

Е. М. ВАСИЛЕНКО

СПОСОБ ГРАФИЧЕСКОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ УСЛОВИЙ РЕЗОНАНСА АЛЛЮВИАЛЬНОГО СЛОЯ

Систематическое исследование динамических свойств рыхлых толщ различной мощности, залегающих на более плотных скальных и других коренных отложениях, начатое в сороковых годах, показало, что в рыхлом слое возникают своеобразные явления, которые не учитываются во время работ по сейсмическому микрорайонированию при использовании только кинематических особенностей грунтов [1, 6, 9, 10, 14].

В работах Д. П. Кирюса, А. З. Каца, Д. Хаузнера, Е. Ф. Саваренского и др. с разных сторон освещаются процессы, происходящие в слое при прохождении цуга волны от границы полупространства к поверхности слоя.

Е. Ф. Саваренским исследовано влияние мощных слоев (до нескольких километров толщиной), залегающих на гранитном слое земной коры. А. З. Кацем показано воздействие сравнительно тонких слоев, обычно изучаемых методами инженерной сейсмологии, на продольные и поперечные волны, приходящие из очага в подстилающей среде нормально к подошве рыхлого слоя. С. В. Пучковым учтено влияние неперпендикулярного подхода к подошве слоя сейсмической радиации. В. В. Штейнберг инструментально исследовал случай поперечных волн.

При допущении синусоидального колебания, определяемого условиями

$$\begin{aligned} f(t) &= e^{i\omega t} \quad \text{при } |t| \leq t_1 \\ f(t) &= 0 \quad \text{при } |t| > t_1 \end{aligned}$$

на отрезке, состоящем из n волн, плотность спектра имеет вид

$$g(u) = \int_{-t_1}^{t_1} e^{i(\omega - u)t} dt = \frac{2 \sin(\omega - u)t_1}{\omega - u}.$$

Для основной частоты $u = \omega$ в слое, ограниченном снизу упругим полупространством, а сверху свободной поверхностью, возможно соблюдение синфазности для продолжающих приходить из полупространства фаз А и отраженных вначале от свободной поверхности, а затем от подошвы рыхлого слоя фаз А'. Это происходит только при определенных соотношениях длин волн (или, что то же самое, частот колебаний) и мощности рыхлого слоя и приводит к резонансному усилению колебаний в слое. В случае противофазного наложения волны колебания ослабляются.

Значение смещения на поверхности имеет вид

$$w = k_1 \frac{1 - k_0^n e^{-i \frac{4\pi}{T} n \tau}}{1 - k_0 e^{-i \frac{4\pi}{T} \tau}} e^{i \frac{2\pi}{T} (t - \tau)},$$

где k_1 — коэффициент преломления на границе рыхлого слоя и упругого полупространства;

k_0 — коэффициент отражения от подошвы слоя;

n — число волн, укладывающихся в выбранный отрезок синусоиды;

$\tau = \frac{H}{V}$ — время распространения волны от подошвы к кровле рыхлого слоя.

При $\tau = \frac{T}{4}$ выполняются условия резонанса.

Из рассмотрения этой формулы вытекают следствия:

1. В общем виде условия резонанса существуют для волн, длины которых удовлетворяют условию

$$H = \frac{(2n-1)\lambda}{4} \quad \text{или} \quad \tau = \frac{(2n-1)T}{4} \quad \text{для } n = 1, 2, 3, \dots,$$

т. е. в широкой полосе периодов при достаточно большой мощности слоя возникают несколько резонансов на различных значениях периода.

2. При определенном n резонансная амплитуда увеличивается при приближении члена $k_0 e^{-i \frac{4\pi}{T} \tau}$ к единице.

3. Указанный член стремится к единице, если отношение $\frac{v_2 \rho_2}{v_1 \rho_1} \ll 1$, т. е. резонансная амплитуда, увеличивается при увеличении различий физических свойств подстилающей среды и рыхлого слоя.

4. Наряду с резонансными максимумами амплитуд существуют области периодов, при которых имеет место наложение колебаний с противоположными фазами.

При мощности слоя, достигающей нескольких сот метров, как указывает А. З. Кац [1], область минимума амплитуд перекрывает полосу периодов, характерных для наиболее распространенных сооружений ($H=500$ м, $T=0,3-0,4$ сек). По-видимому, этим объясняется наблюдаемое при сильных землетрясениях уменьшение эффекта сотрясения на рыхлых толщах значительной мощности.

С учетом поглощения при увеличении числа отражений в рыхлом слое резонансная амплитуда поперечных волн уменьшается [12]. При уменьшении угла падения волны (когда направление луча приближается к вертикальному) значение резонансных периодов уменьшается, хотя и на незначительную величину (до 4%), но при этом резонансная кривая становится более резкой. Менее всего подвержен влиянию основной максимум резонансной кривой [9].

Экспериментальные наблюдения показывают, что на скале амплитуды колебаний от землетрясений и горных взрывов в 2—5 раз меньше амплитуд на поверхности аллювиального слоя [6, 12].

Сравнение расчетных и экспериментальных резонансных кривых указывает, что последние содержат большее количество максимумов, чем расчетные. Это объясняется простотой принятых при расчетах условий и сложностью естественного взаимоотношения слоев геологического разреза.

Результаты наблюдений и расчета условий резонанса обычно представляются в виде графиков изменения амплитуд колебаний в зависимости от периода волны (резонансные кривые для слоев различной мощности). Основными рекомендациями по использованию резонансного эффекта в практике проектирования зданий в сейсмических районах служили заключения о том, что диапазон периодов резонансных максимумов (0,1—1,0 сек) перекрывает полосу периодов собственных колебаний наиболее распространенных типов зданий.

При проведении работ по сейсмическому микрорайонированию территории Ужгорода было определено, что толща галечников четвертичного возраста, обладающая мощностью от 0 до 275 м, залегает на плотных глинах неогена (рис. 1). Резкое увеличение мощности слоя галечников в южной части города обусловлено наличием новейшего сейсмогенного разлома, вдоль простирания которого в прошлом зафиксировано несколько землетрясений интенсивностью до 6 баллов.

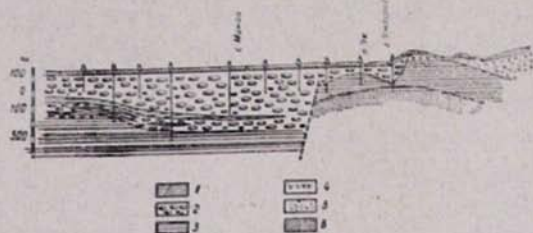


Рис. 1. Схематический геологический разрез северной окраины Закарпатского внутреннего прогиба. 1—лессовидные суглинки; 2—галечники минайской свиты; 3—глины чопской свиты; 4—андезито-базальты гутинской свиты; 5—переслаивание песчанников, туфов и андезитов гутинской свиты; 6—туфы чопской свиты

Ввиду того, что инструментальное сейсмическое микрорайонирование Ужгорода проводилось комплексом не прямых методов (по сейсмическим жесткостям, горным взрывам, высокочастотным микросейсам), исследование возможности резонанса аллювиального слоя должно было дополнить полученные сведения данными о частотных особенностях рыхлого слоя.

Полученные расчетные данные позволили построить схему возможного резонанса территории Ужгорода.

Для составления такой схемы необходимы следующие исходные данные:

1. Схема изомощностей аллювиального слоя, которая может быть построена при наличии достаточной плотности буровых скважин, которые прошли всю рыхлую толщу на изучаемой территории.

2. Схема сейсмокаротажных измерений с нанесенными значениями

скоростей сейсмических волн в рыхлом слое и подстилающей среде. Схема должна показывать дифференциацию скоростей как по площади, так и в вертикальном разрезе.

3. Характер распределения по глубине значений плотностей осадков рыхлого слоя и горных пород подстилающего полупространства.

Анализ явлений резонанса разделяется на два этапа: 1. Исследование резонансных свойств грунтов и 2. Исследование колебаний системы грунт — сооружение.

Способ построения схемы резонанса заключается в следующем. Учитывая степень сложности геологического строения района и плотность пунктов, в которых произведены измерения скоростей сейсмических волн (сейсмокаротажные наблюдения), исследуемая территория разделяется на участки с различными значениями $\frac{v_2 \rho_2}{v_1 \rho_1}$.

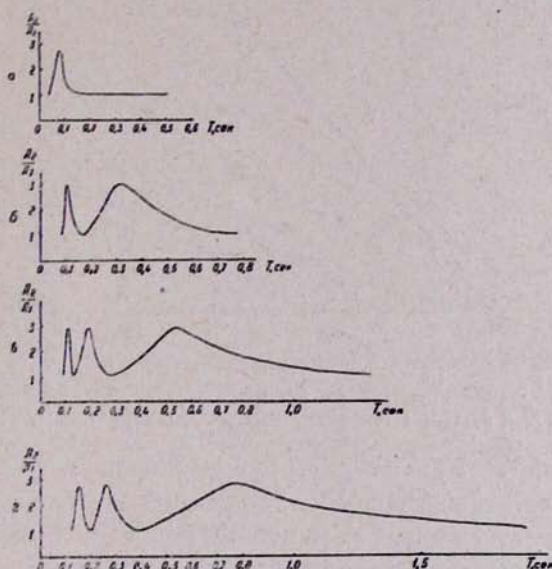


Рис. 2. Графики изменения отношения амплитуд колебания в зависимости от периода волны в слое галечников со скоростью продольных волн в галечнике 1400 м/сек, при скорости в подстилающих глинах 2300 м/сек.

Мощности слоя галечников: а—30 м; б—110 м; в—190 м; г—270 м

Для каждого участка исследуемой территории определяется существующий диапазон мощностей рыхлого слоя и для нескольких граничных и промежуточных значений мощности рыхлого слоя определяются по данным измерений отношения амплитуд в зависимости от периода волны (резонансные графики, рис. 2). По набору таких графиков строится обобщенный график, по осям которого откладываются значения периодов волн и мощности рыхлого слоя. На этот график выносятся значения резонансных максимумов и сопутствующих им минимумов (рис. 3). Имея схему изомощностей аллювиального слоя, можно построить схему изолиний равных периодов, для которых при данных значениях параметров слоя и подстилающей среды (скоростей волн, плотностей, мощностей)

наблюдается резонанс. Таким же образом можно провести линии равных отношений амплитуд колебаний на исследуемой территории.

При составлении схемы резонанса аллювиального слоя галечников на территории Ужгорода отмечено, что линии равных отношений амплитуд проходят параллельно изолиниям равной мощности слоя.

Однако здесь имеется одна особенность: при увеличении мощности слоя наряду с основным резонансным максимумом появляется ряд последующих максимумов, соответствующих $n=2, 3 \dots$. Области распространения этих максимумов на плане взаимно перекрываются.

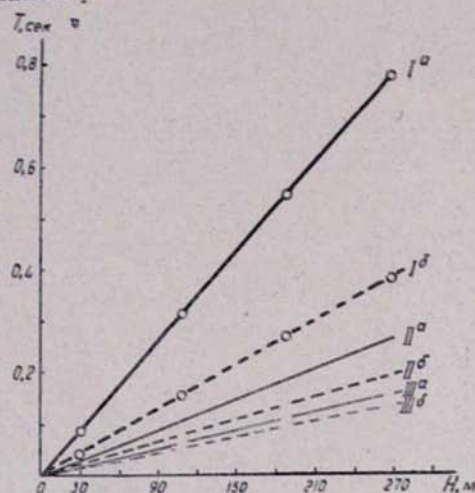


Рис. 3. График зависимости периодов резонансных максимумов и минимумов от мощности слоя галечников: Ia, IIa, IIIa — максимумы резонанса при $n=1, 2, 3$; Ib, IIb, IIIb — отсутствие резонанса при $n=1, 2, 3$

Исходя из карт детального сейсморайонирования, показывающих размещение основных очаговых зон, опасных для исследуемой территории, определяются расстояния до плейстоценовых областей сейсмогенных структур. По полученным эпицентральному расстояниям приближенно определяется диапазон периодов приходящих колебаний (желательно для всех основных типов волн: продольных, поперечных, поверхностных). Это возможно сделать при наличии в районе постоянно действующей региональной сейсмостанции и при достаточной частоте сейсмических толчков.

При изучении возможности резонанса слоя галечников минайской свиты в Ужгороде были использованы данные по мощности слоя по 15 скважинам. В расчет принимались следующие значения скоростей, определенные при сейсмокаротажных работах:

- четвертичные отложения 500—600 м/сек;
- чопская свита плейстоцена 1400 м/сек;
- луковские слои 2300 м/сек;
- залужские слои 2700 м/сек;

Плотности галечников имели величину $\rho_2 = 1,82 \text{ г/см}^3$, глины

$$\rho_1 = 2,20 \text{ г/см}^3.$$

Резонансные кривые строились для значений мощности слоя галечников $H=30; 110; 190; 270$ м. С увеличением мощности слоя максимальное отношение амплитуд приходящей из толщи глин и резонирующей в слое галечников волн достигает $\frac{A_2}{A_1} = 3,0$ для мощности слоя равной 110 м.

Графики, приведенные на рис. 2, показывают сдвиг основного максимума резонансного периода при увеличении мощности слоя в область больших периодов (до 0,8 сек) и появление ряда резонансов, соответствующих $n=2, 3, 4 \dots$ Схема резонанса Ужгорода (рис. 4) дифференцирует территорию города на ряд участков, для которых резонанс либо не наблюдается ввиду отсутствия галечников, либо развивается на пе-

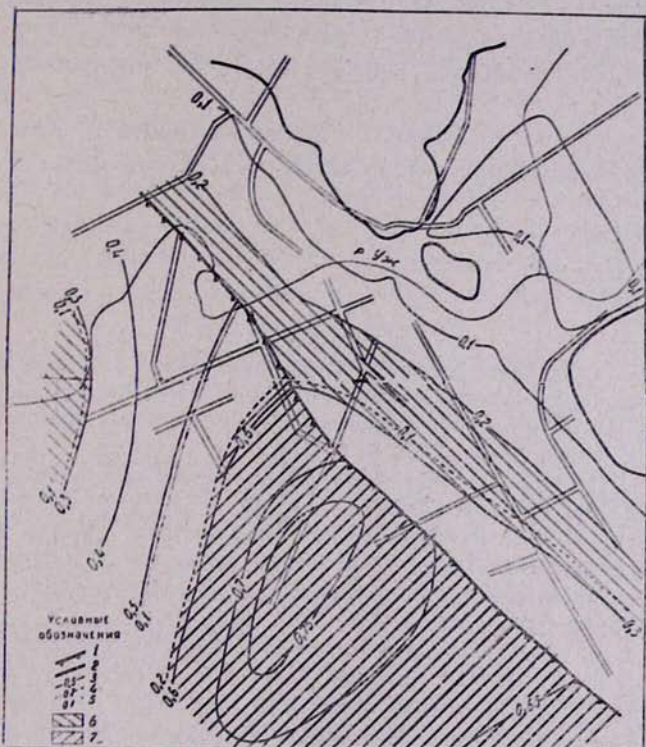


Рис. 4. Схема резонанса г. Ужгорода. 1—новейший сейсмогенный разлом; 2—контур нулевой мощности слоя галечников; 3—изорезы периода при $n=1$; 4—то же при $n=2$; 5—то же при $n=3$; 6—площади совпадения резонанса слоя галечников и преобладающих сооружений при $n=1$. То же при $n=2$

риодах, совпадающих с периодами преобладающих типов зданий (0,2—0,3 сек), либо на периодах, отличных от указанных выше значений. В сочетании со схемой этажности существующей застройки города и проектом генеральной планировки схема резонанса позволяет удачно выбирать площадки под строительство различных сооружений и выявить наиболее уязвимые для будущих землетрясений участки и существующие здания.

Составление схем резонанса в районах, где развиты рыхлые толщи значительной мощности, должно явиться неотъемлемой частью комплекса работ по сейсмическому микрорайонированию, ибо карты микрорайонирования, выраженные в баллах сейсмической шкалы, определяют характер повреждений зданий в широких пределах значения периода колебаний, а схема резонанса позволяет учесть частотные особенности системы грунт—сооружение.

Прием, использованный для построения схем резонанса сравнительно небольших участков, можно распространить на всю рыхлую толщу залегающую на гранитном слое земной коры. На этой основе можно составить карту резонанса для всех сейсмоактивных районов. Также можно при обследовании последствий сильных землетрясений и при обнаружении аномального распределения проявлений сотрясений различной силы составлять схемы резонанса рыхлого слоя, чтобы попытаться объяснить усиление сейсмического эффекта возможностью возникновения резонанса в слое.

В заключение автор выражает признательность А. З. Кацу за консультацию при оформлении этой статьи и М. М. Горыню, принимавшему участие в расчетах.

Львовский филиал
института геофизики
АН Украинской ССР

ЛИТЕРАТУРА

1. Кац А. З. К вопросу об учете грунтовых условий при сейсмическом микрорайонировании. Труды Геофиз. ин-та АН СССР, 1955, № 36 (157).
2. Кац А. З. Некоторые вопросы методики сейсмического микрорайонирования. Труды Ин-та физики Земли, 1959, № 5 (172).
3. Кац А. З., Пучков С. В. О воздействии сейсмических волн на сооружения. Труды Геофиз. ин-та АН СССР, 1955, № 30.
4. Кейлис-Борок В. И. Различие спектра поверхностных волн при землетрясениях и подземных взрывах. Труды Ин-та физики Земли АН СССР, 1960, № 15 (182).
5. Кириллов Ф. А. О зависимости периода колебаний грунтов от расстояния до взрыва. Труды Сейсмол. ин-та АН СССР, 1945, № 117.
6. Кириос Д. П. О возможности возникновения собственных колебаний аллювиального слоя. Труды Сейсмол. ин-та АН СССР, 1945, № 117.
7. Медведев С. В. Исследование колебаний зданий при сейсмических воздействиях. Труды Ин-та физики Земли АН СССР, 1959, № 5 (172).
8. Медведев С. В. Инженерная сейсмология. Госстройиздат. 1962.
9. Пучков С. В. Инструментальное сейсмическое микрорайонирование зоны Ашхабадского землетрясения 1948 г. Труды ин-та физики Земли АН СССР, № 5 (172), 1959.
10. Саваренский Е. Ф. Элементарная оценка влияния слоя на колебания земной поверхности. Изв. АН СССР, серия геофиз., 1959, № 10.
11. Седова Е. Н. Сопоставление динамических особенностей записей слабых землетрясений с грунтовыми условиями. Труды Ин-та физики Земли АН СССР, 1962, № 25 (192).
12. Штейнберг В. В. Влияние слоя на амплитудно-частотный спектр колебаний на поверхности. Труды Ин-та физики Земли АН СССР, 1965, № 36 (203).
13. Штейнбругге К., Моран Д. Инженерный анализ последствий землетрясений 1952 года в Южной Калифорнии. Госстройиздат, М. 1957.
14. Housner G. Problems of Destructions Earthquakes. Geotechnique, 1954, 4, № 4.