

ВЛИЯНИЕ ВОЛНОВОГО ЧИСЛА НА СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ СООРУЖЕНИЙ В БОЛЕЕ ЧЕМ 9-БАЛЛЬНОЙ ЗОНЕ Г. БИШКЕК

*Рассмотрено влияние волнового числа на сейсмостойкость сооружений
в более чем 9-балльной зоне г. Бишкек.*

*Бишкек ш. 9 баллдан жогорку зонадагы курулмалардын сесмотуруктуулгуна
толкундук сандын таасир этүүсү каралган.*

*In this article is presented the influence of wave numbers for seismic stability of
constructions in more than 9 scales zones of Bishkek.*

Целью и задачей данной работы является физический анализ возникновения интерференционных короткопериодных вторичных волн в толще колеблющегося грунта и влияние их на систему грунт – сооружения в области более чем 9-балльной зоны г. Бишкек.

Интерференционное явление в области волнового движения в более чем 9-балльной зоне хорошо объясняется на основании принципа Гюйгенса: точки среды, которых волна достигла в данный момент времени, следует рассматривать как центры образования вторичных элементарных волн.

Причем взаимодействие вторичных волн происходит по направлению распространения основной волны. При этом в боковых направлениях вторичные волны взаимно гасятся, и таким образом волна сохраняет основное направление распространения /1/.

Более чем 9-балльная зона сложена лессовидными суглинками с прослоями супеси и песка, мелкого галечника. Уровень грунтовых вод залегает на глубине от 1 до 3 м. Допустимая нагрузка на суглинки $1...1,5 \text{ кг/см}^2$. По избирательности частот микросейсм эти грунты относятся к категории мягких с преобладающим периодом колебаний в диапазоне $0,1...0,35 \text{ с}$. По спектральным свойствам амплитуда увеличена в 2-3 раза по отношению к средним грунтовым условиям /2/.

Очевидно, что эти эффективные амплитуды колебания слоистой толщи грунта в более чем 9-балльной зоне близки к $0,2 \dots 0,4$ с, что отвечает наиболее характерному участку спектра воздействия землетрясений на сооружения.

Инженерно-геологические условия и разрезы основания города через пункты регистрации землетрясения показаны на рис.1. Из этого разреза выделим области формирования интерференционных волн в данной геологической среде.

Как видно из рис.1, вдоль одной линии с юга на север имеем два ограниченных сложенных осадочных слоя по толщине. Толщина второго слабого (мягкого) покрова во много раз больше первого. Начало второго, расположенного на поверхности, совпадает с границей канала БЧК и с верхним изгибом 45^0 наклонной плоскости кровли песчаника, которая может быть плоскостью скольжения с заниженной скоростью преломленных S-волн и распространения их с юга на север во второй среде.

Таким образом, вторая среда плоским горизонтальным основанием песчаника с мощностью покрова 100-130 м может считаться образующей интерференции, а верхний изгиб песчаника несет информацию о начальной границе интерференции во второй среде.

Отметим, что по данным СМР города, этот район отнесен к более чем 9-балльной зоне сейсмичности.

Итак, наиболее вероятным примером являются одновременные записи землетрясения, зарегистрированные 21.11.1998 г. с $k \approx 11,5$, $\Delta = 80$ км в пунктах наблюдения (п.н.) «Асанбай» (8-балльная зона) и «БЧК» (более чем 9-балльная зона) в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Копия записи колебаний грунтов, вызванных землетрясением, приведена на рис.2.

Рассматривая записи землетрясений, мы отмечаем, что слоистая толща грунта в п.н. «БЧК» по сравнению с п.н. «Асанбай» совершает нерегулярные колебательные движения. В нашем случае из полученной записи в п.н. «БЧК» можно достаточно уверенно отделить вынужденные колебания продолжительностью 6,0 с от очень близких гармонических (результатирующих) колебаний, где усиливаются амплитуды по каналам в 2-3 раза, т.е. происходит интерференция волн.

Для пояснения усиления волн установим связь между свободным колебанием и имеющимися в слоистой толще грунта источниками энергии, которые поддерживают свободные колебания в данный момент времени.

Определение некоторых динамических характеристик результирующих колебаний грунта является основой прогнозирования поведения зданий, возведенных на толще слабых грунтов при сильных и разрушительных землетрясениях.

Например, интервал времени $t_2=6,2$ с (см. рис.3), в котором образуется интерференция с медленно меняющейся амплитудой, является эффективным фактором сейсмического процесса, влияющим на устойчивость системы. В этом случае продолжительность эффективных колебаний толщи грунта увеличивается в 2 раза, или для двух моментов времени $t=t_1+t_2=6,0$ с + $6,2$ с = $12,2$ с.

Для анализа этих сложных задач необходимо определить области концентрации накладывающихся и слагаемых волн в толще грунта, которые являются также центрами образования вторичных элементарных волн, влияющих на устойчивость сооружения.

На основании метода, представленного в работе /3/, рассмотрим простой способ формирования вторичных или интерференционных волн в плоскопараллельных слоях (рис.4).

Предположим, что верхняя среда мощного покрова песчаника, где фазовая скорость сейсмических S волн резко падает, разделена на две тонких составляющих. Пусть на нижний слой под углом i параллельно падают отраженные от дневной поверхности грунта плоские упругие волны 1 и 2. Очевидно, что из условной точки С могут выходить две практически совпадающие по характеристикам упругие волны: волна 1, отраженная от верхней поверхности подстилающего слоя, и волна 2, преломленная от ее нижней границы. Понятно, что разность хода Δl этих волн зависит от величины угла падения и толщины подстилающего слоя. Кроме того, Δl зависит еще от показателя преломления слоя, так как на участке АВС волны 2 плоские волны распространяются со скоростью, в n раз меньшей, чем на участке ДС волны 1. Еще отметим, что в каждом отдельном слое скорость упругой волны постоянна и убывает при переходе от вышележащего слоя к нижележащему /4/. Следовательно, эти данные ведут к разности хода волн, тогда $\Delta l=(AB+BC)n-(CD+\frac{\lambda}{2})$. Здесь $\lambda/2$ появляется при перемене (потере) половины длины волны. Если Δl равняется нулю или четному числу полуволн, то волны 1 и 2 в области условной точки С усилят друг друга. Это означает, что после распространения гравитационных длинных волн в области точки С появляется группа хорошо оформленных коротких внутренних волн.

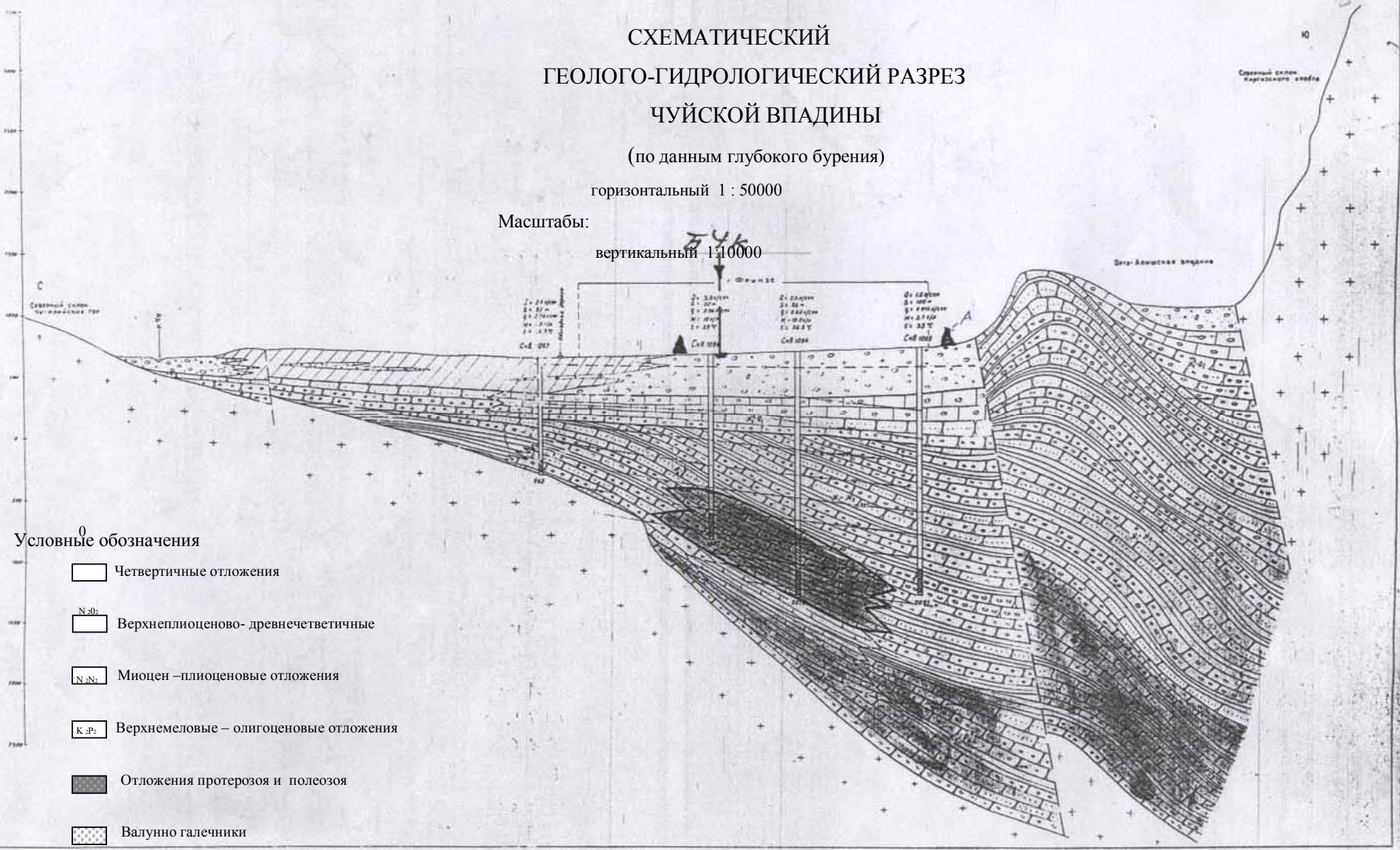
СХЕМАТИЧЕСКИЙ ГЕОЛОГО-ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РАЗРЕЗ ЧУЙСКОЙ ВПАДИНЫ

(по данным глубокого бурения)

горизонтальный 1 : 50000

Масштабы:

вертикальный 1:10000



Условные обозначения

- Четвертичные отложения
- N402 Верхнеплиоценово- древнечетветичные
- N3N2 Миоцен –плиоценовые отложения
- K2P2 Верхнемеловые – олигоценые отложения
- Отложения протерозоя и полеозоя
- Валунно галечники
- Суглинки с прослоями песков








-  Глины, алевролиты
-  Засоленные глины, алевролиты
-  Рабочая часть установленных фильтров.
-  Часть фильтров , перфорирования прострелами
-  Положение пьезометрического уровня
-  Месторождение
-  Изолинии температур

Рис.1. Схематический геолого-гидрологический разрез по меридианному профилю территории города Бишкек:

 - пункты наблюдения;  - Большой Чуйский Канал (БЧК)

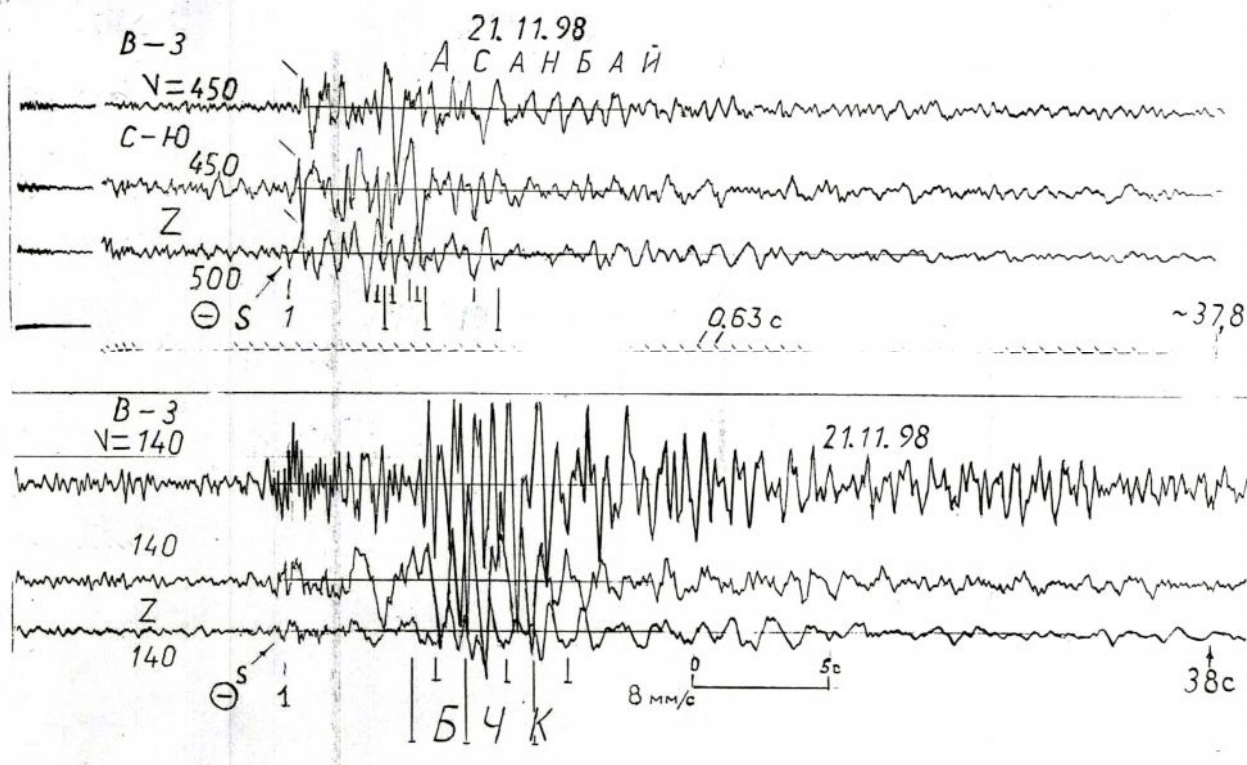


Рис 2. Копия осциллограмм землетрясения, зарегистрированного 21.11.1998 г. с $K=11,5$; $= 80 \text{ км}$ в пунктах наблюдения «Асанбай» (8-бальная зона), «БУК» (более чем 9-бальная зона) в трех взаимно перпендикулярных направлениях

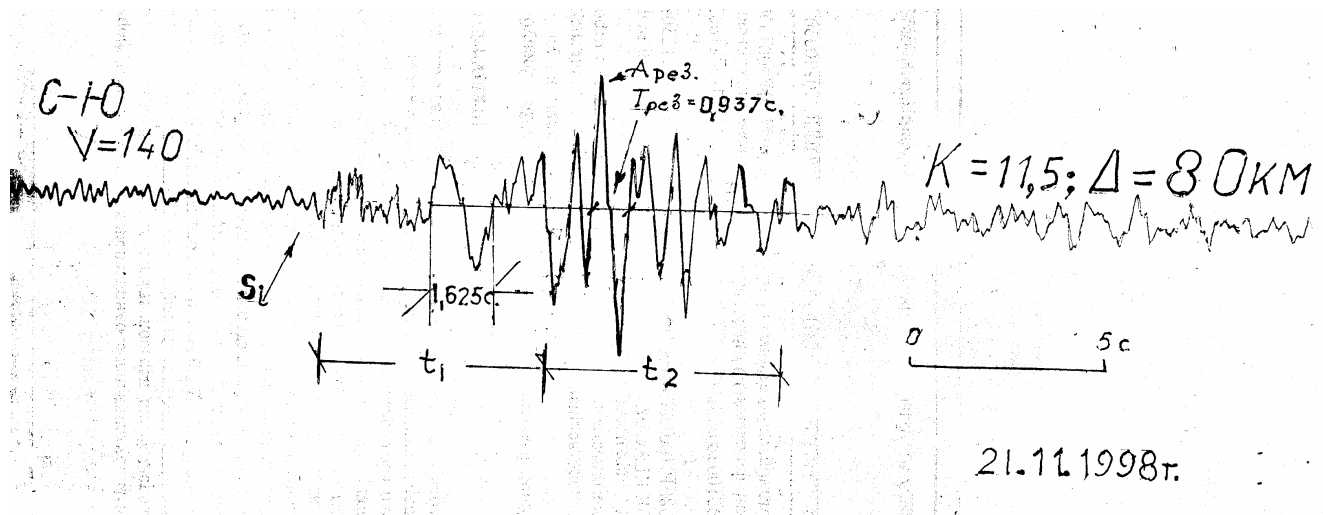


Рис.3. Копия записи колебания 100-метровой толщи грунта в п.н. «БЧК».

Составляющая С-Ю

Эту область в упругой среде грунта можно рассматривать как колеблющееся «тело», или вторичный источник колебания, который **восполняет** потерянную энергию колебаний слоистой среды с внутренними волнами с в десятки раз меньшей фазовой скоростью, чем скорости поверхностных волн.

Поскольку «тело» имеет объем, то в среду побегут волны практически с одной единственной частотой и длиной волны.

Возмущение слоя может быть периодически повторяющимся, но не синусоидальным, либо вообще иметь нерегулярный характер /5/. Следует отметить, что максимальное раскачивание слоистого грунта возникает, когда частота отрыва наложенной периодической волны от поверхности нижележащего слоя близка к одной из собственных **частот волнонесущей толщи грунта**. Такое движение среды можно грубо трактовать как **вынужденные резонансные колебания**. Однако в действительности процесс является **автоколебательным**, так как колебания слоистой среды до некоторой степени влияют на частоту отрыва периодической волны.

Из рассматриваемой ситуации совершенно ясно, что вынужденные резонансные колебания имеют максимальную амплитуду вблизи резонанса.

Вторичные сейсмические волны, образованные в гармонический вид, приведены на рис.5, где фаза колебаний скорости опережает колебание смещения по фазе на $\pi/2$, а по времени на $T/4$ колебание ускорения опережает колебание смещения по фазе на π или по времени на $T/2$.

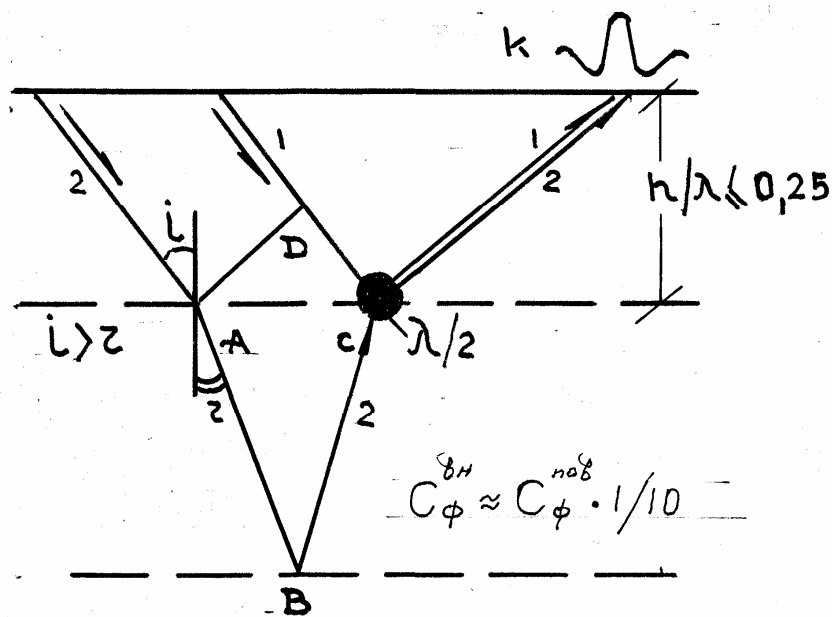


Рис.4. Простое геометрическое представление образующих внутренних вторичных вынужденных $Z_{рез}$ волн в волнонесущей среде (в случае тонкого слоя):

● → область формирования вторичных волн; K - волновое число на п.м.

Следовательно, между указанными параметрами сейсмических колебаний возникают дополнительные неустойчивые свободные движения в среде. Типичным примером является запись землетрясения с возрастающими амплитудами в п.н. «БЧК» (рис.2).

По нашему мнению, такой непредсказуемый сложный колебательный вид в области $\lambda/2$ длины сейсмических Z волн может вызвать **взрывление (разжижение)** на поверхности слабого грунта.

При плоском движении системы на теле сооружения через половины длины волны образуются поперечные трещины на неустойчивой области.

Общий вид трещинообразования на сооружении показан на рис.6.

Исходя из этих соображений для физического анализа сложного процесса находим скорость вторичной волны V , которая зависит от упругих свойств и плотности ρ среды:

$$V = \sqrt{\frac{\chi}{\rho}}, \quad (1)$$

где χ - коэффициент, характеризующий упругие свойства среды. В частности, для продольных волн в твердом теле $\chi = E$, для поперечных волн $\chi = 0,4E$ (E - модуль упругости). Здесь вторичная волна, распространяющаяся в одном направлении, характеризуется показателем k - волновым числом /6/.

$$k = \omega / C_{\phi} = 2\pi / \lambda. \quad (2)$$

В нашем случае $V \approx C_{\phi}$ – фазовой скорости гармонической волны. Тогда из пропорции $\omega / C_{\phi} = 2\pi / \lambda$ – длина поперечной (продольной) волны, излучаемой «телом», определяется через выражение

$$\lambda = C_{\phi} \cdot T, \quad (3)$$

где $T=0,1 \dots 0,4$ с – наиболее характерные участки спектра воздействия землетрясений на систему.

Для наглядности изменения C_{ϕ} , λ , k вторичных волн в верхнем эффективном слое грунта по характерным заданным T , с, рассчитанные по формулам (2, 3), приведены в табл.1.

Как видно из табл.1, волновое число $k=2\pi/\lambda$ грунта при $T=0,1$ с имеет максимальное значение. Тогда нетрудно установить, что в эпицентральной зоне сильного землетрясения 7 баллов уязвимость системы (грунт – сооружение) прямо пропорциональна волновому числу k , бегущей вдоль здания.

Согласно сказанному, в процессе движения системы в случае продольного размера здания $l > \lambda$ уязвимость здания приобретает максимальное значение. В нашем конкретном случае по записи канала С-Ю с.с. «БЧК» период A_{\max} вынужденного резонанса равен 0,937 с (см. рис.3), т.е. сработал более толстый слой. С другой стороны, при тонкослойной **складчатости** среды воздействия вторичных волн возрастают, поэтому предполагается, что на участке шириной $\lambda/2$ на поверхности произойдет **взрыхление** грунта.

Таблица 1

Численные значения параметров грунта при случаях неглубокого залегания центра образующих вторичных элементарных волн

Е – модуль упругости	390 кгс/см ²					
ρ - плотность суглинка	1600 кг/м ³					
T, с – характерные периоды	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35
Составляющая	Вертикальная					
C _φ – фазовая скорость	97,7 м/с					
λ, м – длина волны	9,77	14,65	19,54	24,42	29,31	34,19
k, м ⁻¹ – волновое число	0,64	0,43	0,32	0,25	0,21	0,18
Составляющая	горизонтальная					

C_{ϕ} – фазовая скорость	154,5 м/с					
λ , м – длина волны	15,45	23,18	30,91	38,64	46,36	54,09
k , m^{-1} – волновое число	0,40	0,27	0,20	0,16	0,13	0,11

Существенным моментом является количественная оценка во времени максимальной энергии волн, образованных в слоистой толще грунта, который, в основном, влияет на устойчивость системы в более чем 9-балльной зоне города.

Азимут на эпицентр землетрясения 21.11.1998 г. расположен близко к направлению С-Ю. Поэтому максимальная энергия E волны определяется по записи канала С-Ю с.с. «БЧК».

На записи землетрясения, как видно из рис.2, 3, имеются последовательные механические колебания: вынужденные, свободные (вынужденно резонансные) и затухающие.

Для оценки сейсмической энергии волны E в области вынужденных колебаний попробуем истолковать природу основного колебания с $T=1,625$ с. Здесь привлекается **глубинное значение** скоростей поперечной волны в галечнике 290 м/с /7/ и 6-метрового слоя наносов 170 м/с /8/.

Определяется глубина толщи H при основном регуляторе движения через приближенную формулу /9/:

$$T = \frac{4H}{(2n-1)C_s} \quad (n = 1, 2, 3), \quad (4)$$

где $C_s = (290 \text{ м/с} + 170 \text{ м/с}) : 2 = 230 \text{ м/с}$. откуда

$$H = \frac{1,625 \text{ с} \cdot 230 \text{ м/с}}{4} = 93 \text{ м}.$$

Так как в п.н. $H=100$ м, то 93 м приближенно равно 100 м.

Найдем длины волны λ вынужденного колебания мощного покрова песчаника, где $C_{\phi} \approx C$, $\lambda = 230 \text{ м/с} \cdot 1,625 \text{ с} = 373,75 \text{ м}$.

Из расчета на одну длину волны λ энергия волны /10/

$$E = \frac{1}{8} \rho g h^2 \lambda, \quad (5)$$

где $h=0,1714$ мм – полный размах амплитуды основной периодической вынужденной волны, $\rho=2200 \text{ кг/м}^3$ – плотность плотного галечника.

Подставив значения λ , ρ , h , получим $E_{\text{вын}} = 0,02960 \text{ кгм/с}^2$.

Определим теперь величины λ , $E_{\text{вын.рез}}$ для случая вынужденных резонансных колебаний слоистой толщи грунта.

Из формулы (3) для $T_{\text{рез}}=0,937$ найдем мощность слоя H , возбуждающего явление резонанса в толще грунта: $0,937\text{ с} = 4H/97,7\text{ м/с} \Rightarrow H = 22,9\text{ м} \approx 23\text{ м}$. Это значит, что на глубине, равной 23 м, в районе п.н. «БЧК» есть отражающая граница и существуют условия для возникновения интерференционных колебаний. Длина волны вынужденного резонанса $\lambda = 154,5\text{ м/с} \cdot 0,937\text{ с} = 144,7\text{ м}$.

В этом случае волновое число будет $k = 2\pi/144,7\text{ м} = 0,0433\text{ м}^{-1}$.

Для сравнения определим волновое число в моменте первичного вынужденного колебания мощной толщи грунта

$$k = 2\pi/373,75\text{ м} = 0,0168\text{ м}^{-1}.$$

Отсюда нетрудно заметить, что с уменьшением глубины отражения сейсмических волн волновое число в грунте возрастает.

Подставив полученное по записи значение $h^2 = 1,657 \cdot 10^{-7}\text{ м}^2$ в конечную E , найдем:

$$E_{\text{вын.рез}} = \frac{1}{8} \cdot 1600\text{ кг/м}^3 \cdot 9,8\text{ м/с}^2 \cdot 1,657 \cdot 10^{-7}\text{ м}^2 \cdot 144,7\text{ м} = 0,04699\text{ кгм/с}^2.$$

$$E_{\text{вын.рез}} = 0,04699\text{ кгм/с}^2.$$

Следовательно, энергия волны вынужденного резонанса в 1,587 раза больше, чем энергии волны вынужденного периодического колебания мощного покрова песчаника.

Наличие энергии упругих волн в мощном покрове песчаника вызывает ухудшение или нарастание импульсного сигнала в отдельных (эффективных) слоях грунта. Этот импульс P , также рассчитанный на одну длину волны, равен

$$P = \frac{1}{8C_{\phi}} \rho g h^2 \lambda. \quad (6)$$

Вычисленные результаты импульса силы, скорости, ускорения первичной периодической и вторичной резонансной волны приведены в сводной табл.2.

Как видно из табл.2, при резонансном движении 23-метрового слоя скорости и ускорения колебания увеличиваются соответственно в 3,5 и 6 раза.

Поэтому определяющим параметром устойчивости является ускорение в моменте резонансного движения слоя, так как чем больше ускорение, тем больше инерционная сила толщи грунта.

Волновое число в продольном плоском движении эффективного слоя грунта также увеличивается на 100 п.м в 2,58 раза. Так, на рис. 5, 6 в графическом виде изображены

предполагаемые области неустойчивости грунта и системы в рабочем режиме вторичных волн.

Интересно отметить, что максимальный импульс силы приходится на вторичную резонансную волну свободного колебания 23-метрового слабого слоя грунта.

Таким образом, с уменьшением глубины резонансного слоя в среде с переменной плотностью уязвимость эффективного слоя и возведенных на нем объектов возрастает. Отсюда ясно, что чем длиннее анализируемый сейсмический сигнал, тем значительно большая информация получается для объекта исследования.

Таблица 2

Параметры и характеристики землетрясения 21.11.1998 г., зарегистрированного в п.н. «БЧК». Составляющая С-Ю

Вынужденные колебания мощного покрова песчаника. Волна периодическая					Свободные колебания грунта. Волна резонансная (р)				
глубина покрова Н, м	период Т, с	полный размах амплитуды h, мм	амплитуда А, мм	длина волны λ , м	толщина слоя Н, м	период Т, с	полный размах амплитуды h, мм	амплитуда А, мм	длина волны λ , м
100	1,625	0,1714	0,10	373,75	23	0,937	0,4071	0,20	144,7
волновое число k, м ⁻¹	энергия Е, кгм/с ²	импульс силы Р, кг/с	скорость колебания V, мм/с	Ускорение колебания а, мм/с ²	волновое число k, м ⁻¹	энергия Е, кгм/с ²	импульс силы Р, кг/с	скорость колебания V, мм/с	ускорение колебания а, мм/с ²
0,0168	0,0296	$0,79 \cdot 10^{-4}$	0,386	1,495	0,0434	0,04014	$2,77 \cdot 10^{-4}$	1,341	8,993

Таблица 2

Отношение максимальных величин резонансного слоя на соответствующие данные h, А, k, Е, р, V, а - мощного покрова песчаника

h_p/h	A_p/A	k_p/k	E_p/E	P_p/P	V_p/V	a_p/a
2,3	2,0	2,5	1,3	3,5	3,47	6,0

Максимальное значение дает a_p/a .

Выводы

1. Поведение грунта с переменной плотностью при землетрясениях является сложным в пространстве и времени.

2. В интенсивной фазе землетрясения, т.е. в цуге максимального колебания грунта формируются активные с высоким волновым числом колебания. Эти активные колебания возникают в результате интерференции первичных волн S в слое H.

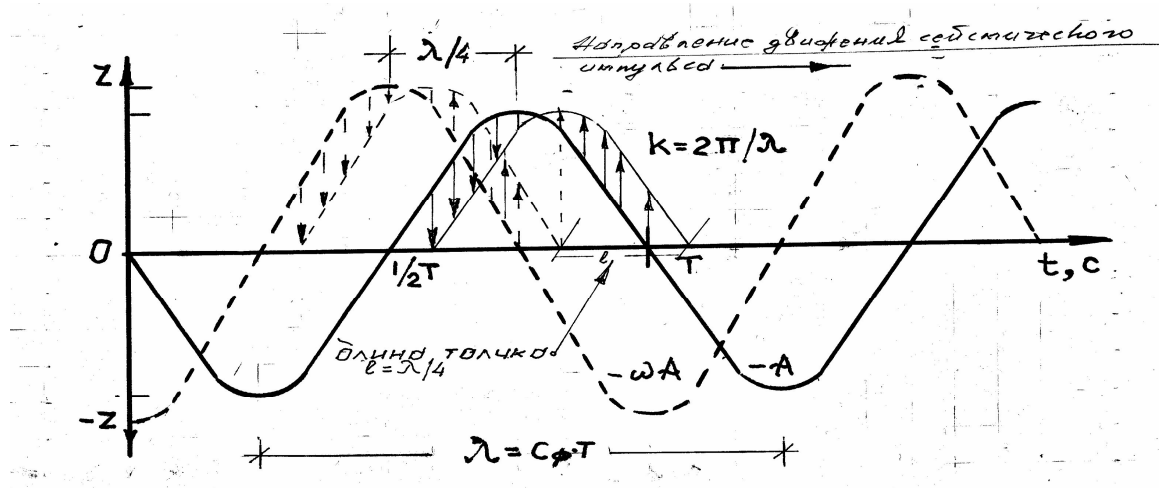


Рис.5. Область взрыхления на эффективной поверхности грунта в момент образования неустойчивого свободного колебания слоя, когда $\lambda=10\text{м}$. Здесь волновое число $k=2\pi/10\text{м}=0,63\text{ м}^{-1}$ на один погонный метр

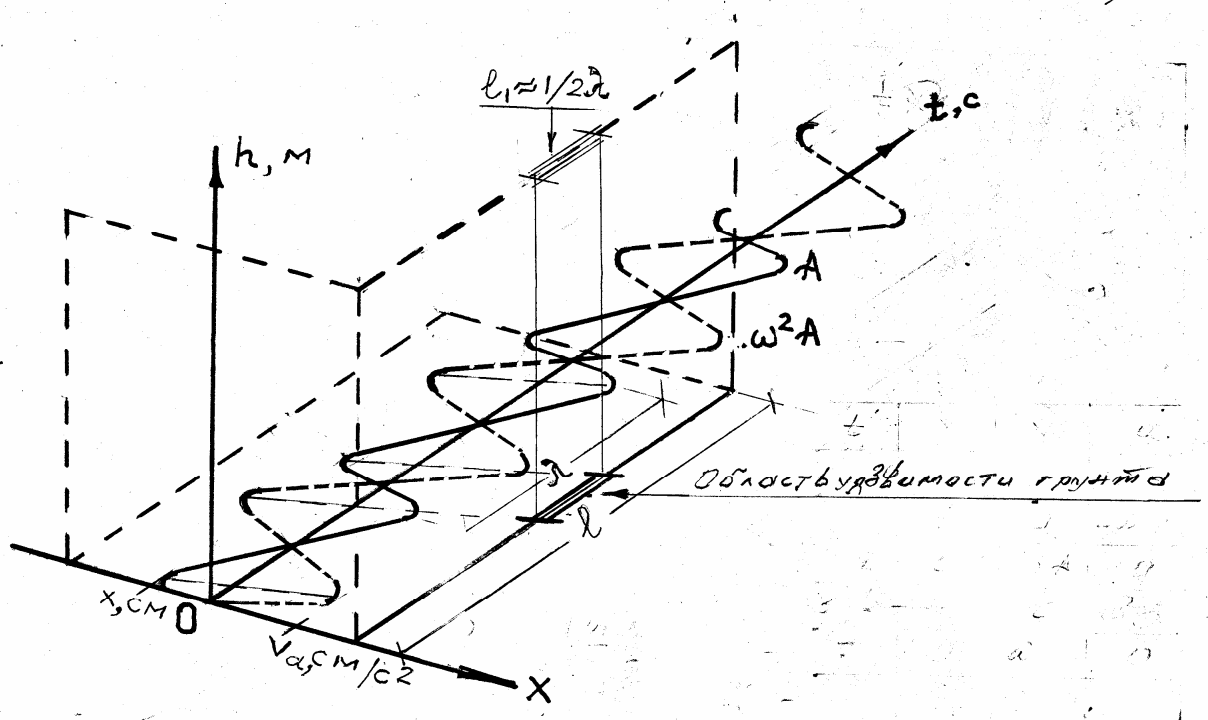


Рис.6. Предполагаемая область образования поперечной трещины в неустойчивой плоскости сооружения при плоском продольном движении вторичной сейсмической волны, где продольная длина сооружения $e > \lambda$ – длины волны. e, h – плоскость неустойчивости сооружения

Список литературы

1. Ливенцев Н.М. Курс физики. – М.: Высшая школа, 1978. – С.211.
2. Копобаев М.М. и др. Сейсмическое микрорайонирование на территории Киргизии //Сейсмическое микрорайонирование. – Алма-Ата: Наука, 1976. – С.13.
3. Грабовский Р.И. Курс физики. – М.: Высшая школа, 1974. – С.439.
4. Амелькин В.В. Дифференциальные уравнения в приложениях. – М.: Наука, 1987. – С.52.
5. Бишоп Р. Колебания. – М.: Наука, 1986. – С.72.
6. Ямщиков В.С. Волновые процессы в массиве горных пород. – М.: Недра, 1984. – С.10.
7. Ершов И.А. Колебания основания и тела плотины при короткопериодных микросейсмах //Колебания земляных плотин. – М.: Наука, 1967. – С.20.
8. Лавров И.М. Спектральные особенности колебаний земляного сооружения при землетрясении //Колебания земляных плотин. – М.: Наука, 1967. – С.12.
9. Штейнберг В.В. Влияние слоя на амплитудно-частотный спектр колебаний поверхности //Труды ИФЗ АН СССР, 1965, № 36. – С.123.
10. Кадомцев Б.Б., Рыдник В.И. Волны вокруг нас. – М.: Знание, 1981. – С.29.