

**ПРИЛИВНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ ТБИЛИССКОГО
ВЕРТИКАЛЬНОГО ЭКСТЕНЗОМЕТРА**

Картвелишвили К.З., Картвелишвили Г. Д.

*Институт геофизики им. Михаила Нодиа Тбилисского государственного университета им. Ивана
Джავахишвили, 0160, Тбилиси, ул. М. Алексидзе, 1*

В 1971 г. в Тбилиси в подземной лаборатории отдела земных приливов Института геофизика АН Грузинской ССР был установлен вертикальный штанговый экстензометр. Подземное сооружение Лаборатории состояло из штольни длиной более 100 м, с двумя входами и с пятью камерами, наибольшая из которых имеет длину около 15 м. Штольня была проложена в 1942 г. Она облицована слоем бетона толщиной 30-40 см. имеет хорошую гидроизоляцию и дренажную систему. Расстояние до дневной поверхности меняется от 15 м от входа в штольню и до 60 м от ее конца.

Вертикальный экстензометр был установлен в камере, которая расположена в конце штольни. Штанга экстензометра была выполнена из стального стержня диаметром 25 мм и из трубы прозрачного кварцевого стекла, которые соединены между собой с помощью стальных фланцев. Общая эффективная длина экстензометра составляла 6.5 м. Верхний конец был закреплен в неразрушенной скальной породе с помощью анкерного механизма и зацементирован. Нижняя половина экстензометра была выполнена из трубы кварцевого стекла. Диаметр трубы 40 мм. толщина стенок 2-3 мм.

Смещения вертикальной штанги измеряются с помощью ёмкостного преобразователя малых перемещений КД-I [3], модифицированного для вертикального экстензометра. Чувствительность датчика к перемещению составляет 100 мВ/мкм. Выходные сигналы записываются на диаграмную ленту с помощью уравновешенных мостов типа КСП-4. Вся система для защиты от влияния изменения температуры и движения воздушных масс помещена в боксе из пенопласта.

Вертикальный экстензометр измеряет дифференциальное вертикальное перемещение $\delta\xi$ между двумя точками вдоль радиуса Земли, отстоящих на расстояние $\delta\alpha$. Для ξ приливного потенциала W_2 можем написать

$$\xi = h(r) \frac{W_2}{g}. \quad (1)$$

Здесь ξ обозначает радиальную компоненту перемещения, W_2 – главный член приливообразующего потенциала, g – ускорение силы тяжести. Для первого приближения можем написать:

$$\delta\xi = \frac{\partial\xi}{\partial r} \delta\alpha = \frac{W_2}{rg} (rh' + 2h)\delta\alpha \quad (2)$$

где h' обозначает первую производную по r . h – радиальное число Лява. Для $r = \alpha$ получим:

$$\delta\xi = (\alpha h' + 2h) \frac{\delta\alpha}{\alpha} \frac{W_2}{g} = \eta \frac{\delta\alpha}{\alpha} \cdot \frac{W_2}{g} \quad (3)$$

$\eta = \alpha h' + 2h$ можно назвать вертикальным деформационным фактором и он представляет собой коэффициент пропорциональности между приливным потенциалом и смещением в вертикальном направлении.

Можно показать, что $\alpha h'$ выражается с помощью числа Лява h и числа Шида ℓ следующим образом

$$\alpha h' = -2(1 + \gamma)h + 6\gamma\ell \quad (4)$$

где $\nu = \lambda / \lambda + 2\mu = 1 - 2(\beta / \alpha)^2$, λ и μ упругие константы Лява, α и β скорости Р и S волн, соответственно.

Обычно приливные факторы: γ – наклономерный, G – гравиметрический и Λ – астрономический описывают интегральный эффект и не зависят от локальных структур. Для вертикального приливного деформационного фактора η этого сказать нельзя, поскольку на него влияют как локальные особенности структур, также и упругие свойства Земли, как целого.

Если пользоваться средними значениями $\alpha = 6.1 \text{ км/сек}$, $\beta = 3.54 \text{ км/сек}$ для модели Земли Буллена В можем получить:

для полусуточных приливов: $h = 0.6199$, $\ell = 0.0880$

для суточных приливов: $h = 0.6173$, $\ell = 0.0878$

Отсюда:

для полусуточных приливов: $\alpha h' = -1.472$, $\eta = -0.232$

для суточных приливов: $\alpha h' = -1.466$, $\eta = -0.231$

С другой стороны для различных моделей Земли согласно М.С. Молоденскому, получим $-1.563 > \alpha h' > -1.587$. По данным Такеучи для модели Буллена В $\alpha h' > -1.477$.

Заметим, что последний результат был получен для неопределенно длиннопериодического прилива. Хотя вышеприведенные авторы не пользовались средними значениями для α и β . Поэтому приведенные выше результаты нельзя непосредственно сравнивать друг с другом. Значение величины $\eta = -0.25$ можно считать более или менее приемлемым результатом для распространенных горных пород на поверхности Земли.

Для определения компоненты упругой приливной деформации e_{rr} в радиальном направлении можно пользоваться выражением (2), согласно которому получим для e_{rr}

$$e_{rr} = \left[\alpha \frac{dH(\alpha)}{dr} + 2h \right] \frac{W_2}{\alpha g} \quad (5)$$

где α – средний радиус Земли, r – расстояние от центра Земли до точки наблюдения, g – ускорение силы тяжести в пункте наблюдения, W_2 – вторая гармоника потенциала приливов, вносящая основной вклад в приливную деформацию. При $r = \alpha$, $H(\alpha) = h$, где h число Лява.

Систематические наблюдения с помощью вертикальной компоненты экстензометра в подземной лаборатории отдела земных приливов института были налажены с марта 1984 г.

Гармоническому анализу был подвергнут материал наблюдений с общей продолжительностью 506.5 суток, полученный за период с 13.3.1984 по 21.3.1986 г. Обработка выполнена по методу выделения гармоник из сложной кривой [4], разработанному в отделе земных приливов института. Определены амплитуды четырех полусуточных (K_2 , S_2 , M_2 , N_2) и пяти суточных (K_1 , S_1 , P_1 , M_1 , O_1) волн. Масштаб записи для различных серий менялся в пределах от $0.57 \cdot 10^{-9} \text{ мм}^{-1}$ до $1.72 \cdot 10^{-9} \text{ мм}^{-1}$.

Для всех определяемых волн суммарное значение величины $W_2 / \alpha g$ составило для Тбилисской широты $8.523 \cdot 10^{-8}$ и, при этом вертикальная приливная деформация оказалась $W_2 / g = 54.3 \text{ см}$.

В таблице 1 в первых строках для каждой серии приводятся значения амплитуд приливных воли, а во вторых строках средние квадратичные ошибки их определений. Приводятся также средние чувствительности S с указанием статистических весов P для каждой серии наблюдений. Все P берутся как величины, обратно пропорциональные средней квадратичной ошибки единичного измерения для каждой обрабатываемой серии. Там же приводятся продолжительности серии в часах.

Табл. 1

Значения амплитуд основных приливных волн
для вертикальной компоненты деформации (в 10^{-9})

№№	Волны материал набл.	K_2	S_2	M_2	N_2	K_1	S_1	P_1	M_1	O_1
1.	13.3.84-6.6.84 $L = 2040$, $P = 1.03$, $S = 0.57 \cdot 10^{-9} / \text{мм}$	3.90 2.27	3.08 1.53	2.32 4.12	0.64 0.53	3.29 2.23	3.29 3.90	3.95 2.00	1.30 0.30	0.63 2.56
2.	5.10.84-4.3.85 $L = 3600$, $P = 4.35$, $S = 1.24 \cdot 10^{-9} / \text{мм}$	1.45 0.18	4.29 0.32	7.28 0.84	0.88 0.29	5.46 0.06	7.41 0.22	5.85 0.10	2.13 0.54	3.36 0.19
3.	19.6.85-19.10.85 $L = 2916$, $P = 4.31$, $S = 1.53 \cdot 10^{-9} / \text{мм}$	3.03 1.40	7.62 3.01	6.31 0.13	1.80 0.63	3.47 2.05	3.00 4.19	2.23 3.72	1.07 0.53	3.80 0.61
4.	22.10.85-21.3.86 $L = 3600$, $P = 7.35$, $S = 1.72 \cdot 10^{-9} / \text{мм}$	0.60 1.03	3.24 1.37	6.59 0.15	1.19 0.02	7.07 1.55	10.10 2.88	8.46 2.51	1.63 0.03	3.08 0.11

По данным таблицы 1 были рассчитаны значения приливного вертикального деформационного фактора по формуле

$$\eta = \alpha \frac{dH(\alpha)}{dr} + 2h$$

Если учесть, что по материалам горизонтальных составляющих экстензометров для Тбилиси было получено $h = 0.536 \pm 0.016$ [3], то можно определить значение

$\alpha \frac{dH(\alpha)}{dr} = \eta - 2h$ для вертикальной составляющей. Исходя из вышесказанного в таблице 2 приводятся значения η и $\alpha \frac{dH(\alpha)}{dr}$ для девяти основных приливных волн.

Табл. 2

Значения $\eta = \alpha \frac{dH(\alpha)}{dr} + 2h$ и $\alpha h'$ для основных волн

волна фактор	K_2	S_2	M_2	N_2	K_1	S_1	P_1	M_1	O_1
$-\eta$	0.599 0.361	0.461 0.153	0.300 0.026	0.285 0.067	0.264 0.064	42.29 15.27	0.857 0.313	1.36 0.257	0.21 0.02
$-\alpha \frac{dH(\alpha)}{dr}$	1.671 0.393	1.533 0.185	1.372 0.058	1.357 0.099	1.336 0.096	43.40 15.30	1.929 0.345	2.4321 0.2890	1.28 0.059

Для пяти главных приливных волн (S_2 , M_2 , N_2 , K_1 , O_1) были получены следующие значения η и $\alpha \frac{dH(\alpha)}{dr}$:

$$\mu \text{ ср. взвешен.} = -0.262 \pm 0.034, \quad (P = \frac{1}{\varepsilon^2})$$

$$\eta \text{ ср. арифм} = -0.305 \pm 0.067,$$

$$\alpha \frac{dH(\alpha)}{dr} \text{ ср. взвешен.} = -1.342 \pm 0.073,$$

$$\alpha \frac{dH(\alpha)}{dr} \text{ ср. арифм.} = -1.377 \pm 0.099.$$

В связи с тем, что приливные деформации реальной Земли сопровождаются объемными изменениями вещества, то знание численного значения величин η , h и ℓ позволяют получить еще один параметр, характеризующий податливость Земли к внешним силам, т.н. четвертое число Лява, устанавливающее связь между кубической дилатацией $D(r)$ вещества Земли и потенциалом приливообразующей силы [5].

$$D(r) = F(r) \frac{W_2}{rg} = \left[\alpha \frac{dH(\alpha)}{dz} + 4h - 6\ell \right] \frac{W_2}{\alpha g} = [\eta + 2h - 6\ell] \frac{W_2}{\alpha g}$$

Для $r = \alpha$, $F(\alpha) = f$.

Если воспользоваться значениями чисел Лява и Шида $h = 0.536 \pm 0.016$ и $\ell = 0.079 \pm 0.0023$, полученными горизонтальными экстензометрами за длительный период наблюдений в Тбилиси [3], а также вышеприведенным значением μ ср. взвешен. = -0.262 ± 0.034 , то можем определить численные значения объемного сжатия $D(\alpha)$ и параметра f для Тбилиси:

$$f = 0.316 \pm 0.08, \quad D(\alpha) = 2.69 \cdot 10^{-8}.$$

Если выразить коэффициент Пуассона σ с помощью фактора η и чисел h и ℓ , то можем написать [6]:

$$\sigma = \eta / \eta + 6\ell - 2h.$$

Подставив в это соотношение вышеприведенные значения η , h и ℓ , получим: $\sigma = 0.305 \pm 0.034$.

Это вычисленное значение σ достаточно близко с осредненными его значениями для неразрушенных горных пород ($\sigma \cong 0.25$).

Основные результаты и выводы сводятся к следующему:

1. Средневзвешенные значения η и $\alpha \frac{dH(\alpha)}{dr}$ находятся в хорошем согласии с их теоретическими значениями.

2. Вычисленное значение коэффициента Пуассона σ достаточно близко с осредненным его значением для неразрушенных горных пород ($\sigma \cong 0.25$).

3. Наблюдаемые очень большие амплитуды волны S_1 , а также большие амплитуды волн K_2 , S_2 , P_1 и M_1 объясняются наличием термического эффекта в материалах наблюдений.

4. Значения факторов η , полученных по волнам M_2 , N_2 , K_1 и O_1 достаточно хорошо согласуются друг с другом.

Литერატურა

1. Ozawa I. Study on Elastic Strain of the Ground in Earth Tides. "Disaster Prevention Research Institute". Bull. N15, March, 1957.
2. Benioff H. A linear Strain Seismograph. "Bull. Seism. Soc. Amer". 25, 1935.
3. Балавадзе Б.К., Картвелишვილი К.З. Приливы в твердом теле Земли. Тбилиси, «Мецნიერება», 1984.
4. Картвелишვილი К.З. Исследования земных приливов по наблюдениям в Тбилиси. Тбилиси, «Мецნიერება», 1978.
5. Ozawa I. Disaster prevention research Institute. Kuyto Univ. bull. N46, 1961.
6. Melchior P. The Tides of the planet Earth. Pergamon Press, 1978.
7. Балавадзе Б.К., Картвелишვილი К.З., Урушадзе Р.М. Первые результаты наблюдений с вертикальным кварцевым экстензометром. Сообщ. АН ГССР, т. 129, №3, Тбилиси, 1988, с. 541-544.

თბილისში ვერტიკალური ექსტენზომეტრით მიღებული

მიმოქცევითი დეფორმაციების შედეგები

ქართველიშვილი კ., ქართველიშვილი გ.

რეზიუმე

წარმოდგენილია კვარცის ვერტიკალური ექსტენზომეტრით თბილისში წარმოებული დაკვირვებული მასალის ჰარმონიული ანალიზის შედეგები. განსაზღვრულია ცხრა ძირითადი მიმოქცევითი ტალღის ამპლიტუდა, გამოთვლილია ვერტიკალური მიმოქცევითი ფაქტორის η , გარემომცველი ქანების პუასონის კოეფიციენტის σ და ლიავას მეოთხე რიცხვის f -ის მნიშვნელობები.

RESULTS OF TIDAL DEFORMATIONS WITH A VERTICAL EXTENSOMETER IN TBILISI

Kartvelishvili K., Kartvelishvili G.

Abstract

A new vertical strain gauge is described. Harmonic analysis of Earth tides measured with the mentioned instrument has been performed.

Computation results of vertical strain factor η , 4th Love number σ of the local rocks are given.

ПРИЛИВНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ ТБИЛИССКОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО ЭКСТЕНЗОМЕТРА

Картвелишвили К.З., Картвелишвили Г. Д.

Реферат

Приведены результаты гармонического анализа для девяти приливных волн, зарегистрированных в Тбилиси вертикальным экстензометром. Определены амплитуды этих волн, вычислены величины т.н. вертикального приливного фактора η , коэффициента Пуассона σ и значения четвертого числа f Лява.