

УДК 550.34.01

DOI: 10.23671/VNC.2014.4.55513

## РАЗРАБОТКА БАЗЫ ДАННЫХ СИЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ

© 2014 В.Б. Заалишвили, д.ф.-м.н., проф., К.С. Харебов,  
к.т.н., А.К. Харебов

Центр геофизических исследований ВНЦ РАН и РСО-А, Россия, 362002,  
г. Владикавказ, ул. Маркова 93а, e-mail: cgi\_ras@mail.ru

В работе рассмотрены структура и принципы построения базы данных сильных движений, созданной на основе инструментальных записей землетрясений системы KNET с мая 1996 г.

**Ключевые слова:** землетрясения, сильные грунтовые движения, KNET, базы данных.

Исследование взаимных связей показателей сейсмического воздействия на основе анализа инструментальных записей землетрясений различной интенсивности для целей сейсмостойкого строительства и инженерной сейсмологии проводится в ЦГИ ВНЦ РАН с 2002 г. [Заалишвили и др., 2002, 2014; Харебов, 2006; Заалишвили, Харебов, 2007] в рамках разработанной базы данных сильных движений SMDB (Strong Motion Data Base).

В процессе исследований выявились недостатки существующих баз данных: например, отсутствие необходимой детальности или важных характеристик при описании грунтовых условий. При этом следует отметить, что описания данных грунтовых условий весьма разрозненны и часто расплывчаты. Это и привело к исключению сомнительных записей из рассмотрения. В то же время, необходимо отметить, что разброс данных может быть большим даже в пределах одной и той же станции, т.к. каждое землетрясение характеризуется отчетливой индивидуальностью с присущими ему спектральным составом приходящих колебаний, амплитудой сейсмического воздействия, эпицентральной расстоянием и т.д.

Анализ указанных данных позволил установить тенденции корреляционных связей между параметрами грунтового движения. В частности, рассматривались показатели потенциала «повреждаемости» объекта и их связь с уровнем проявленной интенсивности или сейсмического эффекта землетрясений. В качестве таких параметров рассматривались кумулятивная абсолютная скорость, индекс интенсивности Анга, площади реального и нормализованного спектров колебаний грунтов и т.д.

В базе данных производится расчет показателей разрушительного потенциала землетрясений, которые предложены различными авторами. Это – интенсивность Хаузнера, мера Фаджфара, индекс полной входной энергии, интенсивность Ариаса, кумулятивная скорость и т.д.

Кумулятивный квадрат ускорений (модифицированная интенсивность Ариаса):

$$I_A(t) = \int_0^t a^2(\tau) d\tau$$

где  $a(t)$  – акселерограмма,  $\bar{t} = t_{0,95} - t_{0,05}$  – эффективная продолжительность землетрясения.

Кумулятивная абсолютная скорость:

$$I_V(t) = \int_0^t |a(\tau)| d\tau$$

Индекс Интенсивности Анга:

$$I_{Ang} = \sigma_a \sqrt[4]{\bar{t}}$$

Мера Fajfar:

$$I_F = V_{\max} \sqrt[4]{\bar{t}}$$

где  $V_{\max}$  – пиковая скорость.

Интенсивность Хаузнера:

$$I_{Hauzner} = \int_{T=0.1c}^{T=2.5c} V_{\max}(t) dt$$

где  $V_{\max}(T)$  – спектр псевдоскорости (демпфирование – 5%,  $T$  – период), или

$$I_H \approx 10^{0.759M - 0.867 \lg R_0 - 2.498} (T_2 - T_1)$$

$$T_1 = 0.1c \quad T_2 = 2.5c$$

Индекс полной входной энергии:

$$E_j(t) = \int_0^t a(\tau) \dot{x}(\tau) d\tau$$

где  $x(t)$  – скорость реакции:

Площадь реального спектра колебаний:

$$S_r = \int A df$$

Площадь нормализованного спектра колебаний:

$$S_n = \frac{\int A df}{A_{\max}}$$

В результате исследования были установлены различная ценность указанных показателей, а также особенности их взаимосвязей. Данные сильных грунтовых движений, имеющие в качестве исходной информации большую ценность для

сейсмологии, весьма сложно непосредственно использовать для целей инженерной сейсмологии и сейсмостойкого строительства. Были разработаны новые концепции и принципы формирования баз данных сильных землетрясений. В то же время из-за особенностей объекта исследований – параметров землетрясений, характеризующихся большим разбросом данных, – многие вопросы потребовали дальнейшего изучения.

Работа программы обработки записей сильных движений осуществлялась в следующей последовательности (рис. 1):

1. Ввод исходных данных о событии, станции, грунтовых условиях и др. (в виде списка файлов подлежащих обработке);
2. Преобразование и проверка исходных данных, а также ввод данных в основную базу данных программного продукта;
3. Вычисление спектров Фурье с использованием быстрого преобразования Фурье, расчет параметров для дальнейшего статистического анализа;
4. Графический вывод результатов;
5. Установление взаимосвязей между параметрами землетрясения и грунтовыми условиями с использованием статистического анализа.

При выводе графических результатов производилось автоматическое масштабирование соответствующих координатных осей.



Рис. 1. Структурная схема программы обработки данных

Основой послужили банк записей землетрясений ЦИГЕД ОИФЗ РАН, были использованы инструментальные записи землетрясений, зарегистрированных системой K-NET, а также записи разрушительного землетрясения на Тайване (1999 г.).

### Система KNET

После разрушительного землетрясения в Кобе (1995 г.) в Японии за один год были обновлены и построены заново 1000 обсерваторий по всей Японии, создана система KNET, передающая данные по сильным грунтовым движениям через Интернет. Система KNET зиждется на трех основополагающих принципах: все станции используют один и тот же сейсмограф, расположенный на свободной площадке; станции образуют равномерную сеть по всей Японии, имея, практически, одинаковое расстояние между станциями; все данные доступны пользователям через Интернет. Данные включают в себя файлы, с экспериментально измеренными параметрами грунтов. С 01.04.1997 года эти данные доступны. Стоимость проекта составила 30 млн. долларов США, ежегодное обслуживание – 5% от этой суммы. Обслуживают KNET три человека, включая инженера-компьютерщика.

Данные содержат: время события и время начала записи, географические координаты события и станции, глубину очага, магнитуду, код станции, продолжительность записи, запись ускорений с частотой 100 Гц для трех каналов NS, EW, UD. Данные включают в себя файлы с экспериментально измеренными параметрами грунтов для всех станций до глубины 20 м: коэффициент пенетрации, скорость продольных и поперечных волн в грунте, плотность грунта, вид грунта (гравий, песок, ил, почва, глина, торф и скала). Указанные величины даются в виде скоростных разрезов, соответствующих грунтовым толщ, индексов пенетрации, и других показателей грунтовых слоев инженерно-геологического строения участков. Более того, имеются графические изображения указанных инженерно-геологических разрезов. При этом необходимо отметить, что данные инженерно-геологические раз-

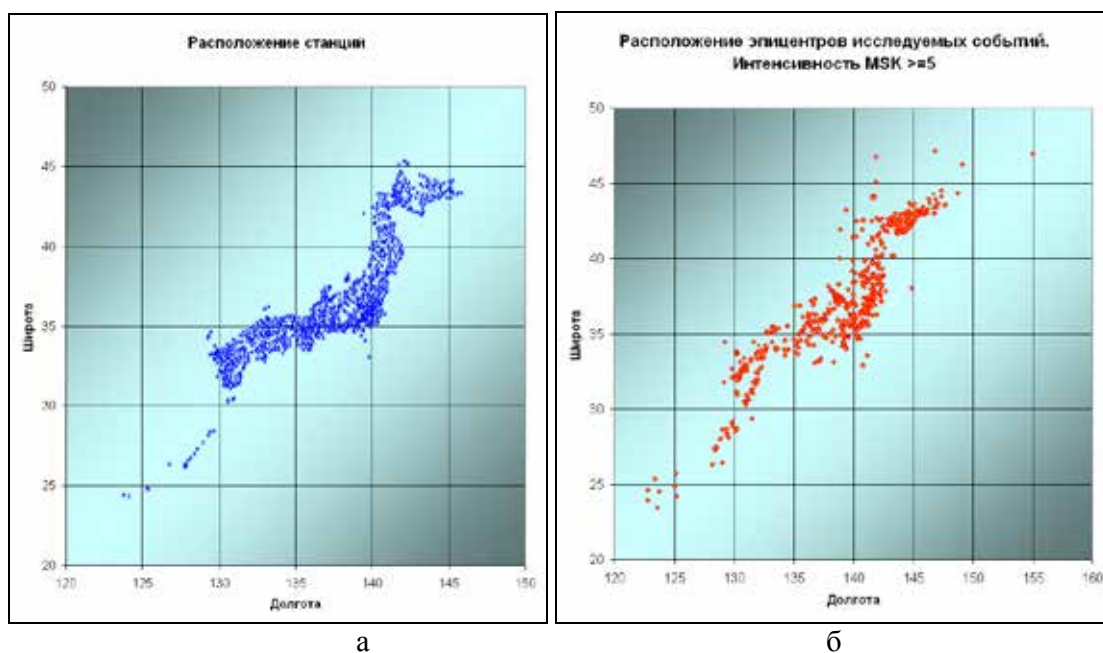


Рис. 2. Расположение станций KNET (а), расположение эпицентров событий (б).

резы описывают строения участков расположения соответствующих сейсмических станций, представляющих густую сеть регистрационной системы сильных грунтовых движений.

К неудобству использования данных KNET относится отсутствие возможности прямого скачивания максимальной интенсивности – она рассчитывается программно, а также наличие бракованных записей.

Мы использовали данные, полученные официально через Интернет с сайта <http://www.k-net.bosai.go.jp/> и их разрешено использовать в некоммерческих целях.

Расположение эпицентров имеющихся в базе данных событий приведено на рис. 2. Размер кружка соответствует магнитуде землетрясения – чем выше магнитуда, тем больше радиус.

База данных состоит из следующих полей:

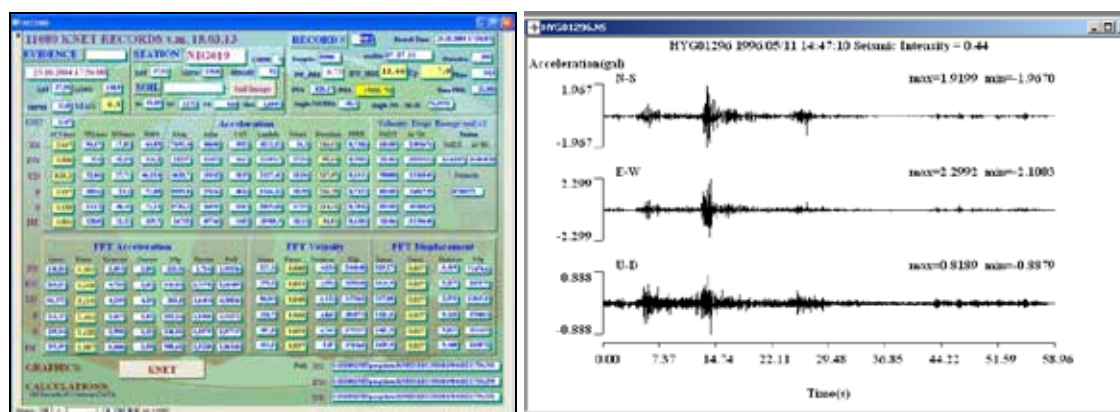
№	Код	Описание
1.	DATE	Дата события
2.	STCODE	Код станции
3.	DEPTH	Глубина очага
4.	MAG	Магнитуда
5.	INT	Макс. интенсивность
6.	SAMPLES	Кол-во отсчетов
7.	HYPO	Расстояние до очага
8.	R	Эпицентральное расстояние
9.	PHA	Пиковое горизонтальное ускорение
10.	PVA	Пиковое вертикальное ускорение (=UDAMAX)
11.	ACC	Максимальное ускорение*
12.	RMS	RMS ускорение*
13.	IANG	Интенсивность Анга*
14.	IARI	Интенсивности Ариаса
15.	CAV	Суммарная абсолютная скорость*
16.	LAMB	Лямбда – среднеквадратичное ускорение*
17.	AMF	Максимальная амплитуда Фурье-спектра*
18.	FMA	Частота макс. Амплитуды Фурье-спектра*
19.	SP	Площадь Фурье-спектра*
20.	FWM	Средневзвешенная частота Фурье-спектра*
21.	FME	Средняя частота Фурье-спектра*
22.	SN	Площадь нормализованного спектра*
23.	DUR	Продолжительность воздействия*
24.	PPER	Преобладающий период*
25.	PEN	Средний коэффициент пенетрации
26.	VP	Средняя скорость VP
27.	VS	Средняя скорость VS
28.	DEN	Средняя плотность
29.	LG	Нижний слой – Гравий
30.	LGF	Нижний слой – Гравелистый грунт
31.	LS	Нижний слой – Песок
32.	LSF	Нижний слой – Песчаный грунт
33.	LM	Нижний слой – Ил
34.	LC	Нижний слой – Глина
35.	LO	Нижний слой – Почва
36.	LV	Нижний слой – Глина с вулканическим пеплом

37.	LPT	Нижний слой – Торфяник
38.	LR	Нижний слой – Скала
39.	F	Поверхностный слой
40.	FI	Насыпной слой
41.	G	Гравий
42.	GF	Гравелистый грунт
43.	Sand	Песок
44.	SF	Песчаный грунт
45.	M	Ил
46.	C	Глина
47.	O	Почва
48.	V	Глина с вулканическим пеплом
49.	PT	Торфяник
50.	Rock	Скала

\* – для трех компонент: NS, EW, UD.

База содержит записи с интенсивностью MSK от 5 баллов и выше начиная с мая 1996 г. Также в базе данных содержатся записи с эпицентрными расстояниями от 0 до 3 км включительно при любой интенсивности.

База данных создана на основе СУБД ACCESS. Структура базы данных следующая. Записи сейсмических событий были получены через Интернет в архивированном виде, и хранятся в разархивированном виде в отдельных директориях, аналогичных «родному» формату хранения. Общий вид базы данных представлен на рис. 3а. Вывод на экран графиков, ускорений, скоростей, смещений, спектров Фурье и реакции проводится нажатием кнопки «KNET» на рис. 3а. Появляется соответствующий график (рис. 3б). Графики можно строить с помощью программного продукта KNET – SMDA (Strong Motion Data Analysis), который также рассчитывает и интенсивность события по трехкомпонентной акселерограмме, или с помощью программ автора. Для инициализации программы автора используется соответствующая процедура (на скрытой кнопке «FROM FILES») (рис. 3а), при этом данные по ускорениям, скоростям, смещениям, спектрам Фурье для всех компонент скидываются в отдельные файлы, после чего строятся и соответствующие графики. Первичный расчет параметров текущей записи проводится по нажатию скрытой кнопки «AUTO» (рис. 3а). Проводится расчет следующих характеристик: пи-



а

б

Рис. 3. Главная форма базы данных (а), запись трехмерной акселерограммы (б)

ковое горизонтальное ускорение, пиковое вертикальное ускорение, максимальное ускорение, rms ускорение, интенсивность Анга, суммарная абсолютная скорость, лямбда – среднеквадратичное ускорение, максимальная амплитуда Фурье-спектра, частота макс. амплитуды Фурье-спектра, площадь Фурье-спектра, средневзвешенная частота Фурье-спектра, квадрат средневзвешенной частоты, площадь нормализованного спектра, продолжительность воздействия, преобладающий период, средний коэффициент пенетрации, средняя скорость  $v_p$ , средняя скорость  $v_s$ , средняя плотность, гравий, гравелистый грунт, песок, песчаный грунт, ил, глина, почва, глина с вулканическим пеплом, торфяник, скала. Соответствующие программы написаны на Visual Basic. Для расчета спектра Фурье используется Fortran-процедура.

В базе данных приводится максимальная интенсивность в японской шкале (JMA) и в шкале МСК (MSK). Перевод в шкалу МСК был произведен по [Kramer, 1996], где приведено (рис. 2) соответствие разных шкал.

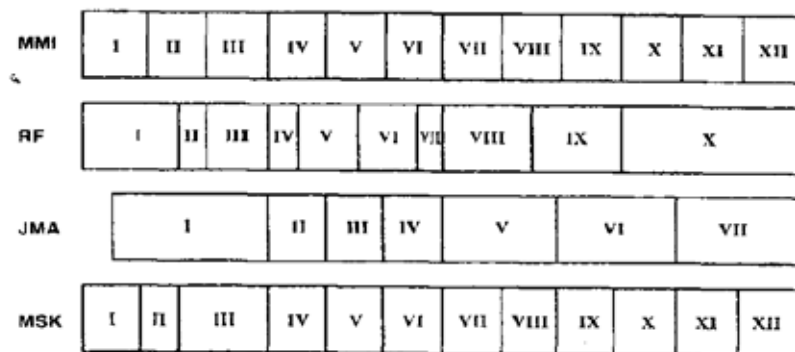


Рис. 4. Соответствие шкал измерения интенсивности сейсмического воздействия.

В соответствии с рисунком перевод со шкалы японского метеорологического общества (JMA) в шкалу MSK производился с использованием следующих коэффициентов.

Таблица 1

#### Коэффициенты перевода из шкалы JMA в MSK

JMA	MSK	Коэффициент перевода
0-0,2	0,5-1	$JMA * 2,5 + 0,5$
0,2-0,4	1-2	$JMA * 5$
0,4-1	2-3	$(JMA - 0,4) * 1,67 + 2$
1-4	3-6	$JMA + 2$
4-4,5	6-7	$(JMA - 4) * 2 + 6$
4,5-5	7-8	$(JMA - 4,5) * 2 + 7$
5-5,5	8-9	$(JMA - 5) * 2 + 8$
5,5-6	9-10	$(JMA - 5,5) * 2 + 9$
6-6,5	10-11	$(JMA - 6) * 2 + 10$
6,5-7	11-12	$(JMA - 6,5) * 2 + 11$

Также можно вывести спектры Фурье, мощности, энергетический и другую полезную информацию. По каждой записи, нажатием на кнопку «CALC» проводит-

ся расчет следующих характеристик: пиковое горизонтальное ускорение, пиковое вертикальное ускорение, максимальное ускорение, rms ускорение, интенсивность Анга, суммарная абсолютная скорость, лямбда – среднеквадратичное ускорение, максимальная амплитуда Фурье-спектра, частота макс. амплитуды Фурье-спектра, площадь Фурье-спектра, средневзвешенная частота Фурье-спектра, квадрат средневзвешенной частоты, площадь нормализованного спектра, продолжительность воздействия, преобладающий период, средний коэффициент пенетрации, средняя скорость  $v_p$ , средняя скорость  $v_s$ , средняя плотность, гравий, гравелистый грунт, песок, песчаный грунт, ил, глина, почва, глина с вулканическим пеплом, торфяник, скала. Соответствующие программы написаны на Visual Basic. Для расчета спектра Фурье используется Fortran-процедура.

Нажатие на кнопку «SOIL IMAGE» приводит к выводу на экран параметров грунтов в графическом виде (рис. 5а) или в цифровом виде (рис. 5б).

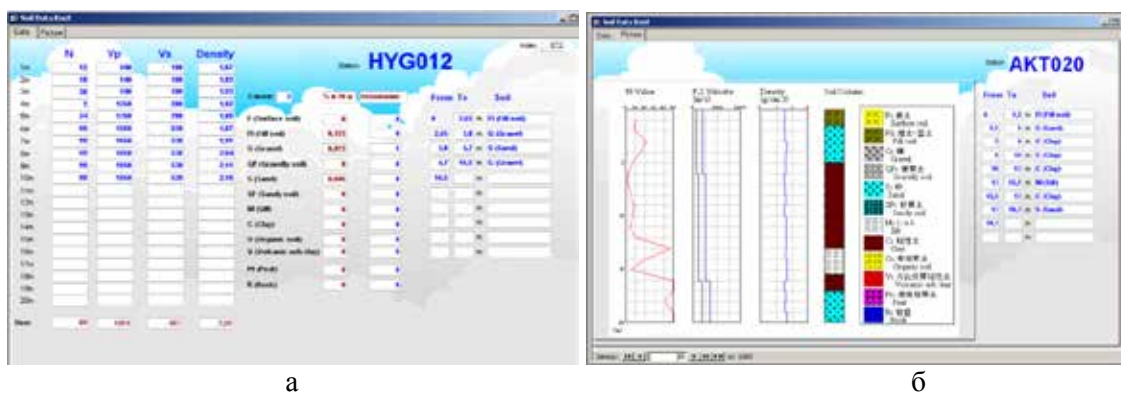


Рис. 5. Параметры грунтов сейсмических станций (а), графики параметров грунтов сейсмических станций (б)

Выводятся на экран и используются в расчетах следующие параметры грунтов: средние величины пенетрации, скорости поперечных и продольных волн, плотности. Выводятся и используются в расчетах мощность пластов грунтов различных типов – глина, песок и др. Также выводятся и используются в расчетах типы грунтов, лежащих ниже всех остальных – что представляет попытку «заглянуть» за пределы стандартного ограничения грунтовых условий 20 метрами глубины.

В KNET учитывается 12 видов грунтов: **F** (Surface soil), **FI** (Fill soil), **G** (Gravel), **GF** (Gravelly soil), **S** (Sand), **SF** (Sandy soil), **M** (Silt), **C** (Clay), **O** (Organic soil), **V** (Volcanic ash clay), **PT** (Peat), **R** (Rock) – (поверхностный слой, насыпной слой, гравий, гравелистый грунт, песок, песчаный грунт, ил, глина, почва, глина с вулканическим пеплом, торфяник, скала, соответственно).

Переменные **LG, LGF, LS, LSF, LM, LC, LO, LV, LPT, LR** описывают нижний слой грунтовой толщи: если переменная равна «1» – то данный грунт составляет нижний слой, если равна «0» – то данный грунт не составляет нижний слой.

Переменные **F, FI, G, GF, S, SF, M, C, O, V, PT, R** описывают концентрацию грунтов в 20-ти метровом слое грунтовой толщи и представляют собой толщину слоя соответствующего грунта деленного на толщину грунтовой толщи, но не менее 20 м.

Точность расчетов спектра Фурье подтверждают рис. 4, где представлены амплитудные спектры Фурье для NS, EW, UD – компонент, записи HYG012 11.05.1996 14:47:10 по программе KNET (4а) и по расчетам автора (4б).



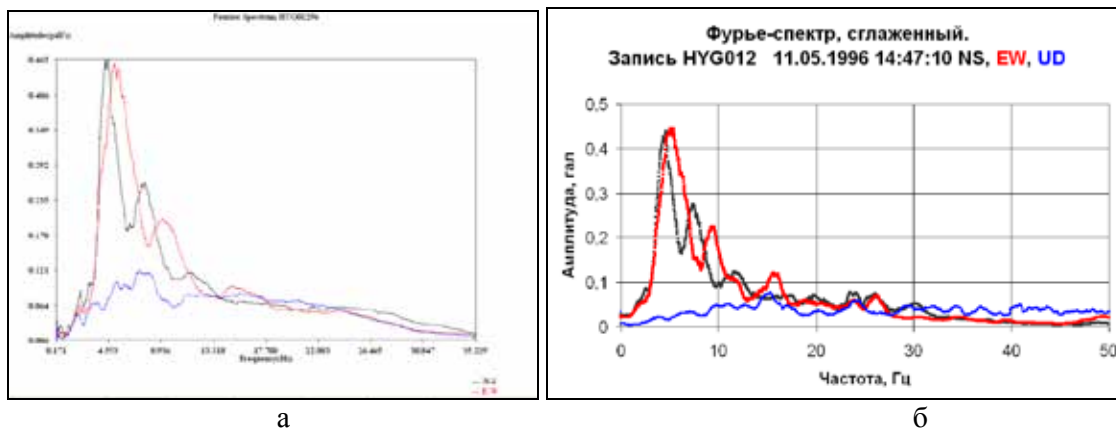


Рис. 4. Фурье-спектр для NS, EW, UD – компонент, записи NYG012 11.05.1996 14:47:10 по программе KNET (а), по расчетам автора (б)

### Алгоритм расчета параметров сейсмических записей

При нажатии на кнопку «AUTO» происходит запуск программы на VISUAL BASIC, в которой производятся следующие действия.

- Считываются названия 3 файлов (NS, EW, UD) с исходными данными записи и эти файлы копируются на диск в файлы: accesNS.txt, accesEW.txt, accesUD.txt.
- Запускается программа на FORTRANe, в которой производятся следующие действия.
  - Из файлов accesNS.txt, accesEW.txt, accesUD.txt считываются координаты события и станции, количество отсчетов, масштабирующий фактор и отсчеты.
  - На основе координат станции и события рассчитывается направление и расстояние от станции до события.
  - Все отсчеты умножаются на масштабирующий фактор, находится среднее по отсчетам, из каждого отсчета вычитается среднее и создается запись (акселерограмма) землетрясения с нулевым средним. Находится максимальная и минимальная величины отсчетов по трем каналам: NS, EW, UD. Ищется пиковое горизонтальное ускорение (РНА), равное корню квадратному из квадратов NS и EW отсчетов. Производится расчет показателя Ариаса.
  - Длительность записи оценивается следующим образом. После расчета суммы квадратов ускорений слева и справа отрезаем количество отсчетов, соответствующее 0,025 от общей суммы квадратов ускорений.
  - В выбранном интервале длительности производится расчет кумулятивной абсолютной скорости, среднеквадратичной скорости, показателя Анга.
  - Далее производится подготовка к расчету спектра Фурье. Изначально мы приняли, что спектр Фурье будет рассчитываться по 4096 точкам. Поэтому были отброшены записи с меньшим числом отсчетов. Если число отсчетов в выбранном интервале длительности меньше 4096, то начало интервала принимается как конец записи – 4096, чтобы количество отсчетов было не менее 4096. Если число отсчетов более 4096, то их количество сводится к 4096, выбирая отсчеты через несколько точек. Количество отсчетов делаем равным ближайшей степени двойки, добавляя нулевые отсчеты.

### Заключение

Создана пополняемая база данных сильных грунтовых движений, содержащая более 12000 трехкомпонентных записей с 23.05.1996 с интенсивностью MSK  $\geq 5$  баллов, зафиксированных на 1003 станциях KNET.

Обработка инструментальных записей производилась с помощью разработанных авторами компьютерных программ на Visual Basic и FORTRAN. Для расчета спектра Фурье использована стандартная FORTRAN процедура FFT4G.F. Проведен расчет пикового горизонтального и вертикального ускорений, максимального ускорения, rms-ускорения, интенсивности Анга, интенсивности Ариаса, суммарной абсолютной скорости, среднеквадратичного ускорения, максимальная амплитуда и соответствующая ей частота Фурье спектра, площадь Фурье спектра, средневзвешенная частота Фурье спектра, площадь нормализованного спектра Фурье, продолжительность воздействия и преобладающий период.

База данных используется для исследования взаимосвязей параметров сильных движений и грунтов.

### Литература

1. Заалишвили В.Б., Харебов А.К. Базы данных сильных движений и взаимосвязь показателей движения при землетрясениях. Современное состояние и пути развития юга России. Ростов-на Дону: Изд. ЮНЦ РАН, 2007, с.455-461.
2. Заалишвили В.Б., Харебов А.К., Харебов К.С. База данных сильных движений «SMDB CGI». Свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2014621429 от 10.10.2014
3. Заалишвили В.Б., Харебов А.К., Харебов К.С. Комплекс вычислительных программ «NCB-2» для обработки инструментальных записей природных и техногенных катастроф Тезисы докл. Межд. конф. «Инф. технологии и системы: наука и практика», Владикавказ, 2002, с. 399-401
4. Харебов А.К. Базы данных сильных движений для целей сейсмического микрорайонирования. Труды «I Кавказской международной школы – семинара молодых ученых», Владикавказ, ВНИЦ РАН и PCO-A, ЦГИ, 2006, с. 212-225
5. Kinoshita S. Kyoshin Net (K-NET), Japan. Int. Handbook of Earthquake and Engineering seismology, v. 81B, 2003, pp.1049-1056.
6. Kramer. S.L. Geotechnical Earthquake Engineering. New Jersey, 1996, 657 p.

DOI: 10.23671/VNC.2014.4.55513

## STRONG MOTION DATABASE DESIGN

© 2014 V.B. Zaalishvili, Sc. Doctor (Phys.-Math.), K.S. Kharebov,  
Sc. Candidate (Techn.), A.K. Kharebov

Center of Geophysical Investigations of VSC RAS & RNO-A, 93a, Markov street,  
Vladikavkaz, 362002, Russia, e-mail: cgi\_ras@mail.ru;

The strong motions database structure and the principles of the construction, created on the basis of the earthquakes records are examined.

**Keywords:** Earthquake, strong ground motions, KNET, data base.