

УДК 550.34

DOI: 10.23671/VNC.2014.4.55476

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ ЛИНЕЙНЫМИ И НЕЛИНЕЙНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ГРУНТОВ ПО ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

© 2014 В.Б. Заалишвили, д.ф.-м.н., проф.

Центр геофизических исследований ВНЦ РАН и PCO-A, Россия, 362002,
г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, E mail: vzaal@mail.ru

В работе приведены корреляционные взаимосвязи между линейными и нелинейными характеристиками грунтов, установленные по данным записей колебаний различных грунтов, зарегистрированных при сильном Рачинском землетрясении 1991 года (Грузия) и результатам специальных исследований.

Рассмотрен физический смысл введенного автором показателя, тесно связанного с поглощением и физической нелинейностью грунтов в виде площади подспектральной области нормализованного и реального спектров колебаний грунтов. Установлено соответствие особенностей изменения показателей динамического поведения грунтов (динамической жесткости грунта) и площади нормализованного и реального спектра грунтовых колебаний.

Показано, что в зависимости от уровня воздействия и прочности грунтов вполне отчетливо проявляется и может быть произведена относительная количественная оценка степени нелинейности и неупругости грунтов. Это позволило получить эмпирические соотношения для надежной и физически обоснованной дифференциации грунтов по их сейсмическим свойствам.

Ключевые слова: корреляционные связи, грунты, динамическая жесткость, поглощение, нелинейность, неупругость, площадь спектра, дифференциация грунтов.

1. Корреляционная связь между линейными и нелинейными характеристиками грунтов по инструментальным данным

Анализ полученных при Рачинском землетрясении записей ускорений показал, что показатели грунтового движения можно достаточно уверенно аппроксимировать полиномом заданной степени с помощью метода наименьших квадратов [Дон Лит, 1963]. Интересно сопоставить, в частности, зависимость площади реального спектра S_p от частоты с данными гистерезисного демпфирования (рис. 1). Хорошо видно, что в плотных грунтах зависимость характеризуется коэффициентом жесткости, а в рыхлых – коэффициентом потерь. Анализируя характер полученных зависимостей, можно увидеть, что характер кривых резко различен для рыхлых и плотных грунтов: и площадь реального спектра S_p прямо пропорциональна частоте воздействия для скальных грунтов и обратно пропорциональна для рыхлых грунтов. При нанесении обеих зависимостей на один график характер различий становится еще более наглядным. Параметр S_p был ранее введен нами для расчета приращения интенсивности на сопоставляемых грунтах при сейсмическом микрорайонировании [Заалишвили, 1996].

Видно, что для частот $f < 6$ Гц амплитуда колебаний рыхлых грунтов выше, чем жестких грунтов. При $f = 6$ Гц амплитуды колебаний совпадают – это т.н. критическая точка. С дальнейшим увеличением частоты колебаний амплитуда колебаний

жестких грунтов все более превышает амплитуду на рыхлых грунтах. Интересно сопоставить указанные зависимости с зависимостями коэффициента жесткости и коэффициента потерь от частоты колебаний (рис. 1), которые получены из данных для динамической жесткости [Нашиф и др., 1988]. Хорошо видно, что наблюдается хорошее соответствие, что важно с методической точки зрения.

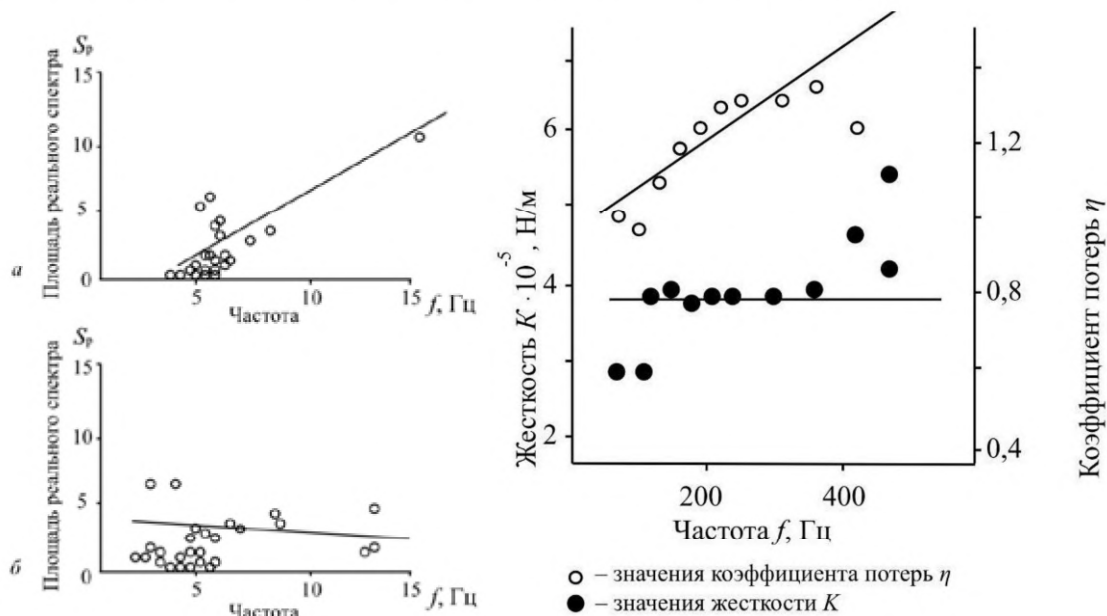


Рис. 1 Зависимости различных показателей от частоты колебаний:
– площади спектра колебаний S_p для плотных (а) и рыхлых (б) грунтов;
– жесткости K и коэффициента потерь η

Анализ поведения кривой динамической жесткости [Heikelom, Foster, 1960] показывает, что для рыхлого грунта (а здесь рассматривается именно рыхлый грунт) динамическая жесткость изменяется достаточно сложно (рис. 2). Так, на первом этапе, аналогично приведенным результатам анализа, с увеличением частоты коэффициент потерь (коэффициент потерь обратно пропорционален жесткости) сначала падает, а с частоты около 30 Гц начинает увеличиваться. Происходящее явление можно описать следующим образом. По мере увеличения частоты на начальном этапе развития деформаций (низкочастотный диапазон) коэффициент неупругого сопротивления падает, и затем, по мере уменьшения силового воздействия (переход в высокочастотный диапазон), коэффициент неупругого сопротивления растет.

Ранее нами было показано, что приращения интенсивности высоки для землетрясений малой силы в ближней зоне землетрясений и уменьшаются по мере увеличения магнитуды [Заалишвили, 2000]. В дальней зоне землетрясения по мере увеличения магнитуды приращение увеличивается. Другими словами, описание особенностей, характерных для процесса землетрясения, объясняется или может объясняться, в некоторой степени, особенностями динамического поведения грунтов. Зависимость динамической жесткости от частоты имеет явно выраженный нелинейный характер. Установлено соответствие особенностей изменения показателей динамического поведения грунтов (динамической жесткости грунта) и площади нормализованного и реального спектра грунтовых колебаний. С другой стороны, отношение жесткости к массе системы численно равно частоте ее собственных ко-

лебаний, а отношение коэффициента потерь к массе – затуханию системы.

Таким образом, площадь реального спектра колебаний жестких грунтов $S_p^ж$, отнесенная к соответствующей массе грунтовой толщи, где развиваются деформации, будет пропорциональна собственной частоте колебаний толщи, а площадь реального спектра рыхлых грунтов $S_p^р$ – затуханию колебаний толщи:

$$S_\delta^ж / m \sim \omega_0^2; \quad S_\delta^р / m \sim 2h. \quad (1)$$

Отсюда и значительные различия в их поведении. Другими словами, чем больше поглощение, тем больше площадь реального спектра в рыхлых грунтах при стандартном воздействии.

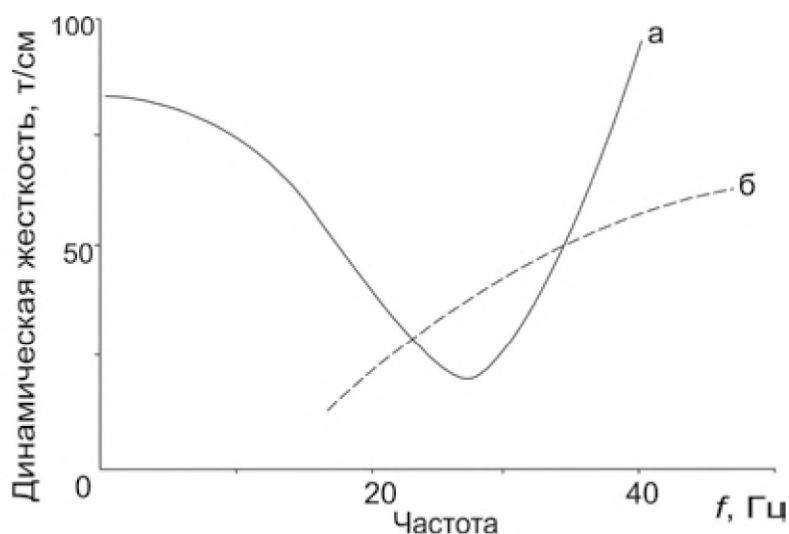


Рис. 2. Зависимость динамической жесткости от частоты колебаний:
а) рыхлые грунты; б) скальные грунты [Heikelom, Foster, 1960]

Позже с помощью специальных приемов были получены достаточно корректные значения длительности колебаний рассматриваемого землетрясения, что создало условия для высококачественного регрессионного анализа. На основе анализа связи различных величин с площадью нормализованного спектра для жестких и рыхлых грунтов, соответственно, были получены следующие корреляционные выражения:

$$S_H^ж = e^{-3,45} h^{0,03} f^{2,93} a^{0,34} r^{0,41} t^{0,81} M^{0,05}; \quad S_H^р = e^{-0,2} h^{0,05} f^{1,82} a^{0,06} r^{1,07} t^{1,07} M^{-0,43}. \quad (2)$$

где h – глубина очага землетрясения; M – магнитуда.

Можно с учетом значимости весового влияния указанных параметров записать:

$$S_H^ж = e^{-3,46} f^{2,93} a^{0,34} r^{0,41} t^{0,81}; \quad S_H^р = e^{-0,2} f^{1,82} r^{1,07} M^{-0,43}. \quad (3)$$

Коэффициенты корреляции весьма высоки ($R = 0,92-0,95$).

Дальнейшее уточнение или упрощение с учетом соответствующих размерностей привело к выражениям:

$$S_H^ж = 0,23 \frac{f^3 t \sqrt{ar}}{g}; \quad S_H^р = 0,82 \frac{f^2 t}{\sqrt{M}}. \quad (4)$$

Относительная погрешность расчетных значений $S_H^р$ не превышает 0,2. Как правило, погрешность много меньше.

В жестких грунтах параметр S_n^* , характеризующий поглощение, прямо пропорционален кубу частоты и длительности колебаний. Чем больше расстояние от эпицентра, тем, при данных условиях, больше поглощение и т. д. Для рыхлых грунтов параметр S_n^p прямо пропорционален квадрату частоты и длительности. С увеличением магнитуды (энергии воздействия) параметр уменьшается.

Далее можно записать зависимости «чистого» поглощения от параметров сейсмического воздействия для жестких и рыхлых грунтов соответственно:

$$\frac{S_n^*}{f} = 0,23 \frac{f^2 t \sqrt{ar}}{g}; \quad \frac{S_n^p}{f} = 0,82 \frac{ft}{\sqrt{M}}. \quad (5)$$

Явление уменьшения поглощения с увеличением магнитуды известно [Шебалин, Бузрукова, 1989]. Рассматриваемая зависимость справедлива для характеристики поведения рыхлых грунтов в ближней зоне землетрясения. Параметр S_n^p в рыхлых грунтах практически не зависит от ускорения, т. е. возникающее в процессе динамического воздействия ускорение не взаимосвязано с процессом поглощения. В то же время, чем больше магнитуда, тем меньше рассматриваемый параметр. В жестких грунтах он почти не зависит от магнитуды и значительно зависит от ускорения.

Результаты расчетов приведены в табл. 1. Станция Они расположена на скальных грунтах, а Амбролаури – на рыхлых.

На основе исследований по оценке виброчувствительных грунтов можно сделать вывод о пропорциональности амплитуды (например, ускорений a) колебаний продолжительности t колебаний. Оценки показывают, что коэффициент пропорциональности не превышает при этом значения $\sqrt{2}$. С учетом изложенного, систему выражений (5) можно переписать в виде:

$$S_n^* = 0,27 \frac{f^3 t \sqrt{tr}}{g}; \quad S_n^p = 0,82 \frac{f^2 t}{\sqrt{M}}. \quad (6)$$

Таким образом, можно рассматривать параметр S_n^* в виде, явно не зависящем от ускорения. Полученные результаты, очевидно, интересны не только с методической точки зрения.

Далее с помощью регрессионного анализа были установлены корреляционные связи пиковых значений амплитуд спектра колебаний грунтов с динамическими параметрами воздействия и реакции толщи (для жестких и рыхлых грунтов соответственно):

$$A_0^* = 0,35 a^{0,64} r^{0,6} M^{0,42}; \quad A_0^p = 0,088 a^{0,42} r^{0,08} M^{2,45}. \quad (7)$$

После уточнения размерностей и округления значений степеней получим:

$$A_0^* = 1,39 \cdot 10^{-2} \sqrt{aMr}; \quad A_0^p = 0,28 M^{2,5} \sqrt{ag}. \quad (8)$$

Хорошо видно, что величины A_0^* в основном определяются ускорением, тогда как величины A_0^p – исключительно магнитудой (например, землетрясение Ниигата).

Существует не только амплитудный уровень нелинейности, но и область значений, где можно наблюдать взаимодействие или «противостояние» явлений поглощения и нелинейности.

Так, в рыхлых грунтах хорошо видна т. н. зона «балансирования», где действие обоих факторов равно. С увеличением ускорения S_n^p стремится к уменьшению, а A_0^p – к увеличению. При достижении больших ускорений поглощающие свойства

толщи исчерпываются и пик спектра – максимален. Область «балансирования» значительна у глинистых грунтов и мала у крупнообломочных и скальных грунтов.

Таким образом, S_p – площадь реального спектра колебаний грунтовой – является непосредственный показатель интегральной реакции грунтовой толщи, связанный с явлениями поглощения, рассеивания и нелинейности, взаимодействующих между собой.

Таблица 1

Исходные данные и результаты расчетов S_n .

Они						Амбролаури					
S_n , с ⁻¹	$f_{св}$, Гц	A , м/с ²	r , 10 ³ , м	t , с	S_n , расч., с ⁻¹	S_n , с ⁻¹	$f_{св}$, Гц	A , м/с ²	r , 10 ³ , м	t , с	S_n , расч., с ⁻¹
21	3,67	0,07	19,2	15,4	21	3070	19,8	16,10	13,0	3,3	2850
214	4,87	0,83	18,4	32,0	345	96	3,17	17,45	17,6	4,0	72
85	5,46	0,17	19,2	15,8	110	88	3,84	14,68	24,0	3,9	90
162	5,39	0,34	21,6	19,1	193	280	3,85	36,27	16,0	5,3	192
123	4,97	0,39	15,2	16,8	121	111	4,68	15,20	16,0	3,0	158
141	6,18	0,11	21,6	16,4	142	196	4,49	17,00	18,4	3,3	155
128	5,76	0,14	19,2	19,3	144	786	11,0	14,70	23,2	3,4	815
169	5,02	0,44	16,8	25,8	212	85	2,62	27,25	24,8	5,0	69
68	4,62	0,13	16,0	16,1	55	147	5,36	15,63	21,6	3,3	203
31	3,99	0,11	23,2	15,9	39	763	10,3	15,76	19,2	3,2	766
132	5,57	0,12	20,8	17,4	113	238	4,89	17,62	9,6	2,3	228
69	4,88	0,14	17,6	15,2	66	446	5,15	37,66	11,2	4,7	378
41	4,34	0,12	13,6	15,8	66	408	6,52	19,37	12,8	3,8	346
84	5,14	0,34	13,6	15,7	109	187	4,58	21,84	11,2	4,5	177
174	5,47	0,72	13,6	20,6	252	354	5,49	20,33	13,6	3,5	269
242	5,70	0,44	18,4	23,0	289	221	5,39	14,72	21,6	2,4	266
34	3,68	0,11	24,8	15,3	30	71	2,60	24,16	32,8	4,7	62
54	4,49	0,09	21,6	16,2	49	568	8,50	16,95	6,4	3,4	545
387	8,07	0,39	12,8	16,2	409	635	8,42	18,18	29,6	2,2	713
109	5,55	0,11	21,6	17,3	109	1500	13,3	15,20	2,4	1,7	1691

На основе соответствующих выражений далее получим формулу для расчета площади реального спектра в жестких и рыхлых грунтах, соответственно:

$$S_p^* = 0,002 f^3 \operatorname{tar} \sqrt{M}; \quad S_p^p = 0,23 M^2 f^2 t \sqrt{ag} . \quad (9)$$

Таким образом, получены зависимости, связывающие параметры воздействия ожидаемого землетрясения с ожидаемым спектральным проявлением на конкретной строительной площадке.

Проанализируем явления поглощения в грунтах различного вида. Статистический анализ при оценке сейсмической опасности имеет свои особенности [Онофраш, 1981], но поглощение, являясь, как показывает изложенное ранее, весьма важной характеристикой среды, все еще объясняется с позиции допущений. Здесь остается весьма много неясного [Knopoff, 1959; Kumbasar, Erguvanli, 1975; Seale, Archuleta, 1989], несмотря на существование целого ряда моделей среды [Mohammad, 1989] и применения нестандартного анализа [Nikolaev, 1989]. Очевидно, что именно особенностями в механизмах поглощения может объясняться различие в степени зависимости S_n от ускорения. Так, для рыхлых грунтов, по достижении определенно-

го значения ускорения, частота становится прямо пропорциональной ускорению, тогда как для малых ускорений наблюдается обратная пропорциональность. Для жестких грунтов частота колебаний **всегда** прямо пропорциональна ускорению. Отсюда можно сделать вывод, что при достижении определенных значений ускорения, рыхлый грунт становится «жестким», ограничиваясь в большинстве случаев, скорее, тенденцией.

Таким образом, в качестве показателя рыхлости достаточно уверенно можно использовать площадь нормализованного спектра колебаний, точнее, степень и характер его зависимости от ускорения.

Отметим, что зависимость указанного параметра от магнитуды подобных повышений не дает. Это, очевидно, объясняет весьма противоречивый характер их взаимосвязи. Добавим, что характер колебаний крупнообломочных (База) и глинистых грунтов – соответствует друг другу в отличие от скальных грунтов (Они).

Другими словами, можно заключить, что при переходе от площади нормализованного (S_n) к площади реального спектра (S_p) происходит смена некоторых определенных механизмов, обуславливающих грунтовое движение. В то же время рассматриваемые параметры отличаются лишь одним множителем – пиком или максимальной амплитудой спектральной кривой.

Известно [Nikolaev, 1989], что поглощение и нелинейность суть два противоположных эффекта, в основе которых лежат различные механизмы движений. Анализ полученных данных показал, что площадь реального спектра S_p есть показатель интегрального воздействия обоих механизмов [Заалишвили, 1997]:

$$S_p \sim \alpha A_0 f_{cs} \quad (10)$$

При этом показателем «чистой» нелинейности будет произведение пикового значения амплитуды на средневзвешенную частоту и его можно использовать в качестве показателя степени нелинейности грунтов при расчете приращения интенсивности или приращения интенсивности грунтов на районируемой территории, причем она имеет более глубокий смысл.

2. Анализ колебаний нелинейной, поглощающей грунтовой среды по данным инструментального метода сейсмического микрорайонирования

Проявления физической нелинейности грунтов при сильных воздействиях мало исследованы. Были лишь отдельные работы в этой области [Николаев, 1967]. Объяснялось это, с одной стороны, сложностью проблемы, а с другой, – тем, что вклад нелинейности грунтов в формирование проявления землетрясений долгое время считался незначительным [Аки, 1988]. Анализ данных обследования ряда сильных землетрясений, происшедших в последние годы, показал, что влияние нелинейности может быть значительным. Это обусловило резкое изменение отношения к данной проблеме [Николаев, 1987; Заалишвили, 2000; Field et al., 1998; Zaalishvili, 2001].

Чтобы оценить нелинейные и поглощающие свойства грунтов, были проведены исследования на территории г. Тбилиси с помощью мощного вибрационного источника СВ-10/100. На основе инженерно-геологических данных были выбраны 6 участков с типичными инженерно-геологическими условиями.

С помощью источника СВ-10/100 в грунтовой толще возбуждались «сви́п» – сигналы в пределах 1-100 Гц и проводились наблюдения сейсморазведочного типа.

Длительность воздействия составляла 2 и 12 с. Колебания регистрировали аналоговой аппаратурой. Далее проводили оцифровку записей колебаний и строили амплитудные спектры Фурье (рис. 3). В качестве исходных параметров рассматривали максимальные амплитуды спектра, средневзвешенную частоту колебаний и площадь реального спектра колебаний грунтов. Кроме того, рассчитывали показатели нелинейности и «чистой» нелинейности, показатели поглощения и «чистого» поглощения (табл. 2), которые тесно связаны с грунтовым движением [Заалишвили, 2000].

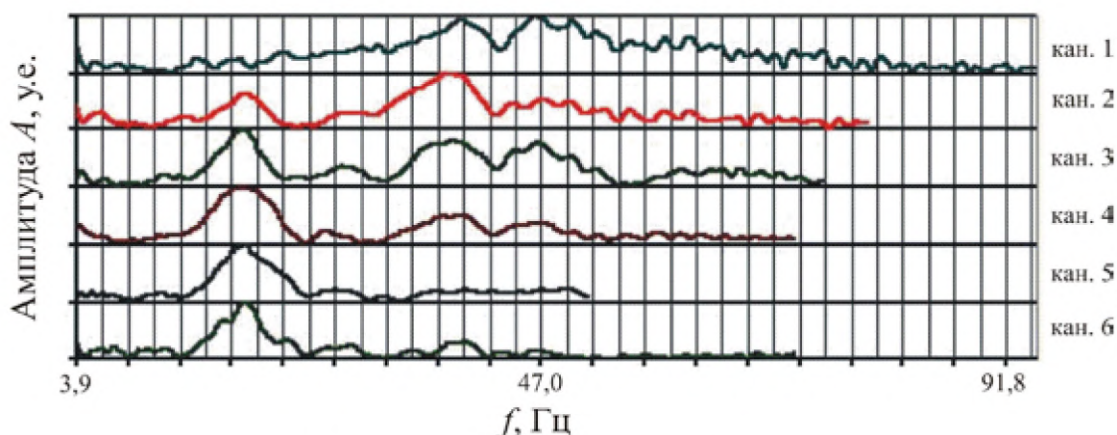


Рис. 3. Спектр колебаний грунта при «свит» – сигнале

Чтобы количественно оценить вариации нелинейности, попробуем использовать их тесную связь с величиной приращений интенсивности. С помощью соответствующих формул [Заалишвили, 2000] были рассчитаны приращения бальности (табл. 3). В качестве эталонного грунта в данном расчете рассматривались грунты участка №3. В качестве сопоставляемых данных использовали показатели колебаний грунтов ближней зоны источника.

Анализ данных показывает, что приращение интенсивности в скальных грунтах (участок №1), рассчитанное по формуле с индексом (1), составляет 0,7 балла. Приращение, полученное по формуле с индексом (2), составило всего 0,02 балла. Еще большая аномалия наблюдается для грунтов участка №2, представленных в виде озерно-болотных отложений. Здесь приращения интенсивности составляют 0,1 и 0,2 балла соответственно, т. е. формулы с индексами (1) и (2) здесь не «работают». С удалением от источника приращения интенсивности на канале 2, рассчитанные по обеим формулам, составляют 1,2 балла, для следующего пункта измерения (канал 3) – 1,6 и 1,4 балла и далее приращения начинают уменьшаться вплоть до отрицательных значений. Аналогичная картина наблюдается и для других участков.

В ближней зоне источника, т. е. в области с высоким уровнем воздействия спектр колебаний «растекается» в НЧ и ВЧ области спектра. С удалением от источника ВЧ составляющая колебаний грунтов поглощается, и средневзвешенная частота колебаний становится меньше. Этот эффект слабо заметен на скальных грунтах (табл. 2, участок №1) из-за малого поглощения и высокой частоты собственных колебаний скальных грунтов.

Таким образом, в области, примыкающей к источнику ($\Delta=1,5$ м), в нелинейных грунтах преобладают неупругие или остаточные деформации, которые не регистрируются инерционными сейсмоприемниками. С удалением от источника амплитуды

Таблица 2

Показатели колебаний грунтов при кратковременном воздействии

№ уч.	№ канала	Максимальная амплитуда спектра колебаний	Средневзвешенная частота колебаний	Показатель нелинейности	Показатель «чистой» нелинейности		Показатель поглощения	Показатель «чистого» поглощения	Коэффициент потерь
		A	$f_{св}$		S_p	$A \cdot f_{св}$			
1	1	590	54,4	10704,0	32096,0	196,8	18,1	0,3	0,3
	2	—	—	—	—	—	—	—	—
	3	73,4	63,6	1022,8	4668,2	16,1	14,0	0,2	0,2
	4	39,3	60,3	433,7	2369,8	7,2	11,0	0,2	0,2
	5	54,7	55,0	395,3	3008,5	7,2	7,2	0,1	0,2
	6	77,8	56,7	612,7	4411,3	10,8	7,9	0,1	0,1
2	1	894,0	39,0	29784,0	34866,0	763,7	33,3	0,9	0,7
	2	375,0	36,0	10709,5	13500,0	297,5	28,6	0,8	0,7
	3	130,0	30,3	3701,8	3939,0	122,2	28,5	0,9	0,4
	4	97,8	22,5	1354,2	2200,5	60,2	13,8	0,6	0,7
	5	55,1	22,3	708,8	1228,7	31,8	12,9	0,6	0,3
	6	34,6	20,3	412,3	702,4	20,3	12,0	0,6	0,2
3	1	772,0	42,1	22674,0	32501,2	538,6	29,4	0,7	0,6
	2	177,0	30,8	2792	5451,6	90,7	15,8	0,5	0,4
	3	57,2	23,4	584,6	1338,5	25,0	10,2	0,4	0,2
	4	46	25,4	510,4	1168,4	20,1	11,1	0,4	0,2
	5	87,7	23,7	879,3	2078,5	37,1	10,0	0,4	0,2
	6	87,1	23,0	654,4	2003,3	28,5	7,5	0,3	0,2
4	1	875,0	47,3	27690,0	40299,6	585,4	32,5	0,7	0,7
	2	211,5	39,8	4831,5	8417,7	121,4	22,8	0,6	0,4
	3	80,6	38,6	1903,2	3111,2	49,3	23,6	0,6	0,2
	4	51,8	32,9	921,0	1704,2	28,0	17,8	0,5	0,2
	5	50,6	26,2	584,7	1325,7	22,3	11,6	0,4	0,2
	6	33,6	27,8	387,6	934,1	14,0	11,5	0,4	0,2
6	1	1512	41,4	58568,0	62596,8	1414,7	38,7	0,9	0,8
	2	532,0	31,9	11758,0	16970,8	368,6	22,1	0,7	0,6
	3	115,6	24,8	1421,4	2866,9	57,3	12,3	0,5	0,2
	4	39,1	23,0	515,4	899,3	22,4	13,2	0,6	0,2
	5	37,9	24,4	419,2	924,8	17,2	11,1	0,5	0,1
	6	26,4	22,5	307,4	594,0	13,7	11,6	0,5	0,1

колебаний постепенно увеличиваются, т. к. неупругие колебания «трансформируются» в упругие (при этом частично поглощаясь), достигая этого состояния на расстоянии 11,5 м (канал № 3), где приращение интенсивности максимально.

Затем начинает преобладать процесс воздействия поглощения, который в слабых по величине выше, чем в средних или скальных грунтах. В частности, грунты участка № 6 в виде макропористых супесей, характеризуясь более высоким показателем поглощения, достигают линейно-упругого состояния уже на расстоянии 6,5 м. Таким образом, при использовании формул с индексами (1) и (2) необходимо удалять сейсмоприемники соответствующих каналов на расстояния порядка 5-12 м.

Приращения интенсивности можно определять и с помощью т. н. формул «неупругости» с индексами (3) и (4) [Заалишвили, 2000]. В них сопоставляются показатели движения грунтов в ближней и дальней зонах источника. Наибольшее приращение интенсивности наблюдается для грунтов участка № 6. Завышенное

Таблица 3

Приращения интенсивности грунтов

№ участка	№ канала	ΔI_1	ΔI_2	ΔI_3	ΔI_4
1	1	-0,7	-0,02	-0,7	-1,2
	2	-0,5	-1,6		
	3	-0,1	0,9		
	4	-0,7	0,5		
	5	-0,1	1,0		
	6				
2	1	0,2	0,1	0,8	1,6
	2	1,2	1,2		
	3	1,6	1,4		
	4	0,8	0,8		
	5	-0,2	-0,7		
	6	-0,4	-1,4		
3	1	–	–	–	–
	2	–	–		
	3	–	–		
	4	–	–		
	5	–	–		
	6	–	–		
4	1	0,2	0,3	0,8	1,4
	2	0,5	0,6		
	3	1,0	1,1		
	4	0,5	0,5		
	5	-0,4	-0,6		
	6	-0,5	-1,0		
6	1	0,8	0,9	1,8	2,7
	2	1,2	1,5		
	3	0,8	1,0		
	4	0,01	-0,3		
	5	-0,6	-1,1		
	6	-0,7	-1,6		
$\Delta I_1 = 2 \lg \frac{S_{pi}}{S_{p0}} \quad (1), \quad \Delta I_2 = 3 \lg \frac{A_i f_{cvi}}{A_0 f_{cv0}} \quad (2), \quad \Delta I_3 = 2,4 \lg \frac{S_{pi6} S_{p0d}}{S_{pid} S_{p06}} \quad (3),$ $\Delta I_4 = 3,3 \lg \frac{(A_i f_{cvi})_6 (A_0 f_{cv0})_d}{(A_i f_{cvi})_d (A_0 f_{cv0})_6} \quad (4).$					

значение приращения интенсивности (2,7 балла при использовании показателя «чистой» нелинейности в формуле с индексом (4)) обусловлено сильным поглощением в макропористых супесях для ближней и дальней зон источника. Кроме того, грунты участка №3 (глины п/тв, мощностью 4,5 м, подстилаемые галечниками и скальными грунтами) характеризуются в дальней зоне высоким значением показателя «чистой» нелинейности из-за выхода на поверхность волн, преломленных на подстилающих скальных грунтах. Тем не менее, среднее значение приращения интенсивности полученное по обеим формулам, составляет 2 балла, а для грунтов участков №2 и №4-1 балл и т. д.

Таким образом, при выборе эталонного участка (в случае использования мощных источников и динамических показателей движения) необходимо избегать участков с неоднородными грунтовыми условиями и близкими к поверхности под-

стилающими скальными грунтами. В то же время использование обеих формул «неупругости» позволяет путем осреднения получать физически обоснованные значения даже в таких «неблагоприятных» условиях.

Особый интерес представляет анализ вариаций показателя «чистого» поглощения. Видно, что этот показатель для скальных грунтов соответствует $S_n/f_{cb}=0,1-0,3$, для «средних» – $S_n/f_{cb}=0,3-0,7$ и для рыхлых или «слабых», характеризуемых высокой нелинейностью, $S_n/f_{cb}=0,6-0,9$. Максимальные значения S_n/f_{cb} характерны для ближней зоны источника, т. е. поглощение энергии для всех видов грунтов в ближней зоне наибольшее. В связи с этим интересно оценить значения коэффициента потерь η . Расчеты коэффициента потерь для грунтов проводили с помощью т. н. способа «ширины резонансной амплитуды» [Нашиф и др., 1988].

Сопоставление полученных данных (табл. 2) показывает, что показатель «чистого поглощения» весьма близок по значениям к коэффициенту потерь η *особенно в скальных грунтах* и меняется адекватно ему. Напрашивается вывод, что показатель «чистого» поглощения, очевидно, и есть коэффициент потерь. Вопрос этот, несомненно, требует дополнительных исследований.

Таким образом, показатели нелинейности, используемые в формулах приращений интенсивности, позволяют оценивать напряженно-деформированное состояние грунтов (линейная упругость, нелинейная упругость, неупругость). С другой стороны, если принять, что показатель «чистого» поглощения представляет собой коэффициент потерь, то это позволит широко использовать легко рассчитываемый показатель «чистого» поглощения для оценки многих задач инженерной сейсмологии и сейсмостойкого строительства, а также повысить надежность получаемых данных. В частности, указанные показатели могут быть использованы при энергетическом расчете зданий, сооружений и т. д.

3. Применение корреляционных зависимостей для сейсмического микрорайонирования

При расчете с помощью существующих выражений интенсивности для участков с различными инженерно-геологическими условиями в неявной форме подразумевается учет особенностей поведения грунтов при сильных сейсмических воздействиях. Традиционно никак не учитывается при этом влияние собственно проявления уровня интенсивности сейсмического воздействия. Расчеты для 7-, 8-, и 9-балльных потенциально опасных участков основаны на принципе постоянства приращения интенсивности (относительно эталонного грунта, которому приписывается исходная сейсмичность). Другими словами, приращения интенсивности рассчитывают независимо от уровня ожидаемого сейсмического воздействия и, таким образом, известные эмпирические соотношения СМР, основанные на результатах инженерного макросейсмического изучения последствий разрушительных землетрясений, линейно отображают изменения прогнозируемой интенсивности.

Не менее важный вопрос – учитывать частотную избирательность грунтов при расчете приращения интенсивности. Если использовать невзрывные искусственные источники, то вопрос этот достаточно надежно можно решить оценивая параметры реакции грунтовой толщи на воздействие мощных импульсного и вибрационного источников с помощью соответствующих выражений. В указанные эмпирические зависимости входят соответствующие частотно-зависимые величины.

И, наконец, весьма заманчиво – решать практические задачи, непосредственно прогнозируя особенности нелинейного поведения грунтов при сильных динами-

ческих воздействиях [Заалишвили, Рогожин, 2011]. Отметим, что третий вопрос неотделим от первого, являясь составной частью оценки влияния интенсивности воздействия на результаты расчетов приращения интенсивности грунтов.

Предварительные итоги. Получен ряд эмпирических формул для расчета приращения интенсивности грунтов при СМР территории города или большой строительной площадки [Заалишвили, 2009]:

$$\Delta I = 2 \lg \frac{S_{p1}}{S_{p2}} \text{ (площадь виброспектров),} \quad (11)$$

$$\Delta I = 3 \lg \frac{\rho_1 V_1 \Delta V_1}{\rho_2 V_2 \Delta V_2} \text{ (тензочувствительность),} \quad (12)$$

$$\Delta I = 3 \lg \frac{\theta_1}{\theta_2} \text{ (постоянная составляющая),} \quad (13)$$

$$\Delta I = 3 \lg \frac{A_1 f_1}{A_2 f_2} \text{ (спектральная нелинейность),} \quad (14)$$

С помощью формулы (11) проведено большое число СМР территорий гг. Тбилиси, Ткибули, Кутаиси, Б. Сочи и площадок Нововоронежской АЭС. Формулы (13) и (14) успешно использовали при СМР территории Нововоронежской АЭС. Формула (12) весьма перспективна, но ее еще не использовали в практических работах. Разработанные подходы активно используются при решении научно-практических задач [Аракелян и др., 2008].

Формулы (12) – (14) – выражения, с помощью которых непосредственно сопоставляются показатели нелинейности грунтов. И строго говоря, они оценивают одну и ту же т. н. «чистую» нелинейность различными способами.

Выводы

Приведены корреляционные взаимосвязи между линейными и нелинейными характеристиками грунтов, установленные по данным записей колебаний различных грунтов, зарегистрированных при сильном Рачинском землетрясении 1991 года (Грузия) и результатам специальных исследований.

Рассмотрен физический смысл введенного автором показателя тесно связанного с поглощением и физической нелинейностью грунтов в виде площади подспектральной области нормализованного и реального спектров колебаний грунтов.

Установлено соответствие особенностей изменения показателей динамического поведения грунтов (динамической жесткости грунта) и площади нормализованного и реального спектра грунтовых колебаний.

Показатель «чистого» поглощения в виде отношения нормализованного спектра к частоте колебаний фактически представляет собой коэффициент потерь.

Показано, что в зависимости от уровня воздействия и прочности грунтов вполне отчетливо проявляются нелинейность и неупругость грунтов. Это обуславливает возможность относительных количественных оценок степени нелинейности и неупругости грунтов. На основе исследования получены эмпирические соотношения для надежной и физически обоснованной дифференциации грунтов по их сейсмическим свойствам.

Установлено, что показатели нелинейности в формулах приращений интенсивности позволяют оценивать напряженно-деформированное состояние грунтов (линейная упругость, нелинейная упругость, неупругость).

Это позволит широко использовать легко рассчитываемый показатель «чистого» поглощения при решении многих задач инженерной сейсмологии и сейсмостойкого строительства, а также повысить надежность получаемых данных. В частности, указанные показатели поглощения могут быть использованы при энергетическом расчете зданий, сооружений и т. д.

Литература

1. Аракелян А.Р., Заалишвили В.Б., Макиев В.Д., Мельков Д.А. К вопросу сейсмического районирования территории республики Северная Осетия-Алания // Опасные природные и техногенные геологические процессы на горных и предгорных территориях Северного Кавказа. Центр геофизических исследований ВНЦ РАН и РСО-А, Заалишвили В.Б. (редактор), Владикавказский научный центр РАН и РСО-А. 2008. С. 263-278.
2. Дон Лит Л. Сейсмическое действие взрыва. М.: Госгортехиздат, 1963. 86 с.
3. Заалишвили В.Б. Сейсмическое микрорайонирование на основе изучения нелинейных свойств грунтов искусственными источниками. Автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. М.: МГУ, 1996.
4. Заалишвили В.Б. Инструментальный метод сейсмического микрорайонирования, Владикавказ, 1997. 76 с.
5. Заалишвили В.Б. Физические основы сейсмического микрорайонирования. М.: ОИФЗ РАН, 2000. 367с.
6. Заалишвили В.Б. Сейсмическое микрорайонирование территорий городов, населенных пунктов и больших строительных площадок. – М.: – Наука, 2009. 350 с.
7. Заалишвили В.Б., Рогожин Е.А. Оценка сейсмической опасности территории на основе современных методов детального районирования и сейсмического микрорайонирования // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2011. №3. С. 31-43.
8. Нашиф А., Джоудж Д., Хендерсон Дж. Демпфирование колебаний. М.: Мир. 1988. 448 с.
9. Николаев А.В. Сейсмические свойства рыхлой среды // Изв. АН СССР. Сер. физика Земли. 1967. С. 23-31.
10. Николаев А.В. Проблемы нелинейной сеймики. // Проблемы нелинейной сеймики М.: Наука. 1987. С. 5-20.
11. Онофраш Н.И. Статистические методы картирования сейсмической опасности. Кишинев: Штиинца, 1981. 86 с.
12. Шебалин Н.В., Бузрукова Д.И. Затухание сейсмических сотрясений и добротность среды. Оценка эффекта сильных землетрясений // Вопросы инженерной сейсмологии. Вып. 30. М.: Наука, 1989. С. 63-72
13. Aki K. Local site effects on strong ground motion / L. Von Thun. Ed. Earthquake Engineering and Soil Dynamics, II Recent Advances In Ground Motion Evaluation // Amer. Soc. of Civil Engineers. Geotechnical Special Publication. 1988. No. 20. Pp. 103-155.
14. Field E.H., Kramer S., Elgam A.W. et al. Nonlinear Site Response: Where we're at (a report from a SCEC/PEER seminar and workshop) // Seismol. Res. Lett. May/June

1998. Vol. 69. No 3.

15. Heikelom W., Foster C.R. Dynamic testing of pavements // J. of the Structural Division: Proc. of the American Soc. of Civil Engineerings, SM 1, Feb. 1960. Pp. 2368-2373.

16. Knopoff L.Q. Scattering of shear waves by spherical obstractles // Geophysics. 1959. Vol. 24. Pp. 209-219.

17. Kumbasar V., Erguvanli A. The damping characteristics of cohesive soils Determined experimentally // Proc. of 5th European Conf. on Earthquake Eng. Vol. 1. Istanbul, 1975.

18. Mohammad Q. Attenuation properties of viscoelastic material // PA GEOPH. 1989. Vol. 131. No 4. Pp. 703-713.

19. Nikolaev A.V. Scatterins and dissipation // Appl. Geophys. 1989. Vol. 131. N 4. Pp 687-702.

20. Seale S.H., Archuleta, Ralph Site amplification and attenuation of strong ground motion // J.Bul. Seismol. Soc. Amer. 1989. Vol 79, No 6. Pp. 1673-1696.

21. Zaalishvili V. Strong motion in absorbing nonlinear medium and problems of their registrationю strong motion instrumentation for civil engineering structures. Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands. – Istanbul, 2001, pp. 611-621.

DOI: 10.23671/VNC.2014.4.55476

INTERRELATIONS BETWEEN THE LINEAR AND NONLINEAR CHARACTERISTICS OF SOILS ACCORDING TO INSTRUMENTAL DATA

© 2014 V.B. Zaalishvili, Dr. Phys.-Math. Sci., Prof.

Center of Geophysical Investigations VSC RAS & RNO-A, 93a, Markov st.,
Vladikavkaz, 363002, Rossia, E-mail: vzaal@mail.ru

In the work the correlation interrelations between the linear and nonlinear characteristics of soils, established according to the data of the records of the fluctuations of different soils, registered with strong Rachinskiy earthquake of 1991 (Georgia) and to the results of special studies is given.

Is examined the physical sense of the introduced by the author index, closely related to the absorption and the physical nonlinearity of the soils in the form of the area of the under spectra region of the normalized and real oscillation spectra of soils. The correspondence of the special features of a change in the indices of the dynamic behavior of soils (dynamic hardness of soil) and area of the normalized and real spectrum of ground of fluctuations is established.

It is shown that depending on the level of action and strength of soils the relative quantitative assessment of the degree of nonlinearity and inelasticity of soils completely distinctly is manifested and can be produced. This made it possible to obtain empirical relationships for the reliable and physically substantiated differentiation of soils according to their seismic properties.

Key words: correlations, soils, dynamic hardness, absorption, nonlinearity, inelasticity, the area of spectrum, the differentiation of the soils.