

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭПИЦЕНТРА СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ КАК ИСТОЧНИКА ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ АТМОСФЕРЫ

Проблема прогноза землетрясения: определение места, силы и времени землетрясения, задача безусловно, актуальная, имеющая большое прикладное значение. Согласно современным данным землетрясения занимают четвертое место в ряду природных катастроф по величине ущерба и третье место по количеству смертных случаев (16% общего числа погибших) [1]. Более 30% территории Казахстана является сейсмически активной. На ней проживает около 6 млн. человек, сосредоточено свыше 40% промышленного потенциала, расположено большое количество городов и населенных пунктов, в том числе – крупнейший промышленный и культурный центр – г. Алматы. Поэтому задача обеспечения безопасности населения от сейсмических катастроф отнесена Правительством Республики Казахстан к проблемам национальной безопасности. Созданию методики прогнозирования землетрясений в республике уделяется большое внимание [2].

В прогнозировании землетрясений принята следующая классификация: сверхдолгосрочный (более 10 лет), долгосрочный (от 1 года до 10 лет), среднесрочный (от 1 месяца до 1 года) прогнозы, результатом которых является создание соответствующих карт прогноза землетрясений, и краткосрочный прогноз (дни-часы), результатом которого является заключение о месте, силе и времени сейсмического события. Краткосрочными предвестниками являются: уровень, состав и физические свойства подземных вод, состояние геомагнитного поля, эманации радона, углекислого газа и нейтронов. В последнее время в качестве краткосрочных предвестников рассматриваются атмосферные и ионосферные события.

На сегодняшний день не существует общепринятой физической модели таких возмущений в ионосфере перед землетрясениями. Разрабатываемые модели можно отнести к двум основным классам: так называемая “электромагнитная атмосферно-ионосферная” модель, фокусирующая внимание на связи в системе литосфера-атмос-

фера-ионосфера по электромагнитному каналу, и “акустико-гравитационная” модель, согласно которой в области подготовки землетрясений вблизи поверхности Земли генерируются атмосферные акустико-гравитационные волны (АГВ), распространяющиеся через атмосферу и приводящие к возмущениям ионосферы. Сравнение этих двух подходов приводит к выводу, что в силу ряда причин, например, нехватки достаточного количества носителей тока в нейтральной атмосфере, последняя модель наиболее адекватна реальным процессам, протекающим во время землетрясений в системе литосфера-атмосфера-ионосфера.

Работа имеет целью изучение механизмов волновых возмущений атмосферы, вызванных антропогенными (взрывы подземные и наземные) и естественными (землетрясения) причинами и определение интервала частот, в котором могут генерироваться эти возмущения. Предполагается в дальнейшем создание на этой основе краткосрочных атмосферных и ионосферных предвестников землетрясений.

Таблица 1. Параметры в очагах землетрясений

Землетрясения	Беловодское	Верненское	Чиликское	Кеминское	Кемино-Чуйское	Чаткальское
Дата	02.07 1885	08.06 1887	11.07 1889	03.01 1911	20.07 1938	02.11 1946
Время (по Гринвичу)	21.20	23.35	22.14	23.25.38	33.50.36	18.28.30
Координаты						
φ	42.42	43.06	43.1 2	42.54	42.42	41.54
λ	74.06	76.48	78.42	76.54	75.48	72.00
Глубина (км)	15	20	40	25	21	30
Магнитуда (MLH)	6.9	7.3	8.3	8.2	6.9	7.5

Землетрясения	Пржевальское	Жаланаш-Тюпское	Новогоднее	Байсорунское	Сусамырское
Дата	05.06 1970	24.03 1978	31.12 1988	12.11 1990	19.08 1992
Время (по Гринвичу)	04.53.05	21.05.49	19.46.47	12.28.52	02.04.35
Координаты					
φ	42.31	42.52	42.52	42.57	42.12
λ	78.44	78.35	77.22	77.56	73.30
Глубина (км)	15	20	15	15-20	29
Магнитуда (MLH)	6.8	6.7	5.6	6.2	7.3

Моделирование очага землетрясения

Землетрясение представляет собой сложное переплетение физических явлений и взаимодействие большого количества разнородных факторов. Построить какую-то общую теоретическую картину землетрясения не представляется возможным. Нас интересует процесс возмущения атмосферы, сопутствующий землетрясению. Из множества факторов выберем те, которые необходимы для построения модели очага, а затем и эпицентра землетрясения с тем, чтобы эту модель можно было принять в качестве источника волновых возмущений атмосферы. Обратимся к таблице 1, приведенной в монографии [2].

В таблице приведены некоторые характеристики наиболее разрушительных землетрясений Северо-Тянь-Шаньского региона. Значения магнитуд приведены по локальной магнитудной шкале. Из таблицы видно, что глубина очага варьируется от 15 до 40 км, хотя, вообще, известны землетрясения, очаги которых лежат в мантии на глубинах до 400 км. Для нашей модели выберем глубину очага, равной $H = 20$ км.

Землетрясение представляет собой быстрый переход потенциальной энергии, накопленной в

упруго-деформированных подземных породах, в кинетическую энергию колебаний этих пород и энергию остаточной деформации пород в очаге землетрясения. Структура самого очага в каждом землетрясении имеет свои особенности. Приведем описания очагов в двух известных землетрясениях. В Верненском землятресении 1887 г. горизонтальная протяженность очага составляла 35 км. Очаг имел значительную вертикальную протяженность (около 35 км.), и его верхняя часть, предполагается, вышла на земную поверхность [<http://www.kndc.kz/rus/earthquakes/verny.doc>]. При этом глубина залегания очага оценивается в 20 км. (см. табл. 1). В Ашхабадском землетрясении 1948 г. очаг имел исключительно сложную структуру, тем не менее горизонтальные размеры очага оцениваются $\approx 80 \times 40$ км. Глубина очага оценивается в 22 ± 8 км. [http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/ochag.htm].

Из приведенных экспериментальных данных можно сделать заключение, что линейные размеры очага сравнимы с глубиной залегания очага. Будем считать, что модель очага представляет собой сферу радиуса H , центр которой расположено

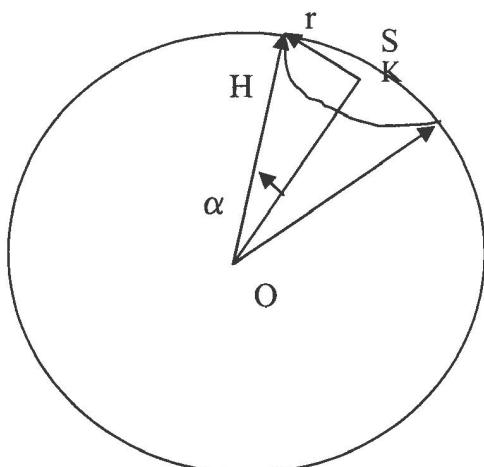


Рис. 1. Модель очага землетрясения

жен на глубине H , т.е. эта сфера касается поверхности Земли в точке K (см. рис.1).

Энергия W , выделяемая в очаге землетрясения определяется магнитудой M по следующей формуле [2]:

$$\lg W(\text{Дж}) = 1,05M + 9,69. \quad (1)$$

Минимальная магнитуда землетрясений из табл. 1 равна $M = 5,6$, а максимальная $M = 8,3$. Отсюда энергия, выделившаяся в очаге этих землетрясений, лежит в интервале:

$$W = 10^{15,57} - 10^{18,41} \text{ Дж.}$$

Моделирование эпицентра землетрясения

Будем считать эпицентром землетрясений некоторый сегмент площадью S на сферической поверхности очага с центром в точке касания K (см. рис. 1). Определим долю энергии землетрясения, выносимую на этот шаровой сегмент. Полагаем, что энергия, выделившаяся в шаровом очаге, распространяется далее изотропно относительно центра шара O . Пусть угол $\alpha = 5^\circ$, тогда эта доля энергии равна:

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{W_S}{W} = \frac{\pi r^2}{4\pi H^2} = \frac{\pi H^2 \sin^2 \alpha}{4\pi H^2} = \\ &= \frac{\sin^2 \alpha}{4} = 0,0019 \approx 2 \cdot 10^{-3}, \end{aligned} \quad (2)$$

и энергия, выделившаяся в эпицентре рассматриваемых землетрясений, составляет:

$$W_s = 0,5 \cdot 10^{12,57} - 0,5 \cdot 10^{15,41} \text{ Дж.} \quad (3)$$

Произвольным параметром модели является угол α . Слишком малое его значение оставит

за пределами рассмотрения некоторое количество энергии, выносимой на поверхность земли, в то время, как слишком большое его значение введет в рассмотрение ту долю энергии, которая не доходит непосредственно до поверхности земли и освобождается в породах под землей. Остановимся на разумном значении $\alpha = 5^\circ$.

Известно, что система гидродинамических уравнений, описывающая газ (в нашем случае – атмосферу),

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho (\vec{v} \nabla \vec{v}) &= -\nabla p + \rho \vec{g}, \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla (\rho \vec{v}) &= 0, \\ \frac{\partial s}{\partial t} + \vec{v} \nabla s &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

при быстром выделении большого количества энергии в малой области пространства допускает автомодельное решение [3-4]:

$$R(t) = \xi_0 \left(\frac{W}{\rho_0} \right)^{\frac{1}{5}} \cdot t^{\frac{2}{5}}, \quad (5)$$

$$D(t) = \frac{dR}{dt} = \frac{2}{5} \xi_0 \left(\frac{W}{\rho_0} \right)^{\frac{1}{5}} \cdot t^{-\frac{3}{5}}, \quad (6)$$

$$P_1(t) = \frac{2}{\gamma+1} \rho_0 D^2 = \frac{2}{\gamma+1} \rho_0 \left[\frac{2}{5} \xi_0 \left(\frac{W}{\rho_0} \right)^{\frac{1}{5}} \right]^2 \cdot t^{-\frac{6}{5}}. \quad (7)$$

Здесь уравнение (5) описывает движение фронта ударной волны, уравнение (6) – скорость её распространения, уравнение (7) – изменение давления на фронте ударной волны.

Ударная волна распространяется относительно среды со сверхзвуковой скоростью до тех пор, пока давление на её фронте не упадет до значения давления невозмущенной среды. Скорость ударной волны при этом уменьшается до скорости звука в данной точке среды, и ударная волна вырождается в обычную звуковую волну. Фронт ударной волны при определённых условиях может быть неустойчивым относительно различных возмущений, в том числе относительно акустико-гравитационных волн (АГВ). Именно эта возможность будет интересовать нас в дальнейшем исследовании.

Эпицентр землетрясения, представляющий собой сферический сегмент площади S , преоб-

разум для простоты в равновеликий квадрат. Сторона этого квадрата имеет величину:

$$l = \sqrt{\pi r^2} = 3083 \text{ м} \approx 3,1 \cdot 10^3 \text{ м}. \quad (8)$$

Чтобы иметь возможность воспользоваться решениями для ударной волны (5), (6), (7) применительно к нашей сейсмической задаче с выделением достаточно большого количества энергии, но не в точке, а на площади квадрата со стороной l (8), заменим наш источник с энергией W_s (3) сотней источников с энергией каждого в сто раз меньшей:

$$W_{100} = \frac{W_s}{100} = 0,5 \cdot 10^{10,57} - 0,5 \cdot 10^{13,41} \text{ Дж}. \quad (9)$$

В этом случае с точки зрения размеров земного шара и толщины атмосферы каждый из ста источников можно считать точечным источником, генерирующим сферическую ударную волну в атмосфере.

Численные расчеты решений для ударных волн (5), (6), (7), выполненные в пакете MATHCAD свидетельствуют, что автомодельные решения существуют для всего интервала энергий (9). Для значения энергии источника $W_{100} = 0,5 \cdot 10^{10,57}$ Дж радиус распространения ударной волны, определяемый выражением (5), составляет приблизительно $R \approx 33$ м, в этой точке давление на фронте (6) P , уменьшается до значения атмосферного давления P_0 и ударная волна прекращает своё существование. Для энергии источника $W_{100} = 0,5 \cdot 10^{13,41}$ Дж радиус распространения ударной волны составляет $R \approx 295$ м. Расчеты были проведены при следующих значениях параметров:

$$\rho_0 = 1,29 \text{ кг/м}^3, \quad P_0 = 1 \text{ атм} = 10^5 \text{ Па}, \quad \xi_0 = 0,93, \\ \gamma = 1,23.$$

Вся сотня условных мгновенных источников действует синхронно, поэтому фронт результирующей волны, являясь огибающей всех ста фронтов, представляет собой плоскость, параллельную поверхности земли.

Итак, модель эпицентра землетрясения представляет собой квадрат со стороной l (8), на поверхности которого расположены сто мгновенных точечных источников, см. рис. 2. Ось x направлена вдоль поверхности земли, а ось z перпендикулярна к поверхности и направлена вверх.

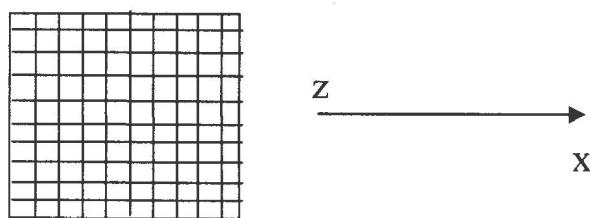


Рис.2. Модель эпицентра землетрясения

Заключение

Над эпицентром землетрясения образуется плоская ударная волна, распространяющаяся вверх до некоторой высоты, величина которой зависит от энергии, выделяющейся в эпицентре. Известно, что вследствие неустойчивости фронта ударной волны на нём могут генерироваться волновые возмущения атмосферы [5]. Дальнейшее исследование будет заключаться в изучении дисперсионных свойств возмущений атмосферы, генерируемых фронтом ударной волны. При этом, если рассматривать возмущения с длиной волны:

$$\lambda_x = \frac{2\pi}{k_x} < l,$$

то плоскую ударную волну можно считать бесконечной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Осипов В.И. Природные катастрофы в центре внимания ученых. Вестник РАН, 1995, т.65, №6.
2. Курскеев А.К. и др. Прогнозирование землетрясений в Казахстане. Эверо, 2000г.
3. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М., Наука, 1981.
4. Зельдович Я.Б., Райзнер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., Наука, 1966.
5. Ландау Л.Д., Лишин Е.М. Теоретическая физика. Т. VI, Гидродинамика. М., Наука. 1986.

Резюме

Жер сілкінісін сипаттаушы көп факторлардың ішінен жер сілкінісінің ошағы мен эпицентрінің моделін құруға қажеттілері ғана таңдалған, бұл осы модельді атмосфераның толқындық үйітқуларының шығу көзі ретінде қабылдау үшін қажет.

Summary

From amongst the factors that characterize an earthquake are selected only those which are necessary to build a model of seismic center and earthquake epicenter so that the model could be taken as a source of wave disturbances of the atmosphere.

Департамент «Институт ионосферы»,
г. Алматы

Поступила 24.07.2009 г.