მიხეილ ნოდიას სახ. გეოფიზიკის ინსტიტუტის შრომები, ტ. LXVI, 2016
Transactions of Mikheil Nodia Institute of Geophysics, vol. LXVI, 2016
Труды Института геофизики им. Михаила Нодиа, т. LXVI, 2016

ИЗУЧЕНИЕ ПРИЛИВНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМЛИ В ТБИЛИСИ

Картвелишвили К.З., Картвелишвили Г. Д., Николайшвили М.М.

Институт геофизики им. Михаила Нодиа Тбилисского государственного университета им. И. Джавахишвили, 0160, Тбилиси, ул. М. Алексидзе, 1, E-mail: manananikola@gmail.com

Известно, что под действием приложенных сил твердые тела деформируются, т.е. меняют свою форму и объем. Теория упругости устанавливает количественную зависимость между силами, действующими на твердое тело и производящими ими деформациями. При этом предполагается, что при малых деформациях эта зависимость линейна, и она определяется законом Гука. Если после прекращения действия сил тело восстанавливает свою первоначальную форму, считается, что оно обладает абсолютной упругостью. При малых деформациях большинство твердых тел можно с достаточной степенью точности считать абсолютно упругими.

Любое тело, находящееся на поверхности Земли или внутри нее, испытывает суммарное воздействие земного притяжения и центробежной силы. Наряду с этим, на него воздействуют также периодически меняющиеся силы притяжения Луны и Солнца, которые складываясь с указанными выше силами, образуют переменной величины вектор силы тяжести.

Известно, что уровень поверхности воды в океанах и морях, также в шахтах и колодцах, не остается постоянным, а колеблется около среднего положения. Ньютон, открывший закон Всемирного тяготения, установил, что причиной этого являются Луна и Солнце, которые воздействуют на водные массы, приводя их в периодическое движение. Эти колебания уровня воды, возникающие под действием небесных тел, называются приливами и отливами или просто «приливами» в океане.

Человечество давно знакомо с проявлениями приливов на морском побережье. Но оказалось, что приливообразующие силы действуют не только на водные массы, они проявляются в каждое время и на каждом месте земного шара. Их изучение вызывает большой научный интерес и это объясняется тем, что приливы в твердом теле Земли - практически единственное явление планетарного масштаба, в отношении которого известна величина деформирующей силы. Зная величину этой силы, можно рассчитать соответствующие деформации на поверхности земного тела для различных моделей его внутреннего строения. Сравнивая наблюденные приливные деформации с вычисленными, можно выбрать наиболее реальную модель внутреннего строения Земли, которая одновременно должна находиться в согласии с данными сейсмологических и астрономических наблюдений.

Земля не является абсолютно твердым телом. Ее верхние слои, средняя плотность и другие физико-механические свойства, которые более или менее удовлетворительно известны, способны деформироваться. Земля окружена небесными телами, которые действуют на нее по закону Всемирного тяготения. Но заметное влияние испытывает она от сил притяжения Луны и Солнца, которые растягивают ее в направлении действия этих сил на величину, порядка до полуметра. Поскольку Луна и Солнце меняют по времени свое положение по отношению к данной точке наблюдения на земной поверхности, то и направление действия сил со стороны этих небесных тел также меняется, вызывая возмущения, называемые приливными деформациями. Кроме того, поскольку значительная часть поверхности Земли покрыта толстым слоем воды, который сравнительно легко поддается перемещениям, то это обстоятельство вызывает дополнительные возмущения поля силы тяжести.

Вследствие приливной деформации Земли, тело, находящееся на ее поверхности, изменяет свое положение по отношению к центру тяжести Земли. В результате этого меняется сила его притяжения Землей, что в свою очередь влияет на вес тела. Если бы Земля представляла собой абсолютно твердое тело, т.е. такое, которое не изменяет своей формы под действием внешней силы, то и сила тяжести в данном месте, вследствие неизменности формы Земли, осталась бы неизменной. Изменение веса тела, происходило бы за счет изменений положений Луны и Солнца относительно точки наблюдения. Но Земля - упругое тело и поэтому изменение силы тяжести будет зависеть как от изменений положений Луны и Солнца, так и от податливости Земли, т.е. от ее упругих свойств. Изучая эти упругие деформации, вызванные приливными изменениями силы тяжести, можно получить дополнительные сведения о внутреннем строении Земли.

Современные приливоизмерительные инструменты имеют такую чувствительность, что могут измерять на Земле лишь приливные возмущения Луны и Солнца, влияние же остальных небесных тел практически мало. Поэтому в теории приливов ограничиваются только рассмотрением влияния указанных небесных тел, которые из-за большой удаленности от Земли принимаются за точечные. Притяжения Луны и Солнца не всюду на Земле являются одинаковыми, что в конечном итоге и обуславливает происхождение приливов.

Вследствие приливной деформации Земли периодически изменяется вектор силы тяжести на поверхности деформируемой упругой Земли, а также происходят не только радиальные смещения, но и деформации, перпендикулярные радиусам Земли.

Сведения о земных приливах доставляют наблюдения за явлениями периодических изменений силы тяжести, наклонов земной поверхности, относительных перемещений точек в земном теле, которые обязаны своим происхождением приливообразующим силам.

Для изучения относительных перемещений точек в земной коре используют приборы-экстензометры, которые позволяют измерять перемещения точек на поверхности Земли как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях.

Приливообразующие силы Луны и Солнца вызывают в твердой Земле упругие деформации, причем основной вклад в них вносит вторая гармоника W_2 потенциала этих сил.

Приливообразующий потенциал W_2 небесного тела массой M представляется в виде:

$$W_2 = \frac{3}{2} g \frac{M}{E} \left(\frac{a^2}{c^3} \right) r^2 \left(\cos^2 z - \frac{1}{3} \right) \qquad (1)$$

где g – ускорение силы тяжести в пункте наблюдения на Земле, E – масса Земли, a – средний радиус Земли, r – расстояние от центра Земли до точки наблюдения, C – расстояние от центра Земли до небесного тела, z – зенитное расстояние небесного тела в точке наблюдения, косинус которого выражается так:

$$\cos z = \cos\varsigma \sin\delta + \sin\varsigma \cos\delta \cos(t + \varphi) \qquad (2)$$

Здесь ς – дополнение до широты, φ – восточная долгота точки наблюдения, δ – склонение небесного тела, t – гринвичское время. Подставляя (2) в (1) получим

$$W_2 = \frac{3}{4} g \left(\frac{M}{E} \right) \left(\frac{a^2}{c^3} \right) r^2 \left\{ 3 \left(\sin^2 \delta - \frac{1}{3} \right) \left(\cos^2 \varsigma - \frac{1}{3} \right) + \sin 2\delta \sin 2\varsigma \cos(t + \varphi) + \cos^2 \delta \sin^2 \varsigma \cos 2(t + \varphi) \right\}$$

(3)

Для вывода компонент деформации в радиальном U_r, меридиональном U_ς и широтном U_φ направлениях обратимся к соотношениям (Одзава, 1957):

$$U_r = \frac{2F(r) + G(r) r^2}{r} W_2 \; ;$$

$$U_\varsigma = \frac{F(r)}{r} \cdot \frac{\partial W_2}{\partial \varsigma} \; ; \qquad (4)$$

$$U_\varphi = \frac{F(r)}{2 \sin\varsigma} \cdot \frac{\partial W_2}{\partial \varphi} \; ;$$

где $F(r)$ и $G(r)$ есть функция только от r.

Для удобства будем пользоваться компонентами тензора деформации не в декартовых, а в сферических координатах (r, ς, φ), что позволит написать:

$$U_{rr} = \frac{\partial U_r}{\partial r};$$

$$U_{\varsigma\varsigma} = \frac{1}{r}\frac{\partial U_\varsigma}{\partial \varsigma} + \frac{U_r}{r}$$

$$U_{\varphi\varphi} = \frac{1}{r\sin\varsigma}\frac{\partial U_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{U_\varsigma}{r}ctg\varsigma + \frac{U_r}{r};$$

$$2U_{\varphi\varsigma} = \frac{1}{r}\left(\frac{\partial U_\varphi}{\partial \varsigma} - U_\varphi ctg\varsigma\right) + \frac{1}{r\sin\varsigma}\frac{\partial U_\varsigma}{\partial \varphi}; \qquad (5)$$

$$2U_{r\varsigma} = \frac{\partial U_\varsigma}{\partial r} - \frac{U_\varsigma}{r} + \frac{1}{r}\frac{\partial U_r}{\partial \varsigma};$$

$$2U_{\varphi r} = \frac{1}{r\sin\varsigma}\cdot\frac{\partial U_r}{\partial \varphi} + \frac{\partial U_\varphi}{\partial r} - \frac{U_r}{r}.$$

Теперь, используя (5), а также дифференциальное уравнение в частных производных

$$\frac{1}{\sin^2\varsigma}\cdot\frac{\partial^2 S_2}{\partial \varphi_2} + \frac{1}{\sin\varsigma}\cdot\frac{\partial}{\partial \varsigma}\left(\sin\varsigma\frac{\partial S_2}{\partial \varsigma}\right) + 6S_2 = 0. \qquad (6)$$

Обусловленные возмущающим потенциалом W_2 компоненты деформации можно получить в виде:

для деформации:

$$e_{rr} = \frac{1}{r^2}\left\{2r\frac{dF(r)}{dr} + 2F(r) + r^3\frac{\partial G(r)}{\partial r} + 3r^2G(r)\right\}W_2;$$

$$e_{\varphi\varphi} = \frac{1}{r^2}\left\{\frac{F(r)}{\sin^2\varsigma}\cdot\frac{\partial^2 W_2}{\partial \varphi^2} + F(r)ctg\varsigma\frac{\partial W_2}{\partial \varsigma} + \left[2F(r) + r^2G(r)\right]W_2\right\};$$

$$e_{\varsigma\varsigma} = \frac{1}{r^2}\left\{F(r)\frac{\partial^2 W_2}{\partial \varsigma^2} + \left[2F(r) + r^2G(r)\right]W_2\right\}; \qquad (7)$$

$$e_{r\varphi} = \frac{1}{r^2}\left\{r\frac{\partial F(r)}{\partial r} + r^2G(r) + 2F(r)\right\}\frac{\partial W_2}{\partial \varphi};$$

$$e_{r\varsigma} = \frac{1}{r^2}\left\{r\frac{\partial F(r)}{\partial r} + r^2G(r) + 2F(r)\right\}\frac{\partial W_2}{\partial \varsigma};$$

$$e_{\varsigma\varphi} = \frac{F(r)}{r^2\sin\varsigma}\left\{2\frac{\partial^2 W_2}{\partial\varsigma\partial\varphi} - ctg\varsigma\frac{\partial W_2}{\partial \varphi}\right\}.$$

для горизонтальных напряжений:

$$\Sigma = e_{\varsigma\varsigma} + e_{\varphi\varphi} = \frac{2}{r^2}\left[r^2G(r) - F(r)\right]W_2 \qquad (8)$$

для кубической дилатации

$$\Delta = \left\{\frac{2}{r}\cdot\frac{\partial F(r)}{\partial r} + r\frac{\partial G(r)}{\partial r} + 5G(r)\right\}W_2. \qquad (9)$$

Если рассматривать лишь полусуточные и суточные приливы на поверхности Земли ($r=a$), то приливообразующий потенциал примет вид:

для полусуточных волн

$$W_2\left(\frac{1}{2}\right) = a_2A_2\sin^2\varsigma\cos2(t_2+\varphi) \qquad (10)$$

и для суточных волн

$$W_2(1) = a^2 A_1 \sin 2\varsigma \cos(t_1 + \varphi) \qquad (11)$$

где t_1 и t_2 – часовые углы небесного тела в Гринвиче; A_1 и A_2 – факторы, включающие деклинацию небесного тела.

Для деформации получим следующие выражения:

для полусуточных приливов:

$$e_{rr} = A_2\left\{2F(a) + 2a\frac{dF(a)}{dr} + 3a^2G(a) + a^2\frac{dG(a)}{dr}\right\}\sin\varsigma\cos 2(t_2 + \varphi);$$

$$e_{\varsigma\varsigma} = A_2\{2F(a)(\cos 2\varsigma + \sin^2\varsigma) + a^2G(a)\sin^2\varsigma\}\cos 2(t_2 + \varphi);$$

$$e_{\varphi\varphi} = A_2\{-2F(a) + a^2G(a)\sin^2\varsigma\}\cos 2(t_2 + \varphi); \qquad (12)$$

$$e_{\varsigma\varphi} = A_2\{-6\cos\varsigma \cdot F(a)\}\sin 2(t_2 + \varphi);$$

$$e_{r\varphi} = e_{r\varsigma} = 0;$$

$$\Sigma = e_{\varsigma\varsigma} + e_{\varphi\varphi} = 2A_2(a^2G(a) - F(a))\sin^2\varsigma \cdot \cos 2(t_2 + \varphi);$$

$$e_{\varsigma\varsigma} - e_{\varphi\varphi} = 2A_2F(a)\cdot(\cos 2\varsigma + \sin^2\varsigma + 1)\cos 2(t_2 + \varphi);$$

$$\Delta = \left\{2a\frac{dF(a)}{dr} + a^2\frac{dG(a)}{dr} + 5a^2G(a)\right\}A_2\sin^2\varsigma\cos 2(t_2 + \varphi).$$

Для суточных приливов:

$$e_{rr} = A_1\left\{2F(a) + 2a\frac{dF(a)}{dr} + 3a^2G(a) + a^3\frac{dG(a)}{dr}\right\}\sin 2\varsigma\cos(t_1 + \varphi);$$

$$e_{\varsigma\varsigma} = A_1\{a^2G(a) - 2F(a)\}\sin\ 2\varsigma\cos(t_1 + \varphi);$$

$$e_{\varphi\varphi} = A_1\{a^2G(a)\}\sin\ 2\varsigma\cos(t_1 + \varphi); \qquad (13)$$

$$e_{\varsigma\varphi} = A_1F(a)\{4 - 2ctg\varsigma\}\sin(t_1 + \varphi);$$

$$e_{r\varsigma} = e_{r\varphi} = 0;$$

$$\Sigma = e_{\varsigma\varsigma} + e_{\varphi\varphi} = 2A_1[a^2G(a) - F(a)]\sin\ 2\varsigma \cdot \cos(t_1 + \varphi);$$

$$e_{\varsigma\varsigma} - e_{\varphi\varphi} = -2A_1F(a)\cdot\sin 2\varsigma\cos(t_1 + \varphi);$$

$$\Delta = \left\{2a\frac{dF(a)}{dr} + a^3\frac{dG(a)}{dr} + 5a^2G(a)\right\}A_1\sin\ 2\varsigma\cos(t_1 + \varphi).$$

Согласно (12) и (13) $e_{\varsigma\varphi}$ и $e_{\varsigma\varsigma}$- $e_{\varphi\varphi}$ зависят только от *F(a)*, а $e_{\varphi\varphi}$ по (13) есть функция от *G(r)*.

Обозначим

$$\frac{H(r)}{g(r)} = \frac{2F(r) + r^2G(r)}{r};$$

$$\frac{L(r)}{g(r)} = \frac{F(r)}{r}. \qquad (14)$$

Причем при $r=a$ $H(a)=h$ и $L(a)=l$

где g – невозмущенное значение силы тяжести на расстоянии r от центра Земли; h и l – здесь и ниже числа Лява и Сида.

Деформация ε_i в любом направлении дается нижеследующим выражением

$$\varepsilon_i = e_{rr}h^2 + e_{\varsigma\varsigma}l^2 + e_{\varphi\varphi}m^2 + e_{\varsigma\varphi}lm \qquad (15)$$

Где l, m, n направляющий косинусы i-го направления, которые берутся в направлении радиуса, меридиана и первого вертикаля соотвественно.

Из (15) можно получить выражение деформации для плоского случая

$$\varepsilon_i = e_{\varsigma\varsigma}l^2 + e_{\varphi\varphi}m^2 + \cos\varphi \cdot lm. \qquad (16)$$

После постановки обозначения (14) в (12) и (13) для поверхности Земли ($r=a$) компоненты деформации примут приведенный ниже вид:

Полусуточный прилив:

$$e_{\varsigma\varsigma} = \frac{h\sin^2\varsigma + 2l\cos 2\varsigma}{\sin^2\varsigma} \cdot \frac{W_2}{ag};$$

$$e_{\varphi\varphi} = \frac{h\sin^2\varsigma + 2l(1+\sin^2\varsigma)}{\sin^2\varsigma} \cdot \frac{W_2}{ag}; \qquad (17)$$

$$e_{\varsigma\varphi} = -4l\frac{\cos\varsigma}{\sin^2\varsigma} \cdot tg^2(t+\varphi)\frac{W_2}{ag};$$

$$e_{\varsigma\varsigma} + e_{\varphi\varphi} = 2(h-3l)\cdot\sin 2\varsigma\frac{W_2}{ag}; \qquad e_{\varsigma\varsigma} - e_{\varphi\varphi} = 2l(1+\cos^2\varsigma)\frac{W_2}{ag};$$

$$e_{rr} = \left\{a\frac{dH(a)}{dr} + 2h\right\}\frac{W_2}{ag};$$

$$e_{r\varsigma} = 0, \quad e_{r\varphi} = 0.$$

Суточные приливы:

$$e_{\varsigma\varsigma} = (h-4l)\cdot\frac{W_2}{ag};$$

$$e_{\varphi\phi} = (h-2l)\cdot\frac{W_2}{ag}; \qquad (18)$$

$$e_{\varsigma\varphi} = 4l\frac{\cos\varsigma}{\sin^2\varsigma} \cdot tg^2(t+\varphi)\frac{W_2}{ag};$$

$$e_{\varsigma\varsigma} + e_{\varphi\varphi} = 2(h-3l)\cdot\sin\varsigma\frac{W_2}{ag};$$

$$e_{\varsigma\varsigma} - e_{\varphi\varphi} = -2l\cdot\sin\varsigma\frac{W_2}{ag};$$

$$e_{rr} = \left\{a\frac{dH(a)}{dr} + 2h\right\}\frac{W_2}{ag};$$

$$e_{r\varsigma} = 0, \quad e_{r\varphi} = 0.$$

Долгопериодический прилив:

$$e_{\varsigma\varsigma} = \left\{h(\cos^2\varsigma - \frac{1}{3}) - 2l\cos\ 2\varsigma\right\}\cdot\frac{W_2}{ag};$$

$$e_{\varphi\varphi} = \left\{h(\cos^2\varsigma - \frac{1}{3}) - 2l\cos^2\varsigma\right\}\cdot\frac{W_2}{ag}; \qquad (19)$$

$$e_{\varsigma\varphi} = 0;$$

$$e_{\varsigma\varsigma} + e_{\varphi\varphi} = 2(h-3l)\cdot(\cos^2\varsigma - \frac{1}{3})\frac{W_2}{ag};$$

$$e_{\varsigma\varsigma} - e_{\varphi\varphi} = 2l\cdot\sin^2\varsigma\frac{W_2}{ag};$$

$$e_{rr} = \left\{a\frac{dH(a)}{dr} + 2h\right\}\frac{W_2}{ag};$$

$$e_{r\varsigma} = 0, \quad e_{r\varphi} = 0.$$

Для получения соотношения (17, 18, 19) можно воспользоваться приборами, которые называются экстензометрами или деформографами.

Этот тип прибора возбуждается относительным движением двух твердосцементированных с деформирующейся земной корой столбов. Изменение расстояния между обоими столбами измеряется тремя принципиально различными способами:

1. Удлинением одного столба с помощью жесткой штанги так, чтобы между концом и соседним столбом вставить элемент датчика. Такой экстензометр называется штанговым.
2. Соединением обоих столбов упругой проволокой с малым температурным коэффициентом. Изменение провеса проволоки и будет характеризовать относительные перемещения столбов. Такой тип экстензометра был впервые предложен японским геофизиком К.Сасса и носит его имя.
3. С помощью оптической интерференции, которая будет наблюдаться, если расположить источник света на одном из столбов, а луч света будет отражаться от второго столба и возвращаться к источнику. Если этот луч света сравним со световым лучом, который проходит постоянной длины оптический путь, то получится переменная интерференционная картина.

Экстензометры реагируют как на периодические деформации, так и на непериодические. Они принципиально отличаются от маятниковых инструментов. Так, в то время, как маятник непосредственно реагирует на сдвиги почвы относительно массы маятника, возбуждение экстензометра происходит благодаря разности фаз упругих волн на двух столбах, то есть посредством относительной скорости, с которой сейсмические колебания распространяются на граничной поверхности к наблюдаемому пространству. Тот факт, что экстензометр реагирует на непериодические процессы, позволяет применение инструмента для измерения длиннопериодных деформаций коры, которые по превышении границ твердости материалов ведут к неожиданным освобождениям накопленных напряжений и этим к землетрясениям, извержениям вулканов и т.д.

В противоположность маятникам, которые отличаются эффективно только в резонансной частоте, экстензометры могут записать общий спектр частот упругих волн. Следовательно, экстензометр особенно эффективен для регистрации долгопериодических движений почвы, при которых маятниковые инструменты перестают служить.

Научное значение экстензометра определяется прежде всего возможностью изучать упругие свойства и внутреннее строение Земли при помощи долгопериодических сейсмических волн, а также собственных колебаний Земли и земных приливов.

Необходимость наблюдений локальных и региональных малых движений земной коры для обеспечения рудничных разработок и слежения за ходом деформаций коры под крупными инженерными сооружениями, а также для прогноза землетрясений в сейсмически активных областях, которые могут проводиться экстензометрами обычно с недосягаемой точностью, также подчеркивает народнохозяйственное значение инструмента.

Экстензометр возбуждается благодаря разности фаз упругих волн, которая возникает вследствие их конечной скорости распространения в земной коре между обоими столбами. Теория экстензометра должна исследовать вопрос зависимости возбуждения от частоты этих волн и азимута их направления прибытия. Частотная зависимость обуславливается во-первых, резонансными свойствами соединяющих столбы элементов (штанга, проволока, луч света) и, во-вторых, - резонансными свойствами электрической регистрирующей части.

Экстензометр должен передавать относительные движения обоих столбов без искажения амплитуды и фазы. Это условие хорошо выполняется прежде всего у светового экстензометра, поскольку скорость света так велика, что можно практически принимать изменение движения обоих столбов как одновременное. Легко можно понять, что у проволочных экстензометров амплитудные и фазовые равенства движения столбов и движения в датчике выполняются только для очень долгопериодных процессов, потому что уже при относительно низких частотах происходит побуждение проволоки к собственным колебаниям.

В случае штанговых экстензометров, соединяющая штанга для всех частот не может рассматриваться как жесткая, поскольку на высоких частотах начинается явление резонанса;

поэтому штанговые экстензометры применяются для записи относительно длиннопериодных волн, а также медленных движений земной коры.

Случай распространения продольных волн в штанговом экстензометре с одним свободным концом, без внутреннего и внешнего затуханий, теоретически рассматривался Г.Беньоффом. В 1935г. он показал, что реакция экстензометра на продольные (Y_p) и (Y_s) поперечные волны можно выразить следующими соотношениями:

$$Y_p = -\frac{L}{C}\cos^2\alpha\frac{\partial\xi}{\partial t}; \qquad Y_s = -\frac{L}{C}\sin\alpha\cos\alpha\frac{\partial\xi}{\partial t}. \qquad (20)$$

Где L – длина штанги, C - скорость волны, α – угол между экстензометром и направлением распространения волны.

Заметим, что аналогичные соотношения для маятникового сейсмографа имеют вид:

$$Y_p = \cos\ \alpha\frac{\partial\xi}{\partial t}; \qquad Y_s = \sin\alpha\frac{\partial\xi}{\partial t}\ . \qquad (21)$$

Теория вертикального экстензометра

Допустим ξ есть вертикальное перемещение почвы в точке, горизонтальную координату которой в направлении, параллельном штанге, обозначим через x. Разность вертикальных перемещений в двух соседних точках почвы, координаты которых равны x и $x+dx$ будет $\frac{\partial\xi}{\partial x}dx$, и соответственно разность вертикальных превышений двух реперов на расстоянии L друг относительно друга определится как

$$Y = \int_0^L \frac{\partial\xi}{\partial x}dx \qquad (22)$$

Если сейсмические волны плоские и, если длина штанги L мала по сравнению с длиной сейсмической волны, то $\frac{\partial\xi}{\partial x}$ можно считать постоянной и уравнение (22) запишется как

$$Y = L\frac{\partial\xi}{\partial x} \qquad (23)$$

Ясно, что экстензометр будет чувствовать вертикальные компоненты приходящих поверхностных волн, которые будут генерированы обеими P и S-волнами, если r есть координата вдоль распространения поверхностных волн, α есть угол между r и L, можем написать:

$$\frac{\partial\xi}{\partial x} = \frac{\partial\xi}{\partial x}\cos\alpha\ ,$$

откуда

$$Y = L\cos\alpha\frac{\partial\xi}{\partial r}. \qquad (24)$$

Если выразить ξ как плоскую волну типа $\phi(t-\frac{r}{c})$, можем написать $\frac{\partial\xi}{\partial x} = -\frac{1}{c}\cdot\frac{\partial\xi}{\partial t}$,

тогда реакция вертикального экстензометра будет следующей

$$Y = -\frac{L}{c}\cos\alpha\frac{\partial\xi}{\partial t}\ . \qquad (25)$$

Следует заметить, что для такого типа экстензометра реакция зависит от азимута прихода волн.

Для наблюдения вековых, приливных, сейсмических деформаций поверхности Земли в подземной Тбилисской лаборатории земных приливов был установлен трехкомпонентный кварцевый штанговый экстензометр. Компонента N 66.5° E – база 42м, чувствительность

$0.22 \cdot 10^{-10}$ мм$^{-1}$; Компонента N 30° W – база 14.5 м чувствительность $0.7 \cdot 10^{-10}$ мм$^{-1}$; вертикальная компонента – база 6.45 м чувствительность (0.57-1.75) $\cdot 10^{-10}$ мм$^{-1}$.

Эта уникальная установка обеспечивала регистрацию деформационных процессов, вызванных тектоническими, приливными и сейсмическими силами.

Литература

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., Картвелишвилил К.З. Приливы в твердом теле Земли. Тбилиси, «Мецниереба», 1984.
4. Картвелишвили К.З. Исследования земных приливов по наблюдениям в Тбилиси. Тбилиси, «Мецниереба», 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.

დედამიწის მიმოქცევითი დეფორმაციების შესწავლა თბილისში

ქართველიშვილი კ., ქართველიშვილი გ., ნიკოლაიშვილი მ.

რეზიუმე

ნაშრომში მოყვანილია მიმოქცევის წარმომქმნელი W_2 პოტენციალით გამოწვეული წანაცვლებების ფორმულები რადიალურ, მერიდიანულ და პირველი ვერტიკალის მიმართულებით. კოორდინატთა პოლარულ სისტემაში ჩაწერილია ფორმულები დაძაბულობებისათვის და კუბური დილატაციისათვის.

A STUDY OF THE TIDAL DEFORMATION PROCESSES OF THE EARTH IN TBILISI

Kartvelishvili K., Kartvelishvili G., Nikolaishvili M.

Abstract

In the paper the components of radial, meridional and prime vertical displacements U_r, U_φ and U_ζ due to the tide generating potential W_2 are described. In polar coordinate r, ζ ,φ formulae are obtain: for the strains, for the horizontal areal strain and cubical dilatation.

ИЗУЧЕНИЕ ПРИЛИВНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМЛИ В ТБИЛИСИ

Картвелишвили К.З., Картвелишвили Г.Д., Николайшвили М.М.

Реферат

В работе приведены формулы смещения, вызванные потенциалом W_2 приливообразующих сил в радиальном, меридиальном наравлениях, а также в наравлении первого вертикаля. В полярной системе координат записаны соотношения для напряжений и кубической дилатации.