

И. ПАЭСАЛУ

## ОЦЕНКА ПРИЛИВНОЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ТАЛЛИНЕ

Как известно, под влиянием приливообразующих сил Луны и Солнца деформируется не только поверхность океанов и морей, но и твердая Земля, поскольку она не является абсолютно жесткой. На экваторе наблюдается максимальная приливная деформация земной поверхности, достигающая 50 см.

Вертикальную составляющую приливной деформации можно косвенно определить, измерив приливное изменение силы тяжести, обусловленное тремя факторами:

1) прямым влиянием приливообразующей силы; 2) вертикальным смещением земной поверхности (относительно центра Земли) под влиянием притяжения Луны и Солнца; 3) перераспределением масс Земли при ее деформации.

Фактическое приливное изменение силы тяжести является алгебраической суммой этих трех составляющих. Два первых компонента приняты со знаком «плюс», а третий со знаком «минус». Математически это можно выразить следующим образом (Мельхиор, 1968)

$$\Delta g_{\text{набл}} = \left(1 + h - \frac{3}{2}k\right) \Delta g_{\text{теор}}, \quad (1)$$

где  $\Delta g_{\text{теор}}$  — теоретическое приливное изменение силы тяжести при условии, что Земля абсолютно твердая;  $h, k$  — числа Лява, характеризующие упругость Земли.

Выделяя из общего приливного изменения силы тяжести составную часть, вызванную смещением земной поверхности, и зная, каким образом это составное изменение связано с радиальной (вертикальной) деформацией, можно решить обратную задачу — определить вертикальное смещение по приливному изменению напряженности гравитационного поля. Далее выведем это соотношение. Изменение силы тяжести, вызванное вертикальным смещением земной поверхности, выражается как

$$\Delta g_{\text{смещ}} = h \cdot \Delta g_{\text{теор}}. \quad (2)$$

Но

$$\Delta g_{\text{теор}} = \Delta g_{\text{набл}} / \delta, \quad (3)$$

где  $\delta$  — комбинация чисел Лява в уравнении (1).  
Подставив (3) в (2), получим

$$\Delta g_{\text{смещ}} = \frac{h}{\delta} \Delta g_{\text{набл}}. \quad (4)$$

Вертикальное смещение можно выразить через соответствующее изменение силы тяжести, т. е. через редуцию в свободном воздухе

$$\xi = -\frac{1}{\alpha} \Delta g_{\text{смещ}}, \quad (5)$$

где  $\xi$  — вертикальное смещение земной поверхности (положительная ось направлена вверх);  $\alpha$  — вертикальный градиент силы тяжести, равный 3,086 мкГал/см.

Подставив (4) в (5), получим искомое соотношение

$$\xi = -\frac{1}{\alpha} \frac{h}{\delta} \Delta g_{\text{набл.}} \quad (6)$$

Итак, зная фактическое приливное изменение силы тяжести и гравиметрический фактор  $\delta$ , можно оценить приливное вертикальное смещение земной поверхности. По теории М. С. Молоденского (1953),  $k \approx h/2$  (с точностью 1%). Отсюда следует, что  $h \approx 4(\delta - 1)$ . С учетом этого точное равенство (6) можно преобразовать в приближенное

$$\xi \approx -\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{4(\delta - 1)}{\delta} \Delta g_{\text{набл.}} \quad (7)$$

Приливные изменения силы тяжести можно измерить гравиметром (например, типа «Аскания»), а фактор  $\delta$  определить как отношение величины измеренного гравиметрического прилива к теоретической величине для составляющих прилив волн по гармоническому анализу наблюдений.

На основе стационарных наблюдений приливных изменений силы тяжести с помощью гравиметра Gs-11 № 147 в течение 19 мес., с 1965 по 1977 гг. (на Таллинской гравиметрической станции Института геологии АН ЭССР) определили, что гравиметрический фактор  $\delta$  равен 1,162 (Маасик и др., 1972; Паэсалу, Сильдвээ, 1981; Паэсалу, 1981; Паэсалу, в печати). Отсюда следует, что коэффициент пропорциональности в формуле (7) равен 0,181. Таким образом для Таллина мы определили

$$\xi_{\text{Тлн}} \approx -0,181 \Delta g_{\text{набл.}}$$

Фактор  $\delta$  определили по главной суточной лунной волне  $O_1$  (период волны 25,8 ч, амплитуда в Таллине 27,3 мкГал), которая проявляется наиболее четко при гармоническом анализе.

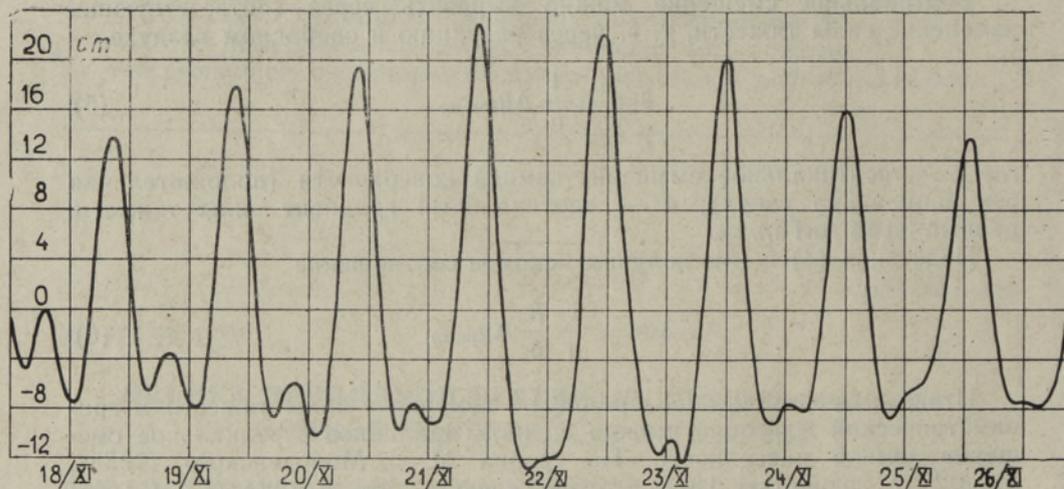
Это же значение  $\delta$  приписали к общему отношению  $\Delta g_{\text{набл.}}/\Delta g_{\text{теор.}}$ , допустив при этом некоторую погрешность, поскольку, строго говоря, для различных волн земного прилива величина этого отношения различна (Молоденский, Крамер, 1961). Но, видимо, погрешность здесь небольшая, поскольку в первом приближении для главных волн разницу в величинах  $\delta$  можно считать незначительной.

Точность вычисления приливного вертикального смещения земной поверхности по формуле (6) можно оценить следующим образом

$$E_{\xi} \approx E_{\alpha} + E \left( \frac{4(\delta - 1)}{\delta} \right) + E \Delta g_{\text{набл.}}, \quad (8)$$

где  $E$  — относительная погрешность.

Если пределом считать  $E_{\delta} = 1\%$ , то  $E \frac{4(\delta - 1)}{\delta}$  составит 7%.  $E_{\alpha}$  по



Приливные вертикальные деформации земной поверхности в Таллине в ноябре 1976 г.

отношению к этим величинам гораздо меньше, поэтому им можно пренебречь.  $E\Delta g_{\text{набл}}$  при Таллинских наблюдениях в среднем около 1%. В общей сложности суммарная относительная погрешность при вычислении вертикального приливного смещения земной поверхности в Таллине равна приблизительно 8% (при высоте прилива 20 см линейная мера составляет  $\pm 1,6$  см). Естественно, чем больше прилив, тем точнее его определение.

С математической точки зрения, оценка погрешности приливного вертикального смещения по формуле (8) не может быть точной, поскольку, очевидно,  $\delta = f(\Delta g_{\text{набл}})$ , т. е. переменные  $\delta$  и  $\Delta g_{\text{набл}}$  нельзя рассматривать как независимые. Допущение независимости указанных переменных использовалось при выводе формулы (8). Кроме того, нужно бы учесть и погрешность равенства (7). Следовательно, формула (8) по нашему мнению, приемлема только для приблизительной оценки точности.

На рисунке изображена кривая приливных вертикальных смещений земной поверхности в Таллине в течение одной недели (в ноябре 1976 г. при новолунии). Эта кривая получена в результате умножения измеренных ординат приливных вариаций силы тяжести (из которых исключено смещение нулевого пункта гравиметра) на коэффициент  $-0,181$ . Бросаются в глаза периодический характер кривой (суточные и полусуточные приливные волны), асимметрия ее относительно нулевого уровня и модуляция по амплитуде. Периодический характер кривой объясняется циклической природой приливообразующих сил, асимметрия — характером описывающей данное явление функции, по которой приливной подъем больше опускания (Мельхиор, 1968).

Модуляция вызвана взаимодействием приливообразующих сил Луны и Солнца. При новолунии и полнолунии, когда эти силы суммируются, прилив большой, а во время первой и последней четверти Луны, когда от ее приливообразующей силы вычитается сила Солнца, прилив маленький.

Максимальное приливное вертикальное смещение (разница между отливом и приливом) земной поверхности в Таллине достигает 35 см (рисунок). Минимальный размах этих колебаний составляет  $\sim 6$  см. В среднем земная поверхность под влиянием приливообразующих сил Луны и Солнца колеблется в пределах 20 см. Большая ампли-

туда приливных деформаций Земли на нашей географической широте объясняется существенной ролью суточных волн в суммарном приливе.

Если учесть результаты анализа гравиметрических наблюдений на земноприливных станциях в Пулково и Хельсинки (Волков и др., 1980; Ducarme, Kääriäinen, 1980) и пренебречь незначительной разницей в географических широтах, то можно сказать, что как в Таллине, так и во всей области вокруг Финского залива средний размах земных приливов составляет 20 см, т. е. Земля в этом регионе почти одинаково реагирует на внешние периодические (приливные) силы. Это значит, что и упругость ее в этой области должна быть приблизительно одинаковой. В заключение отметим, что определенная нами величина приливной вертикальной деформации земной поверхности в Таллине в несколько раз больше величины морского прилива в Финском заливе.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Волков В. А., Барсенков С. Н., Засимов С. С., Гусева Ф. П., Варга П., Крамер М. В., Кузнецов М. В. Наблюдения приливных изменений ускорения силы тяжести в Пулково в 1976—1977 гг. — В кн.: Изучение земных приливов. М., 1980, 137—152.
- Мельхиор П. Земные приливы. М., 1968.
- Молоденский М. С. Упругие приливы, свободная нутация и некоторые вопросы строения Земли. — Тр. Геофизич. ин-та АН СССР, 1953, 19, 1—146.
- Молоденский М. С., Крамер М. В. Числа Лява для статических земных приливов второго и третьего порядков. — В кн.: Земные приливы и нутация Земли. М., 1961, 1—30.
- Пазсалу И. Результаты пятимесячных наблюдений приливных вариаций силы тяжести в Таллине. — В кн.: Новые методы в геологии Эстонии. Таллин, 1981, 61—71.
- Пазсалу И. Я. Результаты наблюдений приливных вариаций силы тяжести в Таллине в 1976—1977 гг. — В кн.: Вращение и приливные деформации Земли. Киев (в печати).
- Пазсалу И., Сильдвэз Х. Наблюдения приливных вариаций силы тяжести в Таллине. — В кн.: Изучение современных движений Прибалтики. Тарту, 1981, 71—81.
- Ducarme B., Kääriäinen J. The Finnish tidal gravity registrations in Fennoscandia. — Suomen geod. laitoksen julkaisuja, 1980, 90, 1—43.
- Maasik, V., Lump, N., Puro, A. Loodetest põhjustatud raskusjõu variatsioonidest Eestis. — ENSV TA Toim. Füüs., Matem., 1972, 4, 437—442.

Институт геологии  
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию  
26/XI 1982

J. PAESALU

#### MAAPINNA LOODELISTE VERTIKAALSETE DEFORMATSIOONIDE HINNANG TALLINNAS

19 kuu jooksul Tallinnas toimunud statsionaarsete gravimeetriliste mõõtmistega on kindlaks tehtud, et maakoore loodelised vertikaalsed deformatsioonid ulatuvad kuni 35 sentimeetriti.

ESTIMATION OF THE TIDAL VERTICAL DEFORMATION  
OF THE EARTH'S SURFACE IN TALLINN

In this paper the formula  $\xi \approx -\frac{4(\delta - 1)}{\alpha\delta} \Delta g_{\text{obs.}}$  is derived, which allows to approximately estimate the range of the vertical component of the Earth's tides by means of stationary gravity measurements.

On the grounds of harmonic analysis of 19-month series of observations of tidal gravity variations in Tallinn by the Institute of Geology, the gravimetric factor for the wave  $O_1$  ( $\delta=1.162$ ) has been determined with the greatest veracity.

By means of the latter and the direct gravimetric record, the tidal vertical deformations of the Earth's surface in Tallinn have been estimated. As shown in the Figure, the maximal value to these deformations reaches up to 35 cm, the mean value being about 20 cm.