

УДК 550.347

DOI: 10.23671/VNC.2015.4.55293

ВЛИЯНИЕ ТИПОВ ГРУНТОВ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ СИЛЬНЫХ ГРУНТОВЫХ ДВИЖЕНИЙ

© 2015 А.Н. Баскаев^{1,2}, к.т.н., К.С. Харебов¹, к.т.н.

¹Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: cgi_ras@mail.ru;

²Горский государственный аграрный университет, Россия, 362040, г. Владикавказ, ул. Кирова, 37

Проведено исследование влияния различных видов грунтов на интенсивность проявления сильных грунтовых движений на примере записей базы данных, созданной авторами. Для различных типов грунта (скала, песок, гравий, ил, глина) получены корреляционные зависимости интенсивности от логарифма пикового горизонтального ускорения и от гипоцентрального расстояния по отдельности. Показано, что при высоких магнитудах интенсивность проявляется на различных грунтах в порядке убывания следующим образом: глина, песок, ил, гравий, скала. Проведенное исследование показало слабую зависимость интенсивности от скорости поперечной волны. Проведенное сравнение корреляционных зависимостей интенсивности от магнитуды и от гипоцентрального расстояния для записей базы данных SMDBCGI с уравнением Шебалина, показало что точность формулы авторов для всех типов грунтов и формулы Шебалина одинакова в пределах ошибки. Показано, что для станций системы KNET лучше использовать формулу корреляционной зависимости интенсивности от магнитуды и от логарифма пикового горизонтального ускорения, чем от магнитуды и от логарифма гипоцентрального расстояния.

Ключевые слова: интенсивность землетрясения, магнитуда, горизонтальное ускорение, гипоцентрального расстояние, грунты, базы данных, сильные грунтовые движения.

Выбор типов грунтов

В соответствии с параметрами грунтов станций KNET [Kinoshita, 2003; Заалишвили и др., 2014] была проведена классификация грунтов [Заалишвили и др., 2009] на следующие категории (табл. 1).

Таблица 1

Усредненные показатели исследуемых грунтов

Грунт	Скорость волн		Плотность г/см ³
	продольных, м/с	поперечных, м/с	
Скала	1844	628	2,04
Песок	1384	236	1,72
Гравий	1674	456	1,92
Ил	1352	152	1,66
Глина	1465	197	1,69

Средние значения параметров сильных грунтовых движений на различных грунтах приведены в табл. 2. Судя по средним значениям параметров (табл. 2) интенсивность проявления землетрясения наибольшая на иле, песке, глине. На скале и гравии интенсивность наименьшая. На иле интенсивность в среднем на 18% выше, чем на скале. Максимальные горизонтальные ускорения – на песке, глине,

гравии. Наименьшие максимальные горизонтальные ускорения – на иле. Есть различие между вертикальным и горизонтальным ускорениями. Так, для гравия горизонтальное ускорение почти такое же, как и для песка, а вертикальное ускорение у песка значительно превышает аналогичный показатель у гравия.

Таблица 2

**Средние значения параметров сильных грунтовых движений
на различных грунтах**

Параметр	Все Записи	Скала	Песок	Гравий	Ил	Глина
Магнитуда	4,7	4,9	4,8	4,7	4,9	4,7
Интенсивность, балл	3,7	3,4	3,9	3,4	4,0	3,7
Максимальное вертикальное ускорение	7,6	5,5	8,5	6,1	6,5	6,9
Максимальное горизонтальное ускорение	19,7	13,1	18,9	18,4	12,5	15,8

Зависимость интенсивности от максимального ускорения

На основании расчетов корреляций интенсивности с параметрами землетрясений выяснено следующее. Интенсивность сильнее всего зависит от максимального ускорения. Зависимость имеет логарифмический характер. Для глины, песка – интенсивность растет сильнее, чем для других грунтов. Немного слабее зависимость для ила. Интенсивность меньше всего зависит от максимального ускорения для скалы и гравия.

Рассмотрим зависимости интенсивности землетрясения (**Int**) только от **lg** (**Acc**) – логарифма пикового горизонтального ускорения (табл. 3).

Таблица 3

**Зависимость интенсивности от логарифма
пикового горизонтального ускорения**

Грунт	Формула	R ²
Скала	$Int = 1,76 + 1,76 \cdot \lg (Acc)$	0,59
Песок	$Int = 1,72 + 2,28 \cdot \lg (Acc)$	0,82
Гравий	$Int = 1,67 + 1,74 \cdot \lg (Acc)$	0,68
Ил	$Int = 2,28 + 1,84 \cdot \lg (Acc)$	0,61
Глина	$Int = 1,59 + 2,45 \cdot \lg (Acc)$	0,79
Все	$Int = 1,623 + 2,05 \cdot \lg (Acc)$	0,72

В этих формулах есть определенная ясность. Увеличение пикового горизонтального ускорения в 10 раз ведет к приращению интенсивности воздействия на 1,76 балла для скалы, 2,28 – для песка, 1,74 – для гравия, 1,84 – для ила, 2,45 – для глины, 2,05 – для всех записей. Отсюда следует, что приращение интенсивности в 1 балл на скале соответствует приращению в 1,3 балла на песке, и в 1,4 балла на глине.

Зависимость интенсивности от гипоцентрального расстояния

Можно построить зависимости интенсивности от гипоцентрального расстояния при разных магнитудах (рис. 1). При высоких магнитудах графики разных грунтов хорошо разделяются; интенсивность на скале и гравии ниже, чем на других грунтах. При малых магнитудах – зависимость более смазана.

Исследование зависимости интенсивности от гипоцентрального расстояния при разных грунтах показало, что приращению интенсивности на 1 балл на скальных грунтах соответствует приращение на 1,3 балла на гравии и иле, 1,9 на песке и 2,1 на глине.

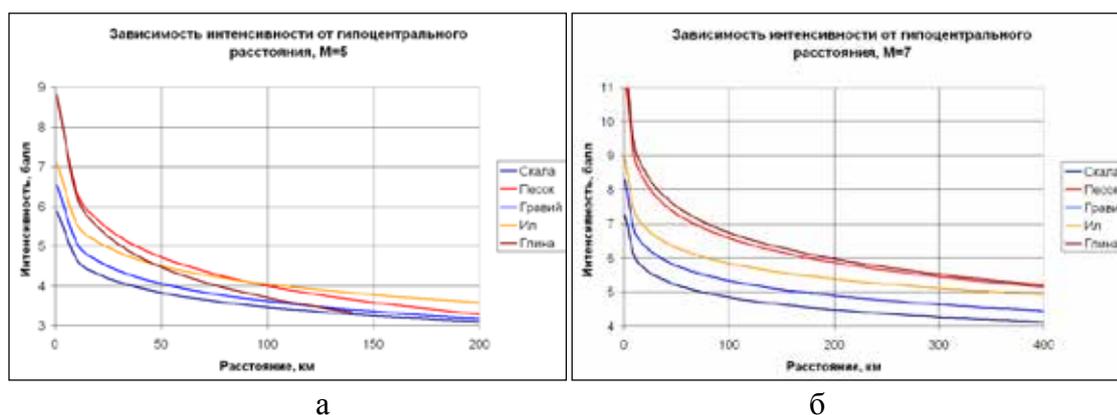


Рис. 1. Зависимость интенсивности от гипоцентрального расстояния а) – для магнитуды 5, и б) – для магнитуды 7, для разных грунтов.

Зависимость интенсивности от скорости поперечной волны

Параметры грунтов в базе данных [Заалишвили и др., 2014] описываются плотностью грунта, скоростями продольной и поперечной волн. Вычислительные эксперименты показали практическое отсутствие зависимости интенсивности от плотности и скорости продольной волны. Имеется слабая зависимость интенсивности от скорости поперечной волны. Для того чтобы выделить «чистую» зависимость интенсивности от скорости поперечной волны выделяли событие с определенной магнитудой, и рассматривали зависимости в достаточно узких диапазонах эпицентральных расстояний. Было рассмотрено 5 выборок.

Выборка 1. Сейсмическое событие от 11.03.2011 г. 14:46. Магнитуда 9. Диапазон эпицентральных расстояний 229–240 км [Kinoshita, 2003; Заалишвили и др., 2014]. Исследовалась корреляционная связь между интенсивностью в баллах MSK и скоростью поперечной волны в м/с по записям 8-ми станций.

Результаты исследования приведены на рис. 2. Как видно из рисунка, между интенсивностью и скоростью поперечной волны существует достаточно сильная связь ($R^2=0,52$). Наибольшая интенсивность величиной 10,0 балла наблюдается на станции FKS017 (рис. 3), расположенной на участке сложенном песчаными (2,8–6,8 м; 8,65–9,95 м) и глинистыми (2,3–2,8 м; 9,95–11,7 м; 12,8–20,0 м) грунтами, а также вулканическим пеплом (0,4–2,3 м). Наименьшая интенсивность наблюдается на станции АКТ023 (6,6 балла), которая установлена на участке, сложенном на-

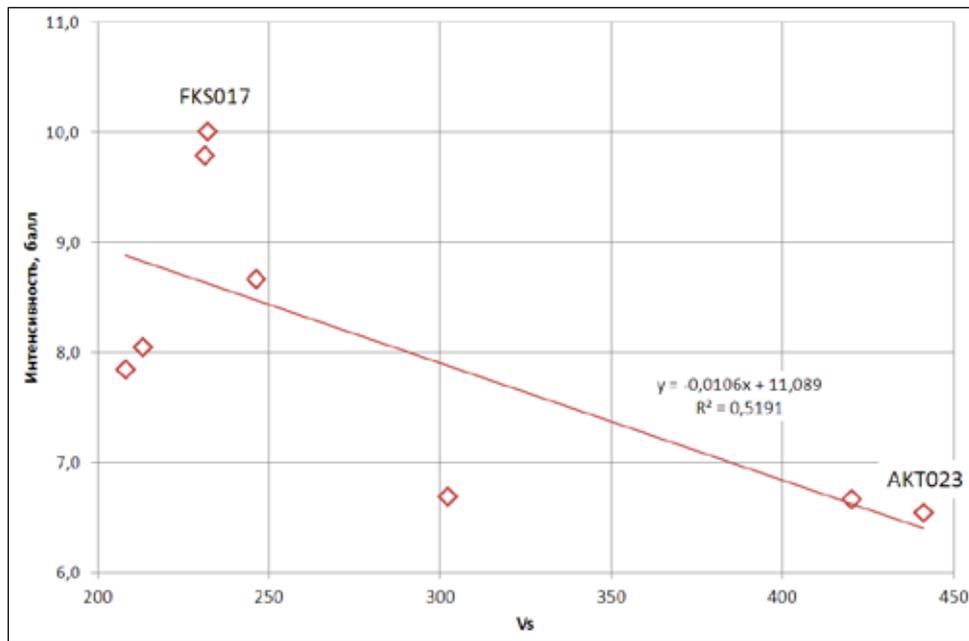


Рис. 2. Зависимость интенсивности от скорости поперечной волны Vs по выборке 1

сыпным грунтом (0–1,6 м), гравелистым грунтом (1,6–3,7 м) и скальным грунтом (3,7–20,0 м).

Выборка 2. Сейсмическое событие от 11.03.2011 г. 14:46 [Kinoshita,2003; Заалишвили и др., 2014]. Магнитуда 9. Диапазон эпицентральных расстояний 196–207 км. Результаты исследования говорят о том, что между интенсивностью и скоростью поперечной волны существует слабая связь ($R^2=0,07$). Наибольшая интенсивность величиной 9,9 балла проявилась на станции FKS006, грунты под которой представлены насыпным грунтом (0–4,8 м), почвенным грунтом (4,8–5,7 м), илом (5,7–6,25 м), глиной (6,25–7,15 м). Глубже расположен скальный грунт. Наименьшая интенсивность величиной 7,5 балла проявилась на станции IWT016, под которой находится гравелистый грунт (0–14 м) и скальный грунт (14–20 м). На станции

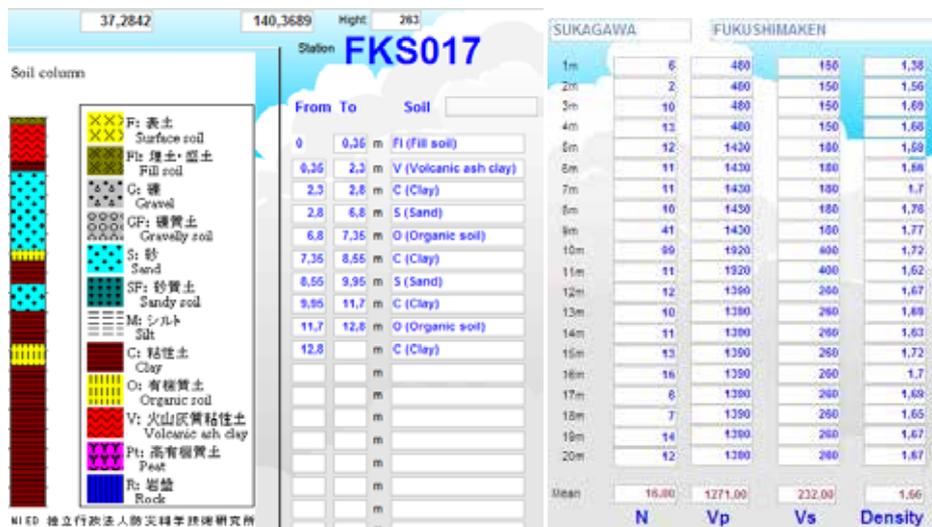


Рис. 3. Грунтовые условия станции FKS017.

FKS031 проявилась значительная интенсивность величиной 9,1 балла, несмотря на то, что грунт, на котором она расположена – скальный (0–20 м).

Выборка 3. Сейсмическое событие от 11.03.2011 г. 14:46 [Kinoshita,2003; Заалишвили и др., 2014]. Магнитуда 9. Диапазон эпицентральных расстояний 240–266 км. $R^2=0,12$. Наибольшая интенсивность проявилась на станции IBR003 (10,8 балла), которая расположена на участке сложенном насыпным грунтом (0–1,7 м), вулканическим пеплом с глиной (1,7–3,8 м), песчаным грунтом (3,8–17,3 м), скальным грунтом (17,3–20,0 м). Наименьшая интенсивность проявилась на станции YMT016 (5,3 балла), под которой расположены грунты: насыпной грунт (0–0,7 м), ил (0,7–1,35 м), глина (1,35–2,5 м), песок (2,5–3,3 м), гравелистый грунт (3,3–20,0 м).

Выборка 4. Сейсмическое событие от 22.11.2014 22:08 [Kinoshita,2003; Заалишвили и др., 2014]. Магнитуда 6,7. Диапазон эпицентральных расстояний 39–49 км. $R^2=0,31$. Наибольшая интенсивность проявилась на станции NGN001 (5,9 балла), расположенной на грунтах: насыпной грунт (0–0,85 м); глина (0,85–2,25 м); песок (2,25–3,5 м); гравелистый грунт (3,5–8,8 м); песчаный грунт (8,8–12,5 м); гравелистый грунт (12,5–20,0 м). Наименьшая интенсивность наблюдалась на станции NGN003 (5,17 балла), которая расположена на грунтах: насыпной грунт (0–1,7 м); гравелистый грунт (1,7–5,7 м); скальный грунт (5,7–20,0 м).

Выборка 5. Сейсмическое событие от 06.10.2000 13:30 [Kinoshita,2003; Заалишвили и др., 2014]. Магнитуда 7,3. Диапазон эпицентральных расстояний 170–179 км. $R^2=0,51$. Наибольшая интенсивность величиной 6,5 балла проявилась на станции TKS002, которая расположена на грунтах: насыпной грунт (0–0,6 м); песок (0,6–12,8; 13,9–14,8 м); ил (12,8–13,9 м; 14,8–20,5 м). Наименьшая интенсивность величиной 5,1 балла проявилась на станции KOC017, которая расположена на грунтах: насыпной грунт (0–0,3 м); скала (0,3–10,2 м). Наименьшая интенсивность величиной 5,1 балла наблюдалась также и на станции NYG015, которая расположена на участке с грунтами: насыпной грунт (0–0,7 м); глина (0,7–2,8 м); песок (2,8–3,3 м); гравий (3,3–7,0 м); гравелистый грунт (7,0–20,0 м).

Результаты по выборкам 1–5 были получены на основе записей одного сейсмического события в каждой выборке. Результаты, полученные на основании исследования записей различных событий в каждой выборке (при зафиксированных значениях магнитуд и диапазонах эпицентральных расстояний), показали, что зависимость между интенсивностью и скоростью поперечной волны более слабая.

Зависимость интенсивности от магнитуды и гипоцентрального расстояния

Рассмотрим теперь зависимости интенсивности (I_{int}) от магнитуды (M) и от I_g (H) логарифма гипоцентрального расстояния (табл. 4).

Из формул табл. 4 следует, что приращению магнитуды на 1 соответствует приращение интенсивности воздействия на 0,7 балла для скалы, 0,9 – для гравия, 0,9 – для ила, 1,3 – для песка, 1,5 – для глины, 1 – для всех записей.

Уравнение Шебалина

Общее уравнение макросейсмического поля (уравнение Шебалина), связывающего балльность в некоторой точке I_i с магнитудой M , эпицентральной расстоянием Δ и глубиной очага h , имеет вид [Шебалин, 1968; Природные опасности России, 2000]

Таблица 4

**Зависимость интенсивности от магнитуды и логарифма
гипоцентрального расстояния**

Грунт	Формула	R ²
Скала	$Int = 2,43 + 0,69 \cdot M - 1,21 \cdot \lg(H)$	0,26
Песок	$Int = 2,31 + 1,29 \cdot M - 2,38 \cdot \lg(H)$	0,67
Гравий	$Int = 2,25 + 0,86 \cdot M - 1,47 \cdot \lg(H)$	0,33
Ил	$Int = 2,60 + 0,90 \cdot M - 1,53 \cdot \lg(H)$	0,43
Глина	$Int = 1,22 + 1,52 \cdot M - 2,56 \cdot \lg(H)$	0,73
Все	$Int = 2,51 + 1,05 \cdot M - 1,93 \cdot \lg(H)$	0,45

$$I_i = bM - v \log \sqrt{\Delta^2 + h^2} + c,$$

где b , v , c константы (в среднем $b=1,5$, $v=3,5$, $c=3,0$).

Рассмотрим различие формулы авторов для всех записей (табл. 4) с формулой Шебалина. Отметим, что формула Шебалина получена для землетрясений в СССР, а формула авторов – для японских землетрясений. Вследствие различия в коэффициентах, для сравнения был использован такой критерий, как среднеквадратичная относительная ошибка, которая для формулы авторов в интервале 2–12 баллов равна 0,043, для формулы Шебалина в интервале 2–12 баллов равна 0,059. Результаты представлены на рис. 4.

Из последних приведенных цифр следует, что в пределах ошибки формула авторов и формула Шебалина работают с одинаковой точностью.

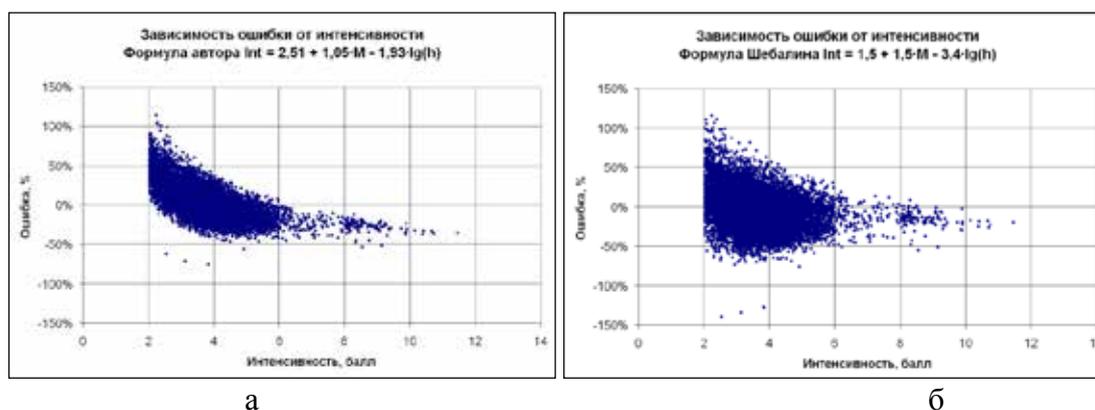


Рис. 4. Зависимость величины среднеквадратичной относительной ошибки от интенсивности при расчете а) – по формуле авторов, и б) – по формуле Шебалина.

**Зависимость интенсивности от магнитуды,
гипоцентрального расстояния и максимального
ускорения**

Попытка добавить в зависимость интенсивности от магнитуды и гипоцентрального расстояния зависимость от скорости поперечной волны показала весьма незначительную долю вклада от скорости поперечной волны, которой можно пренебречь.

Определим формулу зависимости интенсивности на данных [Заалишвили и др., 2014] от магнитуды, ускорения, гипоцентрального расстояния (табл. 5). Наибольший вклад в зависимость вносит логарифм пикового горизонтального ускорения $\lg(\text{Acc})$, затем по значимости идет магнитуда, наименьший вклад, причем отрицательный, вносит логарифм гипоцентрального расстояния $\lg(H)$.

Во-первых, в табл. 5, бросается в глаза очень слабая зависимость интенсивности от расстояния для «жестких» грунтов – скалы и гравия. Это вызвано тем, что колебания на скале и гравии быстрее затухают с расстоянием, нежели на песке, иле или глине.

Из табл. 5 следует, что приращению магнитуды на 1 соответствует приращение интенсивности воздействия на 0,46 балла для скалы, 0,6 – для песка, 0,51 – для гравия, 0,47 – для ила, 0,72 – для глины, 0,52 – для всех записей при одинаковых ускорениях и расстояниях. Увеличение пикового горизонтального ускорения в 10 раз ведет к приращению интенсивности воздействия на 1,76 балла для скалы, 1,72 – для песка, 1,78 – для гравия, 1,72 – для ила, 1,84 – для глины, 1,85 – для всех записей при одинаковых магнитудах и расстояниях.

Таблица 5

Зависимость интенсивности от магнитуды, логарифма гипоцентрального расстояния, логарифма пикового горизонтального ускорения

Грунт	Формула	R ²
Скала	$\text{Int} = -0,50 + 0,459 \cdot M + 1,764 \cdot \lg(\text{Acc})$	0,77
Песок	$\text{Int} = 0,739 + 0,60 \cdot M - 0,709 \cdot \lg(H) + 1,72 \cdot \lg(\text{Acc})$	0,92
Гравий	$\text{Int} = -0,757 + 0,51 \cdot M + 1,775 \cdot \lg(\text{Acc})$	0,84
Ил	$\text{Int} = 0,081 + 0,466 \cdot M + 1,721 \cdot \lg(\text{Acc})$	0,76
Глина	$\text{Int} = -0,044 + 0,718 \cdot M - 0,631 \cdot \lg(H) + 1,84 \cdot \lg(\text{Acc})$	0,91
Все	$\text{Int} = -0,155 + 0,518 \cdot M - 0,245 \cdot \lg(H) + 1,85 \cdot \lg(\text{Acc})$	0,83

Зависимость интенсивности от магнитуды, и максимального ускорения

Ускорения, расстояния и магнитуды логарифмически связаны друг с другом, поэтому разделять вклад от магнитуды, расстояния и ускорения в интенсивность достаточно затруднительно. Если все же пренебречь зависимостью интенсивности от расстояния (оно будет автоматически учтено в магнитуде и ускорении), то получим следующие зависимости (табл. 6).

Таблица 6

Зависимость интенсивности от магнитуды и логарифма пикового горизонтального ускорения

Грунт	Формула	R ²
Скала	$\text{Int} = -0,50 + 0,459 \cdot M + 1,764 \cdot \lg(\text{Acc})$	0,77
Песок	$\text{Int} = 0,12 + 0,388 \cdot M + 1,99 \cdot \lg(\text{Acc})$	0,92
Гравий	$\text{Int} = -0,757 + 0,51 \cdot M + 1,775 \cdot \lg(\text{Acc})$	0,84
Ил	$\text{Int} = 0,081 + 0,466 \cdot M + 1,721 \cdot \lg(\text{Acc})$	0,76
Глина	$\text{Int} = -0,41 + 0,48 \cdot M + 2,19 \cdot \lg(\text{Acc})$	0,90
Все	$\text{Int} = -0,43 + 0,456 \cdot M + 1,934 \cdot \lg(\text{Acc})$	0,83

Сравнение таблиц 5 и 6 показывает, что для одних и тех же грунтов в обеих таблицах R^2 одинаковы. Учет зависимости интенсивности от логарифма гипоцентрального расстояния в таблице 5 дает добавку в R^2 не более 1%, т. е. зависимость от гипоцентрального расстояния уже содержится в зависимости от логарифма пикового горизонтального ускорения.

А сравнивая таблицы 4 и 6 можно сделать вывод, что для грунтов станций KNET формула зависимости интенсивности от магнитуды и логарифма пикового горизонтального ускорения работает с более высоким значением R^2 , чем формула зависимости интенсивности от магнитуды и логарифма гипоцентрального расстояния.

Выводы

1. Исследовано влияние грунтовых условий на параметры сильных грунтовых движений на основе записей базы данных SMDBCGI. Рассматривались 5 типов грунтов: с содержанием скальных пород не менее 99%, с содержанием песка не менее 90%, с содержанием гравия не менее 90%, с содержанием ила не менее 65%, с содержанием глины не менее 60%.

2. Рассмотрена регрессионная зависимость интенсивности от магнитуды, логарифма гипоцентрального расстояния, логарифма пикового горизонтального ускорения и скорости поперечных волн для различных грунтов. Наибольший вклад в зависимость вносит логарифм пикового горизонтального ускорения, затем по значимости идет магнитуда. Наименьший вклад, причем отрицательный, вносит логарифм гипоцентрального расстояния.

3. Рассмотрено различие формулы авторов с формулой Шебалина. Отметим, что формула Шебалина получена для землетрясений в СССР, а формула авторов – для японских землетрясений. Вследствие различия в коэффициентах, для сравнения был использован такой критерий, как среднеквадратичная относительная ошибка, которая для формулы авторов в интервале 2–12 баллов равна 0,043, для формулы Шебалина в интервале 2–12 баллов равна 0,059. Из последних приведенных цифр следует, что в пределах ошибки формула авторов и формула Шебалина работают с одинаковой точностью.

Литература

1. Заалишвили В.Б., Харебов А.К., Харебов К.С. База данных сильных движений «SMDBCGI», Свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2014621429 от 10.10.2014

2. Заалишвили В.Б., Харебов А.К., Харебов К.С. Влияние грунтовых условий на интенсивность воздействия сильных грунтовых движений. //В кн.: Сейсмическая опасность и управление сейсмическим риском на Кавказе./ред.А.В. Николаев, В.Б. Заалишвили. Владикавказ: ЦГИ ВНИЦ РАН и РСО-А, 2009. с. 212–219

3. Природные опасности России. Сейсмические опасности. М.: Крук, 2000, 295 с.

4. Шебалин Н.В. Методы использования инженерно-сейсмологических данных в сейсмическом районировании. //В кн.: Сейсмическое районирование СССР. Ч.1, гл.6. М.: Наука, 1968

5. Kinoshita S. Kyoshin Net (K-NET), Japan. Int. Handbook of Earthquake and Engineering seismology, v. 81B, 2003, pp. 1049–1056.

DOI: 10.23671/VNC.2015.4.55293

INFLUENCE OF THE SOILS TYPES ON THE STRONG GROUND MOTIONS INTENSITY

© 2015 A.N. Baskaev^{1,2}, Sc. Candidate (Tech.), K.S. Kharebov¹,
Sc. Candidate (Tech.)

¹GPI VSC RAS, Russia, 362002, Vladikavkaz, Markov str., 93 a,
e-mail: cgi_ras@mail.ru;

²Mountain State Agrarian University, Russia, 362040, Vladikavkaz, Kirov str., 37

Study of the different soils forms influence on the intensity of the strong ground motions manifestation based on the records data base, created by the authors is carried out. The correlation dependences of intensity on the logarithm of peak horizontal acceleration and on the hypocentral distance separately are obtained for different types of soil (rock, sand, gravel, silt, clay). For the different grounds with the high magnitudes the intensity value is in follows descending order: clay, sand, silt, gravel, rock. The conducted investigation showed the weak dependence of intensity on the transverse wave speed. The comparison of the correlation dependences of intensity on the magnitude and on the hypocentral distance for records of database SMDB CGI with Shebalin formula showed that the accuracy of the authors formula for all types of grounds and Shebalin formula is identical in the ranges of error. For the system KNET stations it is better to use the formula of correlation dependence of intensity on the magnitude and on the logarithm of peak horizontal acceleration, than the correlation dependence on the magnitude and on the hypocentral distance logarithm.

Keywords: earthquake intensity, magnitude, horizontal acceleration, hypocentral distance, grounds, data base, strong ground motion.