

*Н. ЛУМП*

## ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕННЫХ АТМОСФЕРНЫХ НАГРУЗОК НА РЕЗУЛЬТАТЫ НИВЕЛИРОВАНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Исследования современных движений земной коры внесли определенный вклад в развитие общих представлений о строении и развитии Земли. Однако для получения более фундаментальных результатов важную роль призван сыграть Международный исследовательский проект «Современные движения земной коры», предложенный советскими учеными и одобренный I Международным симпозиумом по данной теме, который состоялся в Лейпциге в 1962 г. В 1963 г. XIII Генеральная Ассамблея Международного геодезического и геофизического союза (МГГС), состоявшаяся в Беркли (США), утвердила проект и рекомендовала странам-участницам МГГС способствовать его осуществлению [1].

Наиболее ответственная задача, стоящая перед советскими специалистами, заключается в составлении сводной карты современных движений земной коры территории Европейской части СССР. Основой являются материалы повторного нивелирования, дополненные, где возможно, данными триангуляций и увязанные с имеющимися океанографическими наблюдениями. Кроме того, проблема современных движений земной коры требует привлечения других наук и не просто механического их применения, а активной разработки новых специальных методов исследований, органически сочетающихся с традиционными методами отдельных наук.

При изучении современных вертикальных движений земной коры материалы повторного нивелирования вдоль линий значительной протяженности, даже при малых систематических ошибках нивелирования, могут привести к заметным изменениям вычисляемых значений скоростей этих движений. Особенно опасными в этом отношении представляются систематические ошибки нивелирования, действующие в одном направлении.

В литературе высказывались мнения, что земная кора через известный промежуток времени испытывает закономерные пульсации (по В. Рихтеру [2] период пульсации равен 5 годам). В исследованиях В. Матцковой [3], Э. Индриксон и М. Ковалевского [4], Г. Желнина [5, 6] и других делается вывод, что современное движение земной коры имеет колебательный характер.

Несмотря на эти данные, все же до сих пор остается открытым вопрос о достоверности колебательных движений земной коры. К тому же нет общего мнения о причинах, вызывающих эти сравнительно короткого периода колебания. Поэтому возникают следующие вопросы:

1. Насколько правомерно считать современные движения земной коры в региональном масштабе обусловленными тектоническими явлениями, если известно, что амплитуда наклонов, вызванных изменением атмосферного давления [7-16], весьма значительна?

2. Может ли изменение скорости современных движений земной коры быть в региональном масштабе тектонически обусловленным?

3. Может ли тектонически обусловленное движение платформенных областей изменить за короткий отрезок времени направление движения на обратное?

4. Почему колебания земной поверхности являются наибольшими в направлении движения циклонов и антициклонов (над территорией Эстонии в направлении запад-восток)?

5. Могут ли нагрузки, вызванные изменением атмосферного давления, исказить значения скоростей движения земной коры, получаемые на основании данных повторного нивелирования?

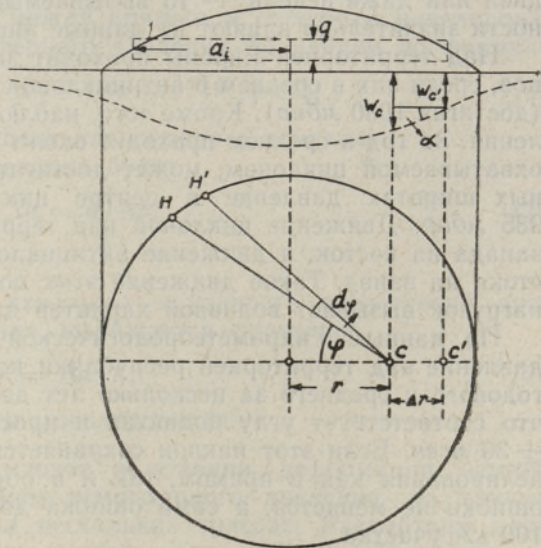
В данной работе автор пытается показать, что если колебательный характер движений земной коры существует, то он обусловлен не тектоническими причинами, а в основном — изменением внешних нагрузок.

В работе [17] дано следующее выражение величины прогиба плоской грани полупространства под действием равномерной нагрузки:

$$W_c = \frac{4(1-\mu^2)}{\pi E} q' \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{a^2 - r^2 \sin^2 \varphi} d\varphi = \frac{4(1-\mu^2)}{\pi E} q' a \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2 \sin^2 \varphi} d\varphi, \quad (1)$$

где  $a$  — радиус загруженного круга;  $\mu$  — коэффициент Пуассона;  $E$  — модуль Юнга;  $r$  — расстояние от центра круга;  $q'$  — вес нагрузки на единичную площадь.

Рис. 1. Схема к вычислению величины прогиба и угла наклона земной коры в случае неравномерной нагрузки.



В случае неравномерной нагрузки промежутки интегрирования делим на элементарные слои, в пределах которых элементарный слой рассматривается равномерно нагруженным (рис. 1). Тогда данный интеграл запишется так:

$$W_c = \frac{4(1-\mu^2)}{\pi E} q' \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sum_{i=0}^n a_i \sqrt{1 - \left(\frac{r_c}{a_i}\right)^2 \sin^2 \varphi} d\varphi. \quad (2)$$

Обозначая  $\int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - \left(\frac{r_c}{a_i}\right)^2 \sin^2 \varphi} d\varphi = K_i$ ,

запишем

$$W_c = \frac{4(1-\mu^2)}{\pi E} q' \sum_{i=0}^n a_i K_i. \quad (3)$$

Угол наклона поверхности земли можно найти по формуле

$$\alpha = \frac{\Delta h}{\Delta r},$$

где  $\Delta r$  — расстояние между точками  $c$  и  $c'$  по поверхности земли;  $\Delta h$  — прогиб между точками  $c$  и  $c'$  (см. рис. 1).

Так как

$$\begin{aligned} \Delta h = W_c - W_{c'} &= \frac{4(1-\mu^2)}{\pi E} q' \left[ \sum_{i=0}^n a_i K_i - \sum_{i=1}^n a_i K'_i \right] = \\ &= \frac{4(1-\mu^2)}{\pi E} q' \sum_{i=0}^n a_i \Delta K_i, \end{aligned} \quad (4)$$

то окончательно

$$\alpha = \frac{4(1-\mu^2)q'}{\pi E \Delta r} \sum_{i=0}^n a_i \Delta K_i. \quad (5)$$

Угол  $\alpha$  зависит, очевидно, от горизонтального градиента атмосферного давления, поэтому наклон может достигать в наших широтах значения 1,2 мсек/мбар.

Поскольку нерегулярные, метеорологические вариации амплитуды атмосферного давления протекают медленно — в течение нескольких дней или даже недель, — то вызываемые ими наклоны земной поверхности значительно влияют на данные нивелирования.

Над территорией Европы проходит за год в среднем 36 антициклонов, среди них в среднем 6 антициклонов с давлением больше 1050 мбар (достигая 1080 мбар). Кроме того, наблюдаются и области низкого давления. За год в среднем проходит около 75 циклонов. Диаметр области, охватываемой циклоном, может достигать 1000 км и более. В умеренных широтах давление в центре циклона уменьшается иногда до 935 мбар. Движение циклонов над территорией Европы направлено с запада на восток, а движение антициклонов — преимущественно с востока на запад. Такое движение этих положительных и отрицательных нагрузок вызывает волновой характер движения земной коры.

По данным Гидрометеорологической службы ЭССР атмосферное давление над территорией республики колеблется относительно среднегодового и среднего за несколько лет давления в пределах  $\pm 40$  мбар, что соответствует углу поднятия и прогиба земной коры в пределах  $\pm 30$  мсек. Если этот наклон сохраняется на участке во время его нивелирования как в прямом, так и в обратном направлениях, то знак ошибки не меняется, а сама ошибка достигает величины  $\pm 15$  мм на 100 км участка.

Так как переменные нагрузки, вызывающие прогибы и поднятия земной коры, движутся со скоростью антициклонов и циклонов, то ошибки разности превышений прямого и обратного нивелирования сохраняют свой знак и являются систематическими.

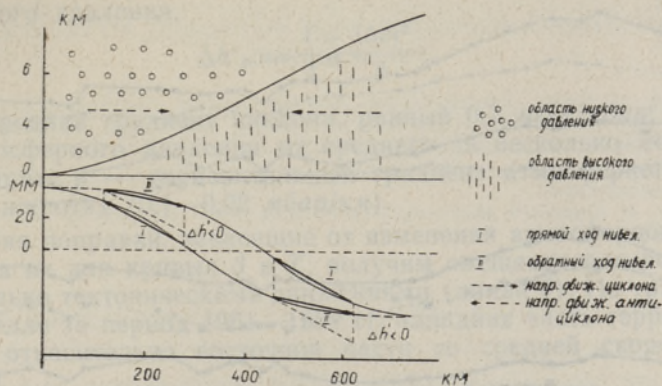


Рис. 2. Схема вертикального движения земной коры.

Перемещение наклонов вдоль трассы нивелирования значительно увеличивает ошибку. На рис. 2 представлена схема перемещения прогибов и поднятий земной коры в соответствии с перемещением воздушных масс. Если при нивелировании территории ЭССР в направлении восток-запад прямое нивелирование совпадает с направлением движения антициклона и, следовательно, противоположно движению циклона, то ошибка, возникающая вследствие перемещения наклонов, входит в разность превышений прямого и обратного нивелирования всегда с одним и тем же знаком.

Введем обозначения:

$v$  — скорость движения циклона или антициклона;  $v'$  и  $v''$  — скорость нивелирования соответственно в прямом и обратном направлении;  $t'$  и  $t''$  — время нивелирования соответственно в прямом и обратном направлении;  $t$  — время между прямым и обратным нивелированием. Тогда изменение атмосферного давления  $\Delta p$  найдем по формуле

$$\Delta p = \beta[(v + v')t' + (v - v'')t'' + vt], \quad (6)$$

где  $\beta$  — горизонтальный градиент атмосферного давления. Соответствующее изменение наклона будет

$$\Delta \alpha = \bar{\alpha} \cdot \Delta p, \quad (7)$$

где  $\bar{\alpha} = 0,7$  мсек/мбар [8].

Систематическая ошибка, входящая в разность превышений прямого и обратного нивелирования, выражается формулой

$$\Delta h' = \Delta \alpha \cdot L, \quad (8)$$

где  $L$  — длина участка трассы нивелирования.

Проверка теоретических выводов о влиянии деформации земной коры, обусловленной изменением атмосферного давления, на данные нивелирования проводилась на нескольких трассах. Рассмотрим одну из трасс нивелирования протяженностью около 100 км (Пыльтсамаа — Лелле), на которой наблюдались наибольшие отклонения. Первое нивелирование было проведено Институтом физики и астрономии АН ЭССР в 1961 г., повторное — в 1964 г. В течение первого нивелирования атмосферное давление менялось так: в трех случаях было выше среднего за

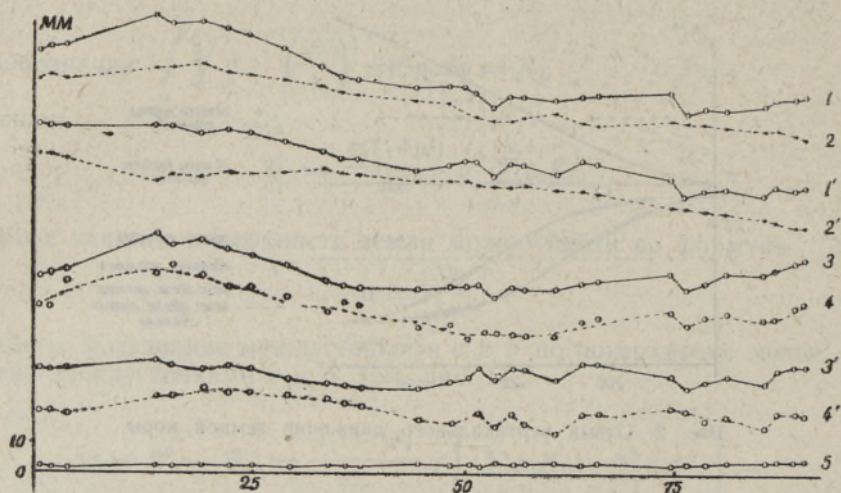


Рис. 3. Графики смещения реперов с учетом и без учета систематических ошибок, вызванных влиянием колебаний атмосферного давления.

несколько лет давления, в четырех случаях — ниже среднего. Изменение атмосферного давления имело период около 10 дней, амплитуда колебания достигала  $\pm 14$  мбар. Во время повторного нивелирования атмосферное давление было ниже среднего за несколько лет давления в течение 10 дней и выше среднего давления на протяжении 14 дней. Амплитуда колебания достигала  $\pm 15$  мбар.

На рис. 3 линии 2 и 2' дают разности превышений по данным прямого и обратного нивелирования 1961 и 1964 гг. Если данные нивелирования отягощены только случайными ошибками, то эти линии должны быть в основном горизонтальными, с отклонениями в одну и другую сторону. В нашем случае эти линии имеют ясно выраженный наклон. Так, например, если прямой и обратный ход нивелирования прокладывают одновременно, т. е. при одних и тех же атмосферных условиях, то на линиях 2 и 2' соответствующие отрезки идут горизонтально, т. е. наклон не меняется.

Кривая 3 изображает смещение реперов за промежуток времени с 1961 по 1964 гг. по данным прямого и 3' — по данным обратного нивелирования. Обе представляют сумму смещений, обусловленных как тектоническими причинами, так и изменением атмосферных нагрузок (прогибы и поднятия земной коры).

Чтобы получить смещения реперов 3 и 3' надо вычесть систематическую ошибку, которая изображена на кривых 2, 2', из значений смещения реперов 1 и 1' при прямом и обратном ходах нивелирования.

Кривые 4 и 4' представляют отклонения показаний атмосферного давления в период первого и повторного нивелирования от среднего за несколько лет давления. Из сравнения с кривыми 3 и 3' видно, что между ними существует явная корреляция. Если считать, что при увеличении отклонений атмосферного давления от среднего кора земли опускается, а при уменьшении — поднимается, то нетрудно выявить прогибы и поднятия, обусловленные изменением внешних нагрузок.

Считая, что при изменении атмосферного давления на 1 мбар, наклон земной коры меняется в среднем на 0,7 мсек и применяя формулы (2), можно ввести в данные нивелирования поправку (в мм), которая

зависит от атмосферного давления и от горизонтального градиента атмосферного давления,

$$\Delta h'_p = \frac{1}{3} \alpha \frac{(\Delta p)^2}{\beta}, \quad (9)$$

где  $\bar{\alpha}$  — средний градиент наклона, равный 0,7 мсек/мбар;  $\Delta p$  — разность атмосферного давления от среднего за несколько лет давления в миллибарах;  $\beta$  — горизонтальный градиент атмосферного давления в средних широтах (0,1—0,02 мбар/км).

Вычисляя поправки, зависящие от изменения атмосферного давления и учитывая их для кривых  $Z$  и  $Z'$ , получим смещения реперов, обусловленные только тектоническими движениями (линия 5). На трассе Пыльтсамаа—Лелле за период 1961—1964 гг. западная часть территории поднималась относительно восточной части со средней скоростью 0,7—0,8 мм/год.

Возникает вопрос: можно ли определить периодичность и амплитуду колебаний земной коры, обусловленных изменением нагрузок, которые вызывают изменения атмосферного давления? Природа колебаний метеорологических условий в региональном масштабе еще не выяснена, поэтому нельзя полностью определить и период колебаний земной коры.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. XIII Assemblée générale de l'Association Internationale de Géodesie, Resolutions, n°8, Bull. Géod., n°70 (1963).
2. Рихтер В. Г., Бюлл. МОИП, отд. геол., вып. 2 (1957).
3. Матцкова В. А., В сб.: Современные движения земной коры, № 2, Тарту, 1965.
4. Индриксон Э. К., Ковалевский М. И., В сб.: Современные движения земной коры, № 4, М., 1968.
5. Желнин Г. А., В сб.: Современные движения земной коры, № 2, Тарту, 1965.
6. Желнин Г. А., Вальнер Л. А., В сб.: Современные движения земной коры, № 3, М., 1968.
7. Simon D., Freiburger Forsch., IC, 194, 5 (1966).
8. Simon D., Marées terrest. Bull. inform. Assoc. internat. géod. Commiss. perman. marées terrest., n°40, 1481 (1965).
9. Леонтьев Г. И., В сб.: Современные движения земной коры, № 1, Изд. АН СССР, 1963.
10. Бончковский В. Ф., В сб.: Современные движения земной коры, № 1, Изд. АН СССР, 1963.
11. Бончковский В. Ф., Тр. сейсмолог. ин-та, № 99 (1940).
12. Witkowski J., Recherches sur les pendules doubles type Lettau faites à la station de latitude de l'Académie Polonaise des Sciences à Borowiec. Quatrième symp. Intern. sur les Marées Terrest. Bruxelles, 5—10 juin 1961, p. 186.
13. Tomaschek R., Freiburger Forsch. II, Nr. 60, 35 (1959).
14. Simon D., Marées terrest. Bull. inform. Assoc. internat. géod. Commiss. perman. marées terrest., n°44, 1720 (1966).
15. Lettau H., Gerlands Beitr. Geophys., 51, 250 (1937).
16. Simon D., Schneider M., Marées terrest. Bull. inform. Assoc. internat. géod. Commiss. perman. marées terrest., n°49, 2218 (1967).
17. Love A. E. H., A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity. Cambridge Univ. Press, 1927.

N. LUMP

### ATMOSFÄÄRIRÖHU MUUTUSTE MÕJU MAAKOORE NIVELLEERIMISE TULEMUSTELE

Käsitletakse maakoore deformatsiooni, mis on tingitud väliskoormuste erinevustest. Teoreetilisi tõestusi kontrolliti nivelleerimisel saadud andmetega. Korrelatsioon osutus heaks. Näidatakse, et positiivsete ja negatiivsete koormiste liikumine tekitab maakoore lainetaolisi nihkeid, kusjuures sellest olenevad vead on otse- ja vastassuunalisel nivelleerimisel samamärgilised.

Näidatakse, et maakoore ebakorrapäraseid võnkumisi põhjustavad peamiselt muutused atmosfäärirõhus.

N. LUMP

### THE EFFECT OF CHANGES IN ATMOSPHERIC PRESSURE ON THE LEVELLING RESULTS OF THE EARTH'S CRUST

Deformation of the earth's crust due to differences in external loads is discussed in the paper. The theoretical verification has been checked by the levelling data, and the correlation revealed is obvious. The author shows that the motion of positive and negative loads produces wave-like shifts in the earth's crust, and, as a consequence, the errors in direct and reciprocating levelling have identical signs.

It is shown that the irregular oscillation of the earth's crust is mainly caused by changes in atmospheric pressure.