другие физические теории, например, допускающие временные вариации гравитационной постоянной [7].

В данной работе получены оценки скорости изменения среднего радиуса Земли фактически на основе предположения о существовании механизма аккумуляции масс вдоль сравнительно узких окрестностей зон субдукции [8].

Согласно этой гипотезе астеносферные массы, поступающие в рифтовые зоны и нарастаемые на подошвах океанических плит, транспортируются вследствие глобального движения плит к зонам субдукции и аккумулируются в их окрестностях. То есть в данную геологическую эпоху астеносферный слой как бы теряет массу, утончается, а как следствие этого планетарного процесса средний радиус Земли уменьшается. Другими словами, поступающие в астеносферу массы океанических плит, по нашему предположению, «мгновенно» не восполняют потерь «расходных масс» астеносферного слоя, а концентрируются вдоль сравнительно узких поясов на поверхности Земли. Лишь на геологических интервалах времени и при существенных изменениях интенсивностей процессов субдукции и спрединга происходит «выравнивание» астеносферного слоя, «рассасывание» и «буксировка» накопленных вдоль зон субдукции масс. Существенную роль в указанных

процессах, по-видимому, играет глобальное вращение литосферы [9].

Таким образом, в зонах концентрации масс погружающихся океанических плит должен наблюдаться обратный эффект — увеличение среднего радиуса Земли, что подтверждается, например, поднятием плато Тибет и др. Собственно говоря, в результате формирования подобных «швов» средний радиус Земли (вычисленный для всей ее поверхности, за исключением упомянутых узких поясов зон субдукции) должен испытывать медленное уменьшение.

Предложенная схема перераспределения масс Земли поддается простому аналитическому описанию, причем с разных позиций. Ниже мы тремя способами получим значения  $\dot{R}$ , хорошо согласующиеся между собой.

Первый метод опирается на использование соотношения баланса масс: уменьшение массы астеносферного слоя за единицу времени равно сумме аккумулируемых вдоль зон субдукции масс и масс, поступающих к срединно-океаническим хребтам, за ту же единицу времени. Скорость изменения радиуса астеносферного слоя при этом составляет

$$\dot{R} = -R(\dot{m}_s + \dot{m}_c)\rho / (3m\rho_a) = -R \cdot 0,5727 \frac{(\dot{m}_s + \dot{m}_c)}{m}, \quad (1)$$

где  $R = 6371$  км — средний радиус Земли,  $m$  — ее масса,  $\rho = 3,21$  г/см<sup>3</sup> и  $\rho = 5,515$  г/см<sup>3</sup> — плотность астеносферного слоя и средняя плотность Земли,  $\dot{m}_s$  и  $\dot{m}_c$  — два фундаментальных параметра глобального тектонического процесса:  $\dot{m}_s$  — скорость поступления масс океанических плит во все зоны субдукции,  $\dot{m}_c$  — скорость поступления астеносферных масс по всем рифтовым зонам (вдоль срединно-океанических хребтов). При заданной кинематике плит указанные характеристики определяются простыми криволинейными интегралами по поверхности Земли вдоль зон субдукции и рифтовых зон и довольно легко рассчитываются приближенными методами.

Для расчета  $\dot{m}_c$  также использовалось известное значение скорости спрединга океанического дна  $\dot{S}_c = 3,1$  км<sup>2</sup>/год [2] и значение мощности плит в зонах их зарождения  $H = 2$  км [10]. При расчетах значения  $\dot{m}_s$  использовалась кинематическая теория относительного движения литосферных плит Ушакова–Галупкина [11]. Средняя мощность погружающихся блоков плит принималась равной  $H = 80$  км, их плотность  $\rho = 3,3$  г/см<sup>3</sup>.

Для найденных значений параметров

$$\dot{m}_s/m = 9,12 \cdot 10^{-9} \text{ век}^{-1}, \quad \dot{m}_c/m = 0,34 \cdot 10^{-9} \text{ век}^{-1}$$

скорость изменения среднего радиуса Земли (1) составила  $\dot{R} = -0,345$  мм/год ( $\dot{R}/R = -5,42 \cdot 10^{-9} \text{ век}^{-1}$ ).

Второй метод использует инвариант тектонического процесса: сумма осевых моментов инерции тектонических масс при любом их перераспределении в тонком приповерхностном сферическом слое остается неизменной.

Отсюда следует выражение для скорости изменения радиуса Земли:

$$\frac{\dot{R}}{R} = -\frac{\rho I}{6\rho_a} \frac{(\dot{A} + \dot{B} + \dot{C})_s}{C} = -0,0947 \frac{(\dot{A} + \dot{B} + \dot{C})_s}{C}, \quad (2)$$

где  $I = C/mR^2 = 0,33068$  — безразмерный момент инерции Земли, а  $(\dot{A})_s, (\dot{B})_s, (\dot{C})_s$  — скорости изменения осевых моментов инерции Земли вследствие субдукции и аккумуляции масс океанических плит. Их значения (см. (5)) были определены в результате приближенного вычисления соответствующих объемных интегралов [8].

Для этих значений по формуле (2) находим:  $\dot{R}/R = -5,025 \cdot 10^{-9}$  век $^{-1}$ ,  $\dot{R} = -0,320$  мм/год.

Третий метод основан на использовании значения неприливного ускорения вращения Земли [12], вызванного вариацией динамического строения Земли (точнее, ее полярного момента инерции  $C$ ),

$$\dot{\omega}_{nt}/\omega = -\dot{C}/C = (6,92 \pm 1,73) \cdot 10^{-8} \text{ век}^{-1}. \quad (3)$$

Последнее равенство можно записать подробнее:

$$\frac{\dot{R}}{R} = -\frac{\rho I}{2\rho a} \times \left[ \frac{\dot{\omega}_{nt}}{\omega} + \left(\frac{\dot{C}}{C}\right)_O + \left(\frac{\dot{C}}{C}\right)_A + \left(\frac{\dot{C}}{C}\right)_G + \left(\frac{\dot{C}}{C}\right)_{WI} + \left(\frac{\dot{C}}{C}\right)_S \right]. \quad (4)$$

В квадратных скобках записаны вариации момента инерции Земли, вызванные изменением уровня Мирового океана ( $O$ ), аккумуляцией льдов в Антарктиде ( $A$ ) и Гренландии ( $G$ ) и субдукцией плит ( $S$ ). Вариация  $(\dot{C})_{WI}$  обусловлена другими процессами трансформации лед-вода-лед в приповерхностных слоях Земли.

Все эти вариации были рассчитаны для простых моделей указанных геодинимических процессов по методике, использованной, например, в [8]. Скорости вековых изменений уровня Мирового океана и ледовых покровов Гренландии и Антарктиды принимались равными 1,38 и 20 мм/год [13]. Средняя эффективная мощность погружающихся литосферных плит принималась равной 80 км [10].

Опуская процедуру вычисления вариаций полярного момента инерции Земли в (4), которая сводится к приближенному вычислению методом трапеций соответствующих поверхностных интегралов, приведем их значения:

$$\begin{aligned} (\dot{A})_O/C &= 13,29 \cdot 10^{-9} \text{ век}^{-1}, \\ (\dot{A})_A/C &= 9,83 \cdot 10^{-9} \text{ век}^{-1}, \\ (\dot{A})_G/C &= 1,70 \cdot 10^{-9} \text{ век}^{-1}, \\ (\dot{A})_S/C &= 17,17 \cdot 10^{-9} \text{ век}^{-1}, \\ (\dot{B})_O/C &= 13,80 \cdot 10^{-9} \text{ век}^{-1}, \\ (\dot{B})_A/C &= 9,61 \cdot 10^{-9} \text{ век}^{-1}, \\ (\dot{B})_G/C &= 1,73 \cdot 10^{-9} \text{ век}^{-1}, \\ (\dot{B})_S/C &= 14,13 \cdot 10^{-9} \text{ век}^{-1}, \\ (\dot{C})_O/C &= 14,12 \cdot 10^{-9} \text{ век}^{-1}, \\ (\dot{C})_A/C &= 0,64 \cdot 10^{-9} \text{ век}^{-1}, \\ (\dot{C})_G/C &= 0,17 \cdot 10^{-9} \text{ век}^{-1}, \\ (\dot{C})_S/C &= 21,77 \cdot 10^{-9} \text{ век}^{-1}. \end{aligned} \quad (5)$$

Вариация  $(\dot{C})_{WI}$  может быть оценена приближенно на основе аналогичного инварианта для водно-ледовых масс: сумма их осевых моментов инерции есть величина постоянная. При этом предположении по данным (5) находим

$$(\dot{C})_{WI}/C = -(1/3)(\dot{A} + \dot{B} + \dot{C})_{O,A,G}/C = -21,62 \cdot 10^{-9} \text{ век}^{-1}.$$

Здесь  $(\dot{A} + \dot{B} + \dot{C})_{O,A,G}$  — вариация суммы осевых моментов Земли вследствие трех процессов ( $O, A, G$ ).

Для значения неприливного ускорения (3) по формуле (4) находим  $\dot{R} = -0,273 \pm 0,031$  мм/год.

### Заключение

Все предложенные выше три метода дают близкие значения скорости уменьшения радиуса Земли в современную эпоху:  $\dot{R} = -(0,27 \div 0,35)$  мм/год. При этом при расчетах использовались разнообразные исходные данные: вариации тектонических масс, осевых моментов инерции Земли, а также неприливное ускорение вращения Земли. Полученные результаты дают определенные основания отнести изучаемое тонкое геодинимическое явление к реальным явлениям. В отличие от работ других авторов в настоящей работе указывается и оценивается количественно конкретный механизм изменения геометрии масс и радиуса Земли. Найденное здесь значение  $\dot{R}$  является верхней оценкой этого параметра. Дополнительный анализ механизма аккумуляции тектонических масс показывает, что реальная величина  $\dot{R}$  может составлять всего 0,10 мм/год.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант 96-05-65015).

### Литература

1. Кэри У. В поисках закономерностей развития Земли и Вселенной. М., 1991.
2. Кропоткин П.Н. // Природа. 1989. № 1. С. 70.
3. Bursa M. // Stud. Geoph. Geod. 1993. 37. P. 113.
4. Буриша М., Юркина М.И. // Геодезия и картография. 1993. № 8. С. 7.
5. Машимов М.М. // Там же. 1993. № 3. С. 22.
6. Герасименко М.Д. // Там же. 1993. № 10. С. 12.
7. Иваненко Д.Д., Сагитов М.У. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1961. № 6. С. 83.
8. Barkin Yu.V. // Proc. Intern. Conf. «Earth Rotation, Reference Systems in Geodynamics and Solar System» (Warsaw, Poland, September 18–20, 1995). Warsaw, Poland, 1996. P. 159.
9. Ostrihansky L. // Proc. Intern. Symp. «Figure and Dynamics of the Earth, Moon and Planets». Prague, 1986. Part 2. P. 593.
10. Сорохтин О.Г., Ушаков С.А. Природа тектонической активности Земли. // Итоги науки и техники. Сер. Физика Земли. М., 1993. Т. 12.
11. Ушаков С.А., Галушкин Ю.И. Литосфера Земли. Ч. 1. Кинематика плит и океаническая литосфера. // Там же. М., 1978. Т. 3.
12. Stephenson F.R., Morrison L.V. // Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. 1995. A351. P. 165.
13. Nakiboglu S.M., Pointon K.W. // Proc. Symp. «Figure and Dynamics of the Earth, Moon and Planets». Prague, 1987. Part 2. P. 525.

Поступила в редакцию  
23.05.97