

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ПОДГОТОВКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО МЕДЛЕННЫМ ДВИЖЕНИЯМ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Известно, что медленные движения земной коры являются предвестниками сильных землетрясений. В литературе отмечено много случаев заметных деформаций перед сильными землетрясениями [3, 4, 7, 11, 12]. Эти явления происходят вследствие многих причин, но во всех случаях действует основной закон — зависимость деформаций и землетрясений от напряжений. Медленные движения поверхности Земли являются результатом деформаций земной коры вследствие нарастания внутренних напряжений, которые, достигнув критических значений, вызывают землетрясения.

Землетрясения — это дискретные проявления напряженного состояния земной коры или верхней мантии. Кора, литосфера, астеносфера и подстилающие ее части верхней мантии, где они генерируются, постоянно находятся в напряженном состоянии, обусловленном планетарными причинами: потенциал силы тяжести и вращение Земли вызывают напряжения порядка  $P = 10^7$  дин/см<sup>2</sup> (5). На поле планетарных напряжений накладываются напряжения регионального масштаба, обусловленные давлением рельефа и неровностями границы Мохоровичича [1]. Локальные поднятия поверхности Земли, проявляющиеся в вертикальных движениях коры, свидетельствуют о наличии повышенных напряжений на фоне постояннодействующих [14]. Это является основой зависимости между медленными движениями поверхности Земли и землетрясениями, которую используют для прогноза последних.

Определить время подготовки землетрясений или момент их возникновения — наиболее трудный вопрос в сейсмологии. На основе данных о прошлых землетрясениях строится график их повторяемости, представляющий среднюю статистическую зависимость между количеством землетрясений и их энергетическими классами (интенсивностью, магнитудой). Вместе с картой сейсмической активности такой график позволяет примерно определить продолжительность периода между землетрясениями данного класса [10]. Однако в области сильных землетрясений график отклоняется в сторону более слабых, что не дает возможности экстраполяции и оценки времени возникновения катастрофическо-

го стихийного бедствия. В связи с этим очень важным представляется определение продолжительности времени между землетрясениями иными методами.

Попытаемся на основании геодезических данных найти связь между вертикальными движениями земной коры и землетрясениями, вывести закономерности определения времени их подготовки по медленным движениям, сравнить полученные зависимости с результатами сейсмологических данных.

Возникновение сильного землетрясения обусловливается в основном такими причинами: значением и ростом напряжений, влиянием среды на длительность их накапливания. Основным параметром, влияющим на поведение тел, является время.

Землетрясения — быстропротекающие явления. Среда, в которой они происходят и где распространяются сейсмические волны, моделируется упругим телом. Законы теории упругости довольно точно отображают явления мгновенного разрыва среды и распространения объемных сейсмических волн. Однако при определении времени нарастания напряжения до критических значений, что равносильно определению времени подготовки землетрясений, среду необходимо моделировать таким физическим телом, в котором уравнение, его описывающее, учитывает фактор времени.

Из всех механических свойств вещества наиболее полно изучены его упругость и вязкость. В зависимости от длительности действия напряжений среда приобретает свойства «твердого» или «жидкого» вещества. Твердая среда — упругая, жидккая — вязкая. В природе наиболее часто встречаются комбинации основных свойств среды. Так, упруговязкая — это жидккая среда со свойствами твердости, ползучая — это твердая среда со свойствами жидкости. Основным фактором, характеризующим реологическую среду, является время релаксации напряжений, на протяжении которого они уменьшаются в  $e$  раз ( $e$  — основание натуральных логарифмов). Время определяется как отношение коэффициента вязкости в паузах к коэффициенту упругости в дин/см<sup>2</sup>.

$$\tau = \eta / \mu. \quad (1)$$

Упругие тела — консервативные системы. В них накапливается энергия, затраченная на деформацию. Она может выделиться при разгрузке. В упругом теле связь между компонентами напряженного состояния и компонентами деформаций в первом приближении устанавливается согласно закону Гука: деформация возникает непосредственно после приложения нагрузки и скорость распространения ее практически мгновенна. Модель Гука можно применять, когда в теле не появляются неупругие свойства, т. е. в короткие промежутки времени действия напряжений и при малых деформациях.

Вязкость — это мера сопротивления течению жидкости, величина, обратная текучести. Она равна отношению напряжения сдвига к его скорости. Размерность коэффициента вязкости  $\eta$  имеет размерность напряжения, умноженного на время.

Моделью, в которой объединяются упругие и вязкие свойства вещества, является модель Максвелла, описываемая уравнением упруговязкого тела [2]:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{\eta} \sigma, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  — деформация;  $\sigma$  — напряжение;  $\mu$  — коэффициент сдвига;  $\eta$  — коэффициент вязкости.

Запишем его решение:  $\sigma = \sigma_0 e^{-t/\tau}$ , (3)

где  $\sigma_0$  — напряжение в начальный момент времени.

Если  $\sigma$  приложено мгновенно при  $t=0$ , то непосредственно после загрузки тела вязкая деформация равна нулю, а суммарная описывается только как упругая. Если в последующие моменты времени деформация постоянна

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \varepsilon_0, \quad (4) \quad \text{то } \varepsilon_0 = \frac{1}{\mu} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{\eta} \sigma \quad (5) \quad \text{и } \varepsilon_0 \mu = \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\tau}. \quad (6)$$

До тех пор пока значение приложенного к телу напряжения ниже критического, среда остается жесткой. После достижения предела текучести наступает пластическое течение при постоянном напряжении. При напряжении меньше порога текучести происходит явление ползучести — квазивязкое течение с накапливанием деформаций во времени. Ползучесть — это нарастание деформации при постоянном напряжении, меньше границы текучести. Модель, описывающая явления ползучести, называется стандартным линейным телом.

Процесс ползучести начинается после достижения мгновенной деформации по закону Гука при начальном напряжении  $\sigma_0$ . Далее деформации увеличиваются, и процесс ползучести разделяется на два периода: замедленной ползучести и стационарной, с постоянной скоростью. Результирующая ползучесть будет равна сумме стационарной и остаточной. Если в стационарном участке снять значение упругого напряжения, тогда, благодаря релаксации напряжений, одновременно снимается остаточная деформация. Стационарная же деформация является необратимой.

Уравнение ползучести записывается так (8):

$$\frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{\tau_\varepsilon} = \mu \left( \frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{1}{\tau_\sigma} \varepsilon \right), \quad (7)$$

где, кроме упомянутых выше обозначений,  $\tau_\varepsilon$  — время релаксации при постоянной деформации;  $\tau_\sigma$  — время релаксации при постоянном напряжении.

В стандартном линейном теле неограниченно долго сохраняется некоторый уровень напряжений и они не могут быть больше значения, граничного для данной скорости и деформации. Напряжения уменьшаются не до нуля, а до некоторого граничного значения, которое определяется статическим модулем  $\mu_\infty$ :

$$\mu_\infty = \mu \frac{\tau_\varepsilon}{\tau_\sigma}. \quad (8)$$

Таким образом, исследование ползучести важно при явлениях длительной прочности. В стандартном линейном теле сохраняются остаточные напряжения, и происходит процесс упругой отдачи. Со временем напряжения достигают критических значений, и тело разрушается. При малых нагрузках явление ползучести постепенно затухает, при больших — ползучесть может развиваться до разрушения тела. В случае достаточно больших нагрузок вначале (период неустановившейся ползучести) скорость деформации постепенно уменьшается. Затем наступает второй период ползучести, когда скорость деформации становится равной некоторой постоянной величине.

Трудно построить одну общую модель, в которой в одинаковой мере были бы представлены все свойства реальных тел. Учет всех реологических свойств привел бы к такому сложному математическому аппарату, что было бы невозможно решить эту задачу.

Земная кора и литосфера обычно моделировались упругой средой, астеносфера — вязкой жидкостью. Это два крайних случая деформаций во внутренних частях Земли. Земная кора и литосфера обладают реологическими свойствами, а астеносфера — упругими. О реологических свойствах коры и литосферы свидетельствуют горообразовательные процессы: слой пониженных скоростей пропускает продольные и поперечные сейсмические волны, в нем генерируются землетрясения — следовательно, астеносфера обладает достаточно продолжительной прочностью. Таким образом, земная кора — это твердая среда со свойствами жидкости и ее лучше всего моделировать стандартным линейным телом:

1. Вес коры составляет примерно  $P = 10^9$  дин/см<sup>2</sup>, что соответствует критическим напряжениям, при которых возникают землетрясения. Однако эти напряжения земная кора выдерживает. Следовательно, она должна моделироваться телом, выдерживающим остаточные напряжения.

2. Земная кора выдерживает корни гор, которые не расплываются с течением времени, что свидетельствует об очень большом периоде релаксации напряжений.

3. В земной коре происходит 85% всех землетрясений. Значит, среда должна быть твердым телом.

4. В земной коре деформации не могут быть больше критических значений  $\epsilon = 10^{-4}$ .

5. Вследствие влияния рельефа и неровностей границы Мохоровичича в земной коре постоянно имеются напряжения. Поэтому среда не может характеризоваться только модулем упругости, но и модулем, учитывающим релаксацию напряжений.

6. Релаксация напряжений приводит к некоторому конечному значению.

Все эти признаки соответствуют характеристикам стандартного линейного тела.

Землетрясения происходят и в астеносфере — жидкой среде со свойствами жесткости. Это зона с пониженными значениями напряжений. Здесь значения скоростей распространения сейсмич-

ческих волн меньше по сравнению со скоростями распространения волн в земной коре, так как тут больше коэффициентов поглощения волн. В астеносфере происходят процессы перемещения веществ, которые приводят к установлению изостатического равновесия, наблюдается малое значение коэффициента вязкости. Таким образом, астеносфера лучше всего будет моделироваться упруговязким телом. Следовательно:

1. Астеносфера — это текучая среда с преобладающими свойствами жидкости.
2. В астеносфере деформация может быть бесконечной, поэтому там происходит меньше землетрясений.
3. Напряжения из-за релаксации могут падать до нуля.
4. При небольших напряжениях коэффициент вязкости не зависит от действующих напряжений.

Приведенные свойства позволяют осуществлять моделирование слоя астеносферы упруговязким телом.

Для определения времени подготовки землетрясений в земной коре и астеносфере используются данные повторного нивелирования современных вертикальных движений земной коры. Медленные движения ее являются исходными данными для определения методом математического моделирования значений внутренних напряжений, действующих в коре, литосфере и астеносфере [1, 14]. Только математическое моделирование дает возможность провести оценку напряжений на больших глубинах: непосредственные наблюдения возможны только до глубины в несколько километров. Измерения напряжений в природных условиях подтверждают значения, полученные из теоретических исследований величин напряжений.

Определим время подготовки землетрясений в стандартном линейном теле в случае постоянной скорости деформации

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \dot{\epsilon}_0 = \text{const.} \quad (9)$$

Подставив это уравнение в (7), получим

$$\frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\tau_\epsilon} = \mu \left( \dot{\epsilon}_0 + \frac{\epsilon}{\tau_\sigma} \right). \quad (10)$$

Решение однородного уравнения

$$\sigma = Ae^{-\frac{t}{\tau_\epsilon}} \quad (11)$$

и его производную подставим в исходное (10), определим постоянную  $A$

$$A = \mu \int e^{-\frac{t}{\tau_\epsilon}} \left( \dot{\epsilon}_0 + \frac{1}{\tau_\sigma} \epsilon \right) dt + c. \quad (12)$$

Уравнение (12) подставим в (11)

$$\sigma = Ce^{-\frac{t}{\tau_\epsilon}} + \epsilon_0 \mu \tau_\epsilon + \epsilon_0 \mu \frac{\tau_\epsilon}{\tau_\sigma} + \epsilon_0 t \mu \frac{\tau_\epsilon}{\tau_\sigma} - \epsilon_0 \mu \frac{\tau_\epsilon^2}{\tau_\sigma}. \quad (13)$$

Постоянную  $C$  определим из начальных условий  $t=0$ ,  $\sigma=\sigma_0$  и подставим в (13)

$$\begin{aligned}\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{t}{\tau_e}} + \varepsilon_0 \mu_\infty t + \varepsilon_0 \mu_\infty (1 - e^{-\frac{t}{\tau_e}}) + \\ + \varepsilon_0 \mu \tau_e (1 - e^{-\frac{t}{\tau_e}}) - \varepsilon_0 \mu \frac{\tau_e^2}{\tau_s} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_e}}).\end{aligned}\quad (14)$$

Преследуя цель исследовать спад напряжений, пренебрегая членами с  $\sigma_0$  и  $\varepsilon_0$ , учитывая (8),  $\varepsilon=\varepsilon_0 \Delta t$  и  $\Delta t=\tau_0-\tau_e$  перепишем (14)

$$\sigma = \varepsilon_0 \mu_\infty t + \varepsilon \mu_\infty (1 - e^{-\frac{t}{\tau_e}}). \quad (15)$$

Первый член правой части (15) меньше второго, что дает право им пренебречь. Тогда

$$\sigma = \varepsilon \mu_\infty (1 - e^{-\frac{t}{\tau_e}}). \quad (16)$$

Выделим член с  $t$

$$e^{-\frac{t}{\tau_e}} = 1 - \frac{\sigma}{\mu_\infty \varepsilon}. \quad (17)$$

Логарифмируя

$$-\frac{t}{\tau_e} = \ln \left( 1 - \frac{\sigma}{\mu_\infty \varepsilon} \right)$$

и после разложения логарифма в ряд

$$-\frac{t}{\tau_e} = -\frac{\delta}{\mu_\infty \varepsilon},$$

получим формулу для определения времени подготовки землетрясений в ползучей среде:

$$t = \frac{\sigma \tau_e}{\mu_\infty \varepsilon}. \quad (18)$$

Для упруго-вязкой среды формула определения времени подготовки землетрясений получена для случая, когда деформация происходит с постоянной скоростью (7). Определив из (6) выражение для момента

$$\sigma = \mu \varepsilon_0 \tau (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}). \quad (19)$$

путем логарифмирования и разложения в ряд

$$t = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \mu}. \quad (20)$$

В (20), определяющей время подготовки землетрясений в упруговязкой среде, участвует только коэффициент сдвига земной коры, характеризующий упругую часть деформации. Известно, что

тело Максвелла в промежутке времени меньше времени релаксации напряжений будет вести себя как упругое тело, и релаксационные свойства обнаруживаются после достижения времени  $t$ . В (18), определяющей время подготовки землетрясений в ползучей среде от начала процесса участвуют параметры, характеризующие реологические свойства среды: время релаксации напряжений при постоянной деформации и статический модуль сдвига.

Определим численные значения времени подготовки землетрясений в ползучей и упруго-вязкой средах. Согласно графику повторяемости сильных землетрясений по макросейсмическим данным в Закарпатье время повторения семибалльных землетрясений оценивается в  $t=33$  года [6, 13]. Они являются самыми сильными в этом районе. За неимением данных о критических деформациях, измеренных в период подготовки семибалльного землетрясения, обратимся к данным по Пьенинскому глубинному разлому. Он начинается в районе Вены, пересекает все Закарпатье вдоль Карпатского горного хребта и заканчивается в Сигет-Тячево-Тересвенской сеймоактивной зоне на границе Украинской ССР и Социалистической Республики Румыния. Здесь происходят наиболее сильные землетрясения Закарпатья.

В 1590 г. в районе Санкт-Пельтен на Пьенинском разломе произошло землетрясение интенсивностью 1–8 баллов и с той же интенсивностью повторилось в 1972 г., через 382 года. Измененные деформации на разломах, сопровождающие процесс подготовки землетрясений, достигают критических скоростей  $\varepsilon=0,5 \times 10^{-13}$  1/с. Деформация определяется как произведение  $\varepsilon=\varepsilon\Delta t$ , где  $\Delta t$  — разность времени релаксации напряжений при постоянном напряжении  $\tau_0=8 \cdot 10^3$  лет и времени релаксации напряжений при постоянной деформации  $\tau_\varepsilon=2 \cdot 10^3$  лет и  $\Delta t=6 \cdot 10^3$  лет, или  $\Delta t=18 \cdot 10^{10}$  с. Таким образом,  $\varepsilon=9 \cdot 10^{-3}$  (8). Напряжение в очаге восьмибалльного землетрясения оценивается в  $\sigma=8,6 \cdot 10^7$  дин/см<sup>2</sup> (14). Статический модуль сдвига  $\mu_\infty=0,2$   $\mu=6 \cdot 10^{10}$  дин/см<sup>2</sup>, где  $\mu=3 \cdot 10^{11}$  дин/см<sup>2</sup> [8]. Подставив все значения в формулу (18), получим  $t=318$  лет, что можно считать достаточно хорошим совпадением с фактическим временем повторения землетрясения такой же интенсивности.

В упруго-вязкой среде при том же критическом напряжении в очаге землетрясения, скорости деформации в астеносфере  $\varepsilon=0,2 \cdot 10^{-13}$  1/с время подготовки землетрясения по формуле (20) составляет  $t=477$  лет. Подготовка сильного землетрясения в астеносфере, как и следовало ожидать, требует большего времени для достижения критических напряжений. Оценка времени зависит от скорости деформации в астеносфере, значение которой нельзя считать окончательным.

Достаточно хорошее совпадение времени подготовки сильных землетрясений для земной коры, моделируемой стандартным линейным телом, подтверждает правильность выбора модели и то, что преобладающими процессами в земной коре следует считать явления ползучести.

- Список литературы:** 1. Артюшков Е. В. Геодинамика. — М.: Наука, 1979.  
2. Белаев Н. М. Сопротивление материалов. — М.: ФМЛ, 1962. 3. Бончковский В. Ф. Труды Сейсмического ин-та. — М.; Л.: АН СССР, 1940, № 99.  
4. Бончковский В. Ф. Докл. на Всесоюзной конференции по прогнозу землетрясений. — М.: АН СССР, 1954. 5. Джессфрис Г. Земля. — М.: ИЛ, 1960.  
6. Евсеев Е. А., Сигалова Р. М. Западная Украина. — В кн.: Сейсмическое районирование СССР. М., 1968. 7. Магницкий В. А. Основы физики Земли. — М.: Геодезиздат, 1953. 8. Магницкий В. А. Внутреннее строение и физика Земли. — М.: Недра, 1965. 9. Реология / Под ред. Ю. Эйриха. — М.: ИЛ, 1962.  
10. Ризниченко Ю. В. О возможностях расчета максимальных землетрясений / Тр. ИФЗ АН СССР, 1962. 11. Саваренский Е. Ф., Кирнос Д. П. Элементы сейсмологии и сейсмометрии. — М.: ГИТТЛ, 1955. 12. Семенов П. Г. К вопросу о наклонах земной поверхности как предвестниках землетрясений. — Сталинабад, 1949. 13. Юркевич О. И. О расчете возможных максимальных землетрясений в Закарпатье. — В кн.: Тр. XI Генеральной ассамблеи ЕСК. Л., 1970.  
14. Юркевич О. И. Современные вертикальные движения земной коры и сейсмичность Закарпатья. — Геофизический журнал, 1980, т. 2, № 5.

Статья поступила в редакцию 03.05.82