

О. И. ЮРКЕВИЧ

КВАЗИСТАТИЧЕСКОЕ НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОСТОЧНОЙ ЕВРОПЫ ПО СОВРЕМЕННЫМ ВЕРТИКАЛЬНЫМ ДВИЖЕНИЯМ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Исследование природы современных движений земной коры привело к проблеме выяснения их происхождения и механизма действия. Для постановки прямой и решения обратной задачи оценки внутренних напряжений и перемещений, действующих в земной коре и литосфере, на границе литосферы и астеносферы или на нижней границе астеносферы исходными являются измеренные

на поверхности Земли вертикальные и горизонтальные перемещения.

Математические задачи сводятся к моделированию земной коры или литосферы плоскопараллельным пластом, покоящемся на полупространстве, или двумя пластами с разными механическими свойствами, моделирующими литосферу и астеносферу. Самая простая модель — упругий пласт, из реологических — вязкий; в двухслойных моделях в самом простом случае литосфера моделируется упругим пластом, а астеносфера вязким или принимаются два вязких пласта с разными коэффициентами вязкости. При выборе моделей исходим из предположения, что реологические свойства земной коры и астеносферы проявляются в вязких течениях с разной скоростью.

Цель математического моделирования — определение напряженного состояния земной коры под действием перемещений на нижней ее границе, влияния конвективных движений на перераспределение напряженного состояния земной коры и литосферы и проявления их в современных движениях поверхности Земли. Особый раздел занимают выяснения образования складок, движений отдельных блоков — клавишей, а также более общих вопросов геотектоники — образования рифтовых зон, отступление ледяного покрова [2, 3, 6, 8, 9].

Вследствие недостатка данных о горизонтальных перемещениях поверхности Земли определения численных значений напряжений базируются в основном на данных о ее современных вертикальных движениях. Горизонтальные перемещения являются основными при оценках горизонтальных компонент напряжений, действующих в земной коре и нижележащих слоях.

Все задачи решаются методами механики твердого деформируемого тела для плоского случая, исходя из того что протяженность пласта намного больше его толщины. В первом приближении, используя методы теории упругости, одновременно принимается, что перемещения малы и прямопропорциональны действующим напряжениям.

Граничные условия сводятся обычно к нулевым значениям напряжений на верхней границе пласта — поверхности Земли — и перемещениям, заданным на нижней границе по экспоненциальному закону. В результате решения теоретических задач оказывается возможным выяснить механизм и природу современных вертикальных движений земной коры, определить основные закономерности проявления и значения напряжений, действующих в земной коре, литосфере [1, 4, 7].

Как одна из задач на определение внутренних напряжений, действующих в земной коре, по современным вертикальным движениям поверхности Земли решена задача для плоскопараллельного пласта, моделирующего земную кору при граничных условиях [10]:

$$\begin{aligned}\sigma_y &= \tau_{xy} = 0, & y &= +h, \\ \sigma_y &= g(x), & y &= -h, \\ \tau_{xy} &= 0, & y &= -h,\end{aligned}$$

где σ_y , τ_{xy} — нормальная и горизонтальная компоненты тензора напряжений; h — полувывсота пласта; $g(x)$ — заданная функция на нижней границе пласта.

Задача решена методом интеграла Фурье. В результате решения получены зависимости, связывающие значения внутренних напряжений с наблюдаемыми на поверхности Земли перемещениями:

$$v = \frac{\sqrt{\pi} v_0}{2\pi k} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{\alpha^2}{4k^2}} Q_1(h, y) \cos x \alpha d\alpha, \quad (1)$$

$$Q_1(h, y) = \frac{\left[4\alpha^2 h(h-y) + \frac{\lambda+3\mu}{\lambda+\mu} \alpha(3h-y) + \frac{(\lambda+2\mu)^2 + \mu^2}{(\lambda+\mu)^2} \right] e^{\alpha(h+y)}}{1 + 16\alpha^2 h^2 + \frac{\lambda+3\mu}{\lambda+\mu} (e^{4\alpha h} + e^{-4\alpha h}) + \left(\frac{\lambda+3\mu}{\lambda+\mu} \right)^2} +$$

$$+ \frac{\left[-4\alpha^2 h(h-y) - \frac{\lambda+3\mu}{\lambda+\mu} \alpha(3h-y) + \frac{(\lambda+2\mu)^2 + \mu^2}{(\lambda+\mu)^2} \right] e^{-\alpha(h+y)}}{1 + 16\alpha^2 h^2 + \frac{\lambda+3\mu}{\lambda+\mu} (e^{4\alpha h} + e^{-4\alpha h}) + \left(\frac{\lambda+3\mu}{\lambda+\mu} \right)^2} +$$

$$+ \frac{\left[\alpha(h+y) + \frac{\lambda+3\mu}{\lambda+\mu} \right] e^{\alpha(3h-y)} + \left[-\alpha(h+y) + \frac{\lambda+3\mu}{\lambda+\mu} \right] e^{-\alpha(3h-y)}}{1 + 16\alpha^2 h^2 + \frac{\lambda+3\mu}{\lambda+\mu} (e^{4\alpha h} + e^{-4\alpha h}) + \left(\frac{\lambda+3\mu}{\lambda+\mu} \right)^2} \quad (2)$$

$$\sigma_y = \frac{\sqrt{\pi} v_0}{\pi k} \mu \int_{-\infty}^{+\infty} \alpha e^{-\frac{\alpha^2}{4k^2}} Q_2(h, y) \cos x \alpha d\alpha, \quad (3)$$

$$Q_2(h, y) = \frac{\left[4\alpha^2 (h-y) + \frac{\lambda+3\mu}{\lambda+\mu} \alpha(h-y) + 2\alpha h + \frac{\lambda+2\mu}{\lambda+\mu} \right] e^{\alpha(h+y)}}{1 + 16\alpha^2 h^2 + \frac{\lambda+3\mu}{\lambda+\mu} (e^{4\alpha h} + e^{-4\alpha h}) + \left(\frac{\lambda+3\mu}{\lambda+\mu} \right)^2} +$$

$$+ \frac{\left[4\alpha^2 h(h-y) + \frac{\lambda+3\mu}{\lambda+\mu} \alpha(h-y) + 2\alpha h - \frac{\lambda+2\mu}{\lambda+\mu} \right] e^{-\alpha(h+y)}}{1 + 16\alpha^2 h^2 + \frac{\lambda+3\mu}{\lambda+\mu} (e^{4\alpha h} + e^{-4\alpha h}) + \left(\frac{\lambda+3\mu}{\lambda+\mu} \right)^2} +$$

$$+ \frac{\left[-\alpha(h+y) - \frac{\lambda+2\mu}{\lambda+\mu} \right] e^{\alpha(3h-y)} + \left[-\alpha(h+y) + \frac{\lambda+2\mu}{\lambda+\mu} \right] e^{-\alpha(3h-y)}}{1 + 16\alpha^2 h^2 + \frac{\lambda+3\mu}{\lambda+\mu} (e^{4\alpha h} + e^{-4\alpha h}) + \left(\frac{\lambda+3\mu}{\lambda+\mu} \right)^2} \quad (4)$$

здесь v , u — вертикальные и горизонтальные перемещения в земной коре и на ее поверхности.

Геологические, геоморфологические, геофизические и геодезические методы наблюдений медленных движений поверхности Земли показывают, что амплитуда и протяженность движений одного знака взаимозависимы; обычно небольшие амплитуды поднятий соответствуют движениям одного знака больших территорий и наоборот, для больших амплитуд характерны относительно небольшие базисы. То же самое относится к временным характеристикам: для меньших базисов и больших амплитуд характерны большие скорости поднятий или опусканий.

Градиенты поднятий в орогенических областях на порядок выше, чем на платформах. Скорости современных вертикальных движений проявляются более отчетливо в орогенных областях и слабее на платформах. Наблюдения показали, что во многих случаях абсолютные значения вертикальных поднятий платформ и орогенических областей одного порядка, но градиенты обычно на платформах на один порядок ниже. Колебательные движения платформ более устойчивы, чем в орогенических областях, постоянная скорости движения выдерживается более длительное время.

Нередко платформы испытывают не поднятия, а опускания. Карты современных вертикальных движений показывают смену областей поднятий областями опусканий. Однообразный характер медленных движений для больших регионов — континентов свидетельствует об относительном равновесии состояний поднятий и опусканий. Колебательные движения характеризуются градиентами по расстоянию и перемещением в один год. Для градиента поднятий амплитуда сопоставляется с протяженностью участка, принимающего участие в движении. Естественно, что понятия поднятия и опускания связаны причинной зависимостью.

Каждая деформация, вызванная действием напряжений и внутренними причинами изменения хода наблюдаемых вертикальных поднятий, является результатом изменения напряженного состояния внутренних частей Земли. Сравнение движений платформ и складчатых областей указывает на общую закономерность колебательных движений в пространстве и времени. Из этого следует, что кинематический подход к изучению медленных движений поверхности Земли недостаточный; полную картину можно получить, учитывая все факторы, вызывающие поднятия: амплитуду, протяженность, градиент, время и внутренние напряжения. Кинематический подход к изучению и объяснению медленных движений поверхности Земли следует заменить более полным — динамическим, учитывающим напряжения их обуславливающие.

В 1973 г. Комиссией по современным движениям земной коры при Междугосударственном геодезическом и геофизическом союзе под редакцией Ю. А. Мещерякова была издана «Карта современных вертикальных движений земной коры Восточной Европы» [5]. На карте представлены регионы: от востока до Урала, немногим восточнее меридиана, проходящего вблизи Свердловска и Челябинска и до Каспийского моря; с северо-востока карта ограничена

государственной границей СССР; с запада она охватывает ПНР и ГДР, а с юго-запада карта ограничивается ЧССР и ВНР. Юг охватывает Карпаты, Крым и Кавказ. Отдельно представлена карта вертикальных движений Болгарии.

Таким образом, карта отображает вертикальные движения Русской платформы, Украинского щита, Западной низменности и трех горных сооружений Карпат, Крыма и Кавказа.

Северо-восточный участок европейской части СССР опускается так же, как и западная часть. Между ними вклинивается пояс самых больших поднятий от Эстонии, через Литву и Белоруссию. Центральная часть испытывает небольшое поднятие с центром на юге Украины. Отдельно выделяется зона достаточно больших поднятий к юго-востоку от Киева.

В пояснительной записке к «Карте современных вертикальных движений земной коры Восточной Европы» указано, что для построения карты использовались в основном геодезические данные повторного нивелирования за периоды от 10 до 60—70 лет. Все перемещения отнесены к одному году. На представленной территории самые большие поднятия испытывают зоны альпийской складчатости, которые, как известно, принадлежат к сейсмически активным зонам.

Максимальные вертикальные поднятия достигают +14 мм/год на Кавказе. В Крыму максимальные поднятия равны +3 мм/год, в Карпатах проведена изолиния +2 мм/год, максимальное значение поднятия отмечено +2,1 мм/год. Центральная часть щита испытывает поднятие от 0 до +4 мм/год, отдельные небольшие участки до +6 мм/год. В районе между городами Николаев и Киев отмечается постепенное поднятие до +8 мм/год. Северо-восток европейской части СССР опускается.

Данные о современных вертикальных движениях поверхности Земли дают возможность определить по формулам (1)—(4) напряжения, действующие в земной коре.

Мощность земной коры была принята: для платформы усредненное значение $2h=40$ км, для Карпат $2h=45$ км (в узкой полосе Предкарпатья мощность земной коры определяется в $2h=65$ км), в Закарпатье $2h=29-30$ км, для Крыма $2h=50$ км и для Кавказа $2h=60$ км.

Коэффициент затухания кривой спада вертикальных перемещений определяем по формуле

$$q(x) = ve^{-kx^2}$$

путем логарифмирования, исходя из точности нивелирных наблюдений $\Delta=10^{-2}$ см. Коэффициент k находим для каждого v (шаг изолиний на карте $\Delta v=0,2$ см/год) и расстояния спада вертикального перемещения до нуля $v=0$.

Определяемые напряжения максимальны в нулевой точке при $v=0$ в (3). Все вычисления приведены в таблице.

Из определения напряженного состояния платформы и орогенических областей Восточной Европы следует:

1. На платформах преобладают поднятия. Они вызывают растягивающие напряжения, которые в три раза больше, чем сжимающие напряжения, вызванные опусканиями. Таким образом, Русская платформа и Украинский кристаллический массив находятся в состоянии растяжения.

2. Состояние растяжения присуще всем трем горным системам европейской части Альпийской складчатости: в наиболее сильном

**Определение напряжений σ_y Восточной Европы
по современным вертикальным движениям земной коры**

Вертикальное перемещение v , см/год	Коэффициент затухания η , 1/см	Напряжение σ_y , дин/см ²
Платформа		
+0,3	$0,008722 \cdot 10^{-5}$	$+0,79 \cdot 10^8$
+0,6	0,008083	+0,62
+0,4	0,003201	+0,26
+0,2	0,006923	+0,22
Суммарное		$+1,89 \cdot 10^8$ дин/см ²
—0,2	$0,002164 \cdot 10^{-5}$	$-0,02 \cdot 10^8$
—0,4	0,003037	—0,28
—0,6	0,002891	—0,33
—0,8	0,001495	—0,01
Суммарное		$-0,64 \cdot 10^8$ дин/см ²
Общее суммарное		$+1,25 \cdot 10$ дин/см ²
Горные области		
+1,4	$0,018525 \cdot 10^{-5}$	$+1,78 \cdot 10^8$
+0,3	0,036936	+0,14
+0,21	0,017450	+0,72
Суммарное		$+2,64 \cdot 10^8$ дин/см ²

напряженном состоянии растяжения находится Кавказ, на втором месте Карпаты и в наиболее слабом напряженном состоянии растяжения находятся Крымские горы.

3. Суммарные напряжения растяжения горных систем почти в два раза превосходят растягивающие напряжения платформы.

4. Избыток действующих напряжений орогенических областей расходуется на сейсмичность: прямая зависимость между современными вертикальными движениями и определяемыми по ним напряжениями и сейсмичностью соблюдается на Кавказе. Несоответствие отмечается в Крыму и Карпатах. Из определений следует, что при более высоком вертикальном поднятии Крым находится в более слабом напряженном состоянии, чем это имеет место в Карпатах. Вертикальные поднятия находятся в соответствии с сейсмичностью. Так, при $v = +3,0$ мм/год в Крыму сейсмическая активность $A = 0,5$, а для Карпат при $v = +2,1$ мм/год $A = 0,07$. Как видим, соответствие также не пропорциональное. Достаточно высокое значение A для Крыма и относительно низкое значение поднятий, а вместе с тем значения напряжений можно объяснить тем обстоятельством, что очаги крымских землетрясений, определяющие вы-

сокую сейсмическую активность А, находятся в море, за пределами континента, для которого определялись направления по медленным движениям поверхности Земли.

5. Часть напряжений выше фоновых на платформе Восточной Европы, возможно, расходуется на сейсмичность [11], а часть должна релаксировать во времени.

6. Современные вертикальные движения земной коры являются индикаторами сейсмической опасности и могут быть использованы для прогноза землетрясений.

1. Артюшков Е. В. Геодинамика. М., 1979. 2. Ботт М. Внутреннее строение Земли. М., 1974. 3. Джеффрис Г. Земля. М., 1960. 4. Калашникова И. В., Каракин А. В., Магницкий В. А. О горизонтальных и вертикальных перемещениях литосферы // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1974. № 9. С. 3—10. 5. Карта современных вертикальных движений земной коры Восточной Европы / Под ред. Ю. А. Мещерякова. М., 1973. 6. Магницкий В. А. Внутреннее строение и физика Земли. М., 1965. 7. Магницкий В. А., Калашникова И. В., Сидоров В. А. Некоторые особенности современных вертикальных движений земной коры и проблемы их интерпретации // Современные движения земной коры. 1973. № 5. С. 571—578. 8. Рамберг Х. Моделирование деформаций земной коры. М., 1970. 9. Стейси Ф. Физика Земли. М., 1972. 10. Юркевич О. І. Повільні деформації поверхні Землі. К., 1963. 11. Юркевич О. Н. Зоны очагов сильных Закарпатских землетрясений // Сейсмическое районирование территории СССР. М., 1980. С. 99.