

УДК 550.34

DOI: 10.23671/VNC.2016.2.20807

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРУНТОВЫХ УСЛОВИЙ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ. БАНКИ И БАЗЫ ДАННЫХ СИЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ

© 2016 А.С. Кануков^{1,2}, к.т.н., Д.А. Мельков¹, к.т.н., К.С. Харебов¹, к.т.н.

¹Геофизический институт ВНЦ РАН, Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: cgi_gas@mail.ru;

²Владикавказский филиал финансового университета при правительстве Российской Федерации, Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Молодежная, 7

Оценка влияния грунтовых условий на сейсмический эффект возможных землетрясений включает работы по изысканиям и определению физико-механических свойств грунтов и моделированию воздействий с учетом строения грунтовой толщи. При этом при построении математических моделей часто предполагаются определенные допущения. В работе рассмотрены процедуры исследования свойств грунтов и их моделирования в их неразрывной связи на примере процедуры оценки сейсмической опасности грунтов г. Владикавказа. Приведены результаты использования баз данных сильных движений (на примере K-NET) для подбора сейсмических записей по основным характеристикам землетрясений (магнитуда, глубина очага, эпицентрального расстояние) и грунтовых условий соответствующих станций на основе признаков наибольшего подобия моделей грунтовой толщи.

Ключевые слова: грунтовая толща, инженерно-геологические изыскания, модели, моделирование.

В последние десятилетия наблюдается активизация геодинамических процессов на Северном Кавказе [Бондырев, Заалишвили, 2003]. Это предполагает проводить целый ряд мероприятий для оценки направления и скорости соответствующих движений и оценки уровня ожидаемой опасности [Заалишвили и др., 2011; Zaalishvili, Rogozhin, 2011].

При проведении исследований по оценке сейсмической опасности грунтов большое внимание уделяется уточнению грунтовых условий того или иного участка рассматриваемой территории, предусматривающих широкое использование геофизических методов (например, сейсморазведка). Работы по сейсморазведке были выполнены на территории г. Владикавказа в 2008–2012 гг. в рамках государственных контрактов по оценке сейсмической опасности центральной части г. Владикавказа и исследованию и паспортизации территорий, разработке стратегий реализации дополнительных мероприятий по повышению защищенности объектов массовой застройки [Заалишвили и др., 2012].

На основе типовых сейсморазведочных исследований путем применения схем ZZ, Y_Y₊, Y_Y₋ были определены скорости распространения продольных и поперечных волн в типичных грунтах различного вида, распространенных на территории г. Владикавказа. Для выделения поперечных волн использовалось явление фазовой инверсии и другие признаки [Заалишвили, 1986, 1996, 1997]. Значения скоростей распространения сейсмических волн определялись по наклону годографов прямых и головных волн. Пример записей и годографов для двух участков приведен на рис. 1–2.

Для учета влияния верхней части грунтовой толщи на приращения сейсмической интенсивности рассматривались типичные разрезы мощностью до 30 м. Расчетные

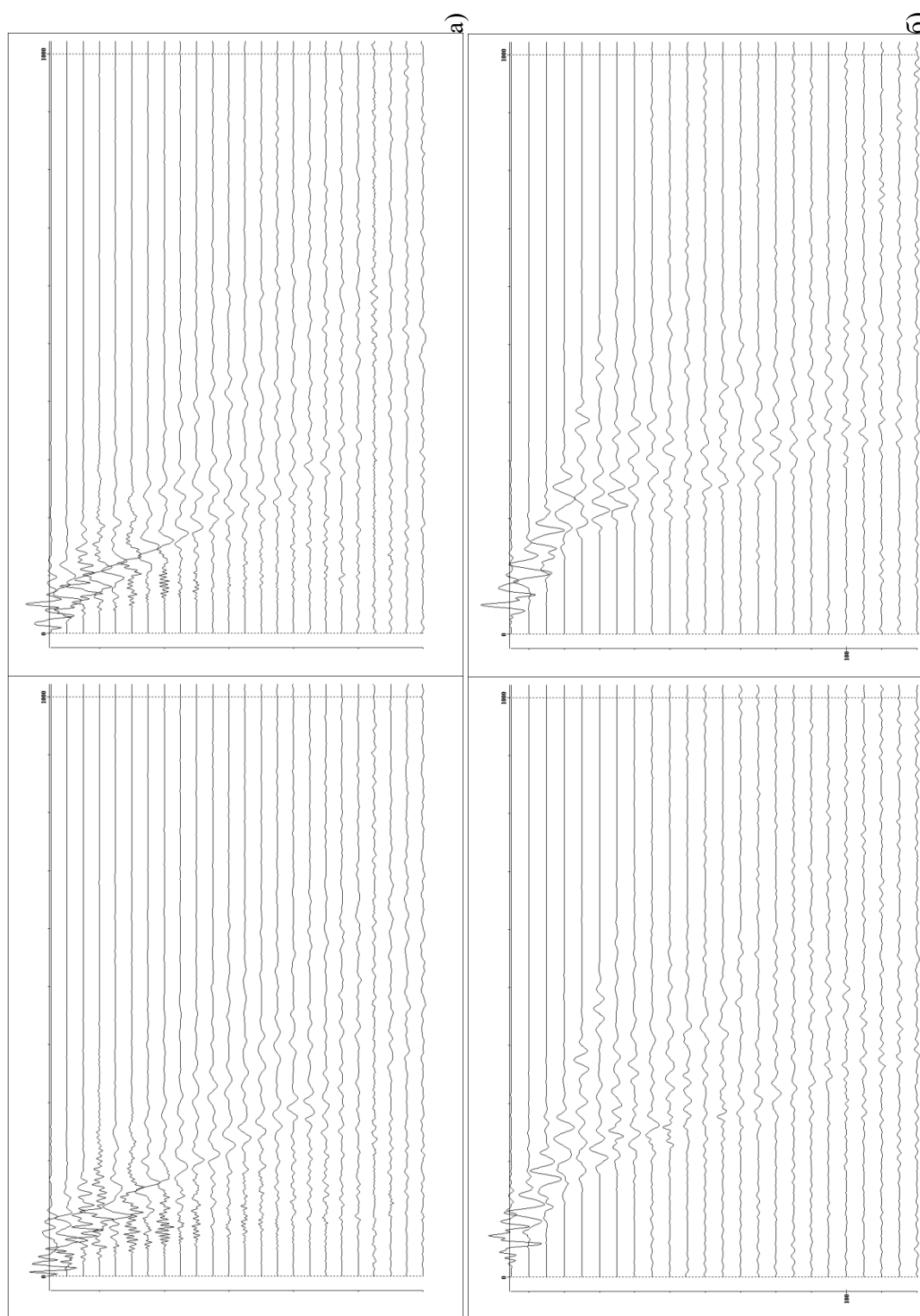


Рис. 1. Сейсмограмма, записанная по схеме УУ+, УУ- на галечниковых грунтах – участок 1 (а) и глинистых грунтах большой мощности – участок 2 (б)

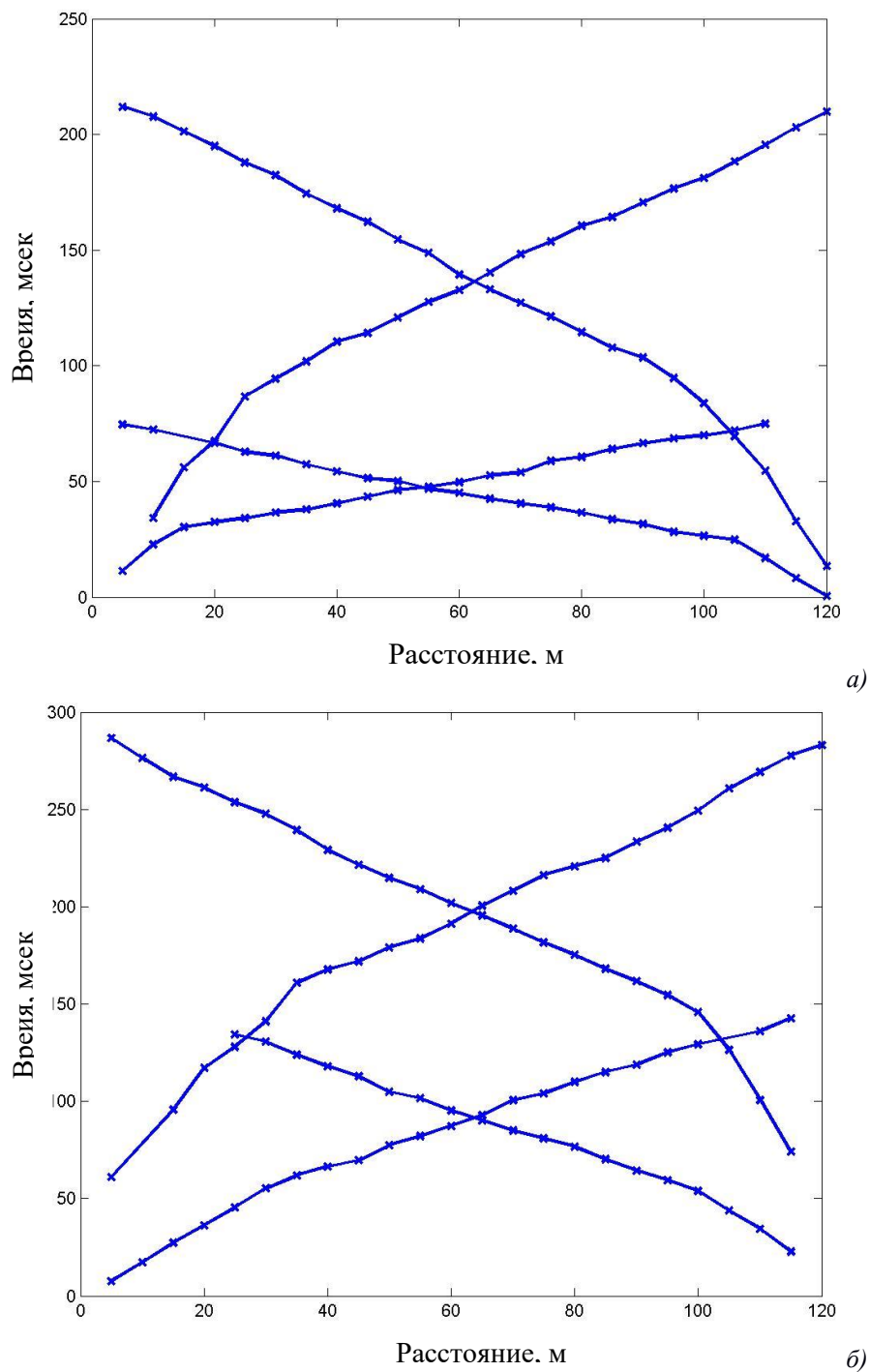


Рис. 2. Годографы а) построенные по записям, полученным на галечниковых грунтах, участок 1; б) построенные по записям, полученным на глинистых грунтах большой мощности, участок 2

модели для различных участков были построены по данным сейсморазведочных исследований, и данным о физико-механических свойствах по скважинам (рис. 3).

Грунтовые условия территории г. Владикавказа могут быть представлены в виде 2-3х-слойной грунтовой толщи. Поскольку на карте инженерно-геологического районирования не выделены участки валунно-галечниковых грунтов по количеству заполнителя, при построении модели использовались данные сейсморазведки [Заалишвили и др., 2010а]. Для подстилающих галечников с количеством заполнителя менее 30%:

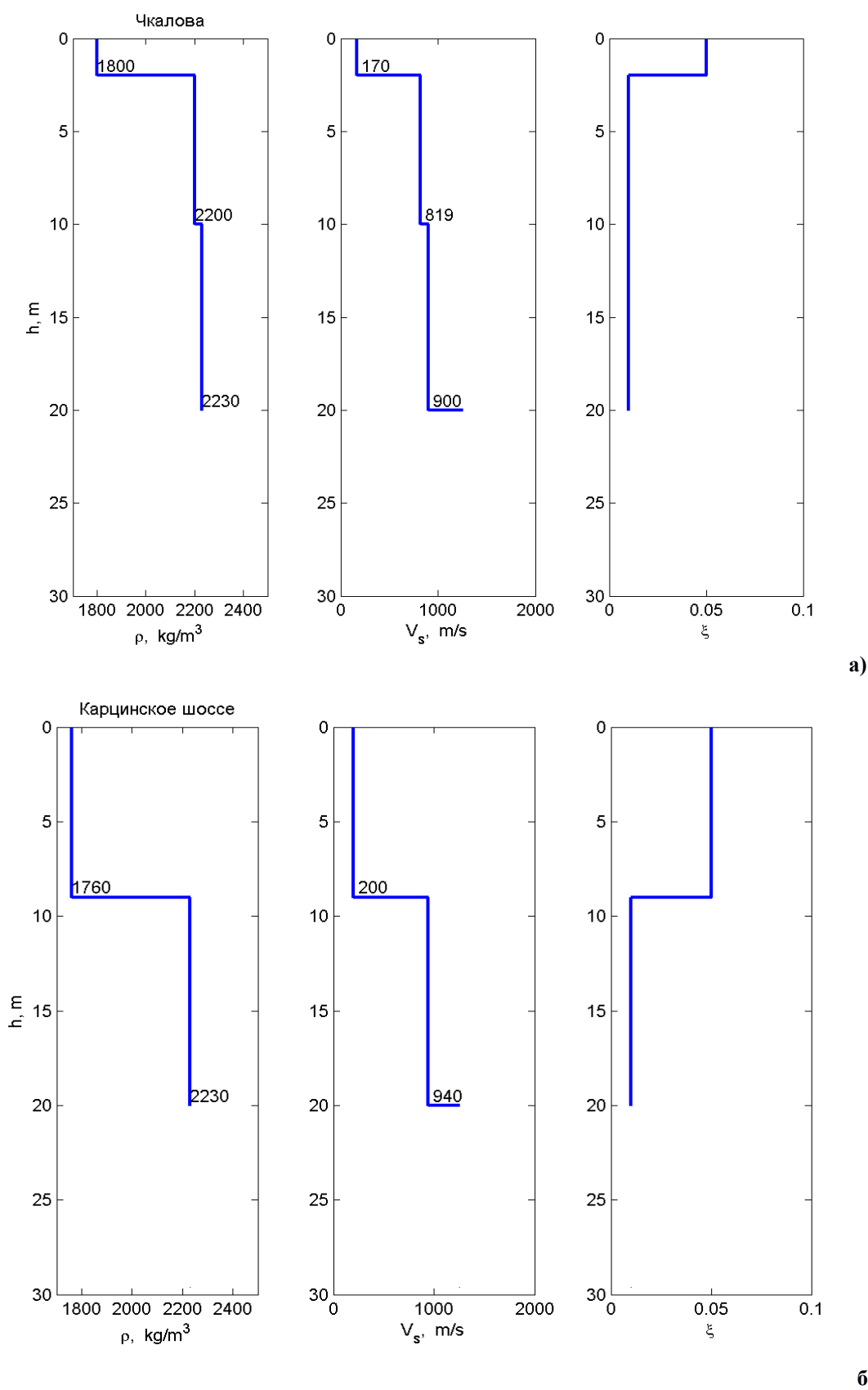


Рис. 3. Расчетные модели грунтовой толщи: а) участок 1 – галечниковые грунты, (перекрываемые насыпным слоем), б) участок 2 – глинистые грунты

в интервале глубин 10–30 м была определена следующая скорость распространения поперечных сейсмических волн $V_s = 700\text{--}900$ м/с, и плотность $\rho = 2,23$ т/м³;

в интервале глубин 20–30 м и глубже – $V_s = 1250$ м/с, $\rho = 2,23$ т/м³ (получено по участкам Металлург – 1140 м/с, Галковского – 1170 м/с, Пожарского – 1150 м/с, Водная – 1230 м/с, БАМ – 1570 м/с, среднее квадратическое отклонение 130 м/с). Следует отметить, что такие высокие значения скоростей также были получены ранее [Отчет..., 1991].

В Руководстве по безопасности РБ-06–98 [Руководство по безопасности..., 1998] дается следующее определение термина «коренная порода» – скальные или другие породы, характеризующиеся скоростью распространения поперечных (сдвиговых) сейсмических волн не менее 700 м/с. Данный критерий позднее был введен в [СП 14.13330.2014] – актуализированной версии СНиП II-7-81*. Поскольку, по результатам геофизических исследований, в подстилающей толще получена более высокая скорость можно оценить влияние верхней части толщи, задавая воздействие на глубине 20–30 м.

Расчеты выполнялись на основе разработанного нами нового алгоритма, основанного на методе многократно отраженных волн сейсмического микрорайонирования [Заалишвили, Мельков, 2010].

В качестве входных акселерограмм использовались инструментальные записи сильных землетрясений, а также запись, полученная стохастическим методом для Сунженской зоны ВОЗ (западная ветвь), и три сценарных акселерограммы для Владикавказского разлома, в силу непосредственной близости к черте города смоделированные по программе FINSIM [Заалишвили и др., 2010б]. Таким образом, были рассмотрены различные воздействия, представляющие опасность для исследуемой территории.

Процесс распространения сейсмических волн через грунтовые слои моделируется в виде временных задержек, определяемых мощностью слоя и скоростью волны в нем, т. е. фактически времени пробега волны через слой (рис. 4). Каждый из грунтовых слоев характеризуется мощностью H , плотностью ρ , скоростью распространения поперечной волны V_s и коэффициентом поглощения α [Габеева, Заалишвили, 2005; Заалишвили и др., 2008]. Коэффициенты отражения и преломления сейсмических волн на границах сред рассчитываются по формулам:

$$\alpha_{ij} = \frac{2}{1 + \frac{\rho_j V_{s_j}}{\rho_i V_{s_i}}}, \quad \beta_{ij} = \frac{1 - \frac{\rho_j V_{s_j}}{\rho_i V_{s_i}}}{1 + \frac{\rho_j V_{s_j}}{\rho_i V_{s_i}}}, \quad (1)$$

где сейсмическая волна распространяется из i -го слоя в j -й.

В данной модели каждый слой представляется в виде некоторого элемента, имеющего два входа и два выхода (рис. 4). Процесс распространения проходящей через слой сейсмической волны моделируется подачей соответствующего сигнала на вход элемента и подачей его на выход с временной задержкой

$$t_i = H_i/V_{s_i} \quad (2)$$

Явление затухания учитывается умножением выходного сигнала на величину $e^{-\alpha_i H_i}$.

Элементы соединены таким образом, что на каждый из входов элемента подается сумма выходных сигналов предыдущего элемента и соответствующего выход-

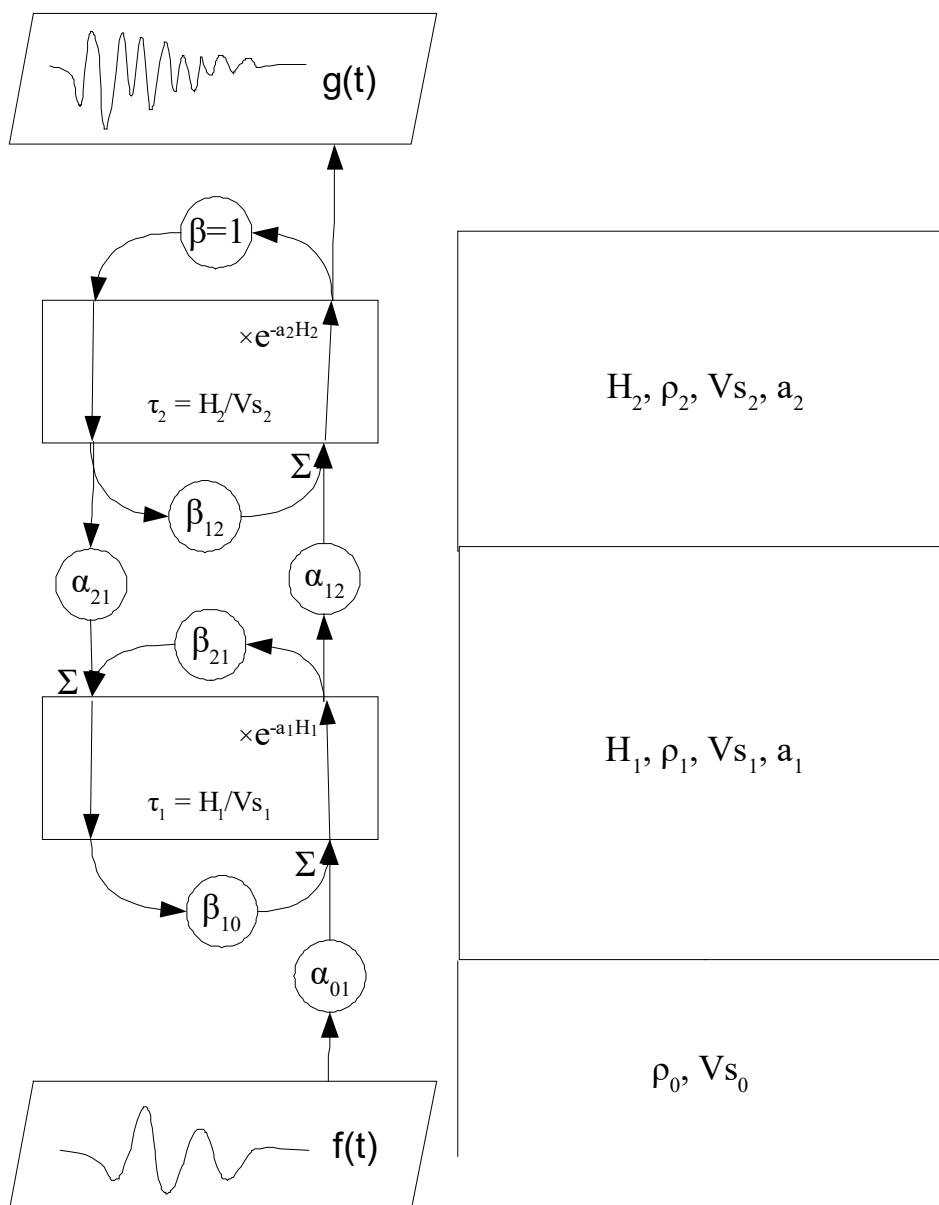


Рис. 4. Модель распространения сейсмических волн в грунтовой толще

ного сигнала данного элемента, умноженные соответственно на коэффициент преломления и отражения. Входная сейсмограмма $f(t)$ подается на вход нижнего слоя, выходная $g(t)$ получается на выходе поверхностного.

В некотором смысле рассмотренные нами элементы грунтовой толщи, представленные на рис. 4 аналогичны нейронам в нейронных сетях. При этом каждый коэффициент отражения и преломления представляет собой весовой коэффициент – вес синапса. Синаптические связи с положительными весами называют возбуждающими, с отрицательными – тормозящими. Функция активации имеет здесь особый вид, являясь линейной функцией с задержкой ($f(s) = s - \tau$).

В результате использования алгоритма расчета на основе предложенной модели были рассчитаны акселерограммы на поверхности грунтовой толщи (рис. 5). Увеличение амплитуды в два раза на втором участке по отношению к первому соответствует приращению сейсмической интенсивности на 1 балл.

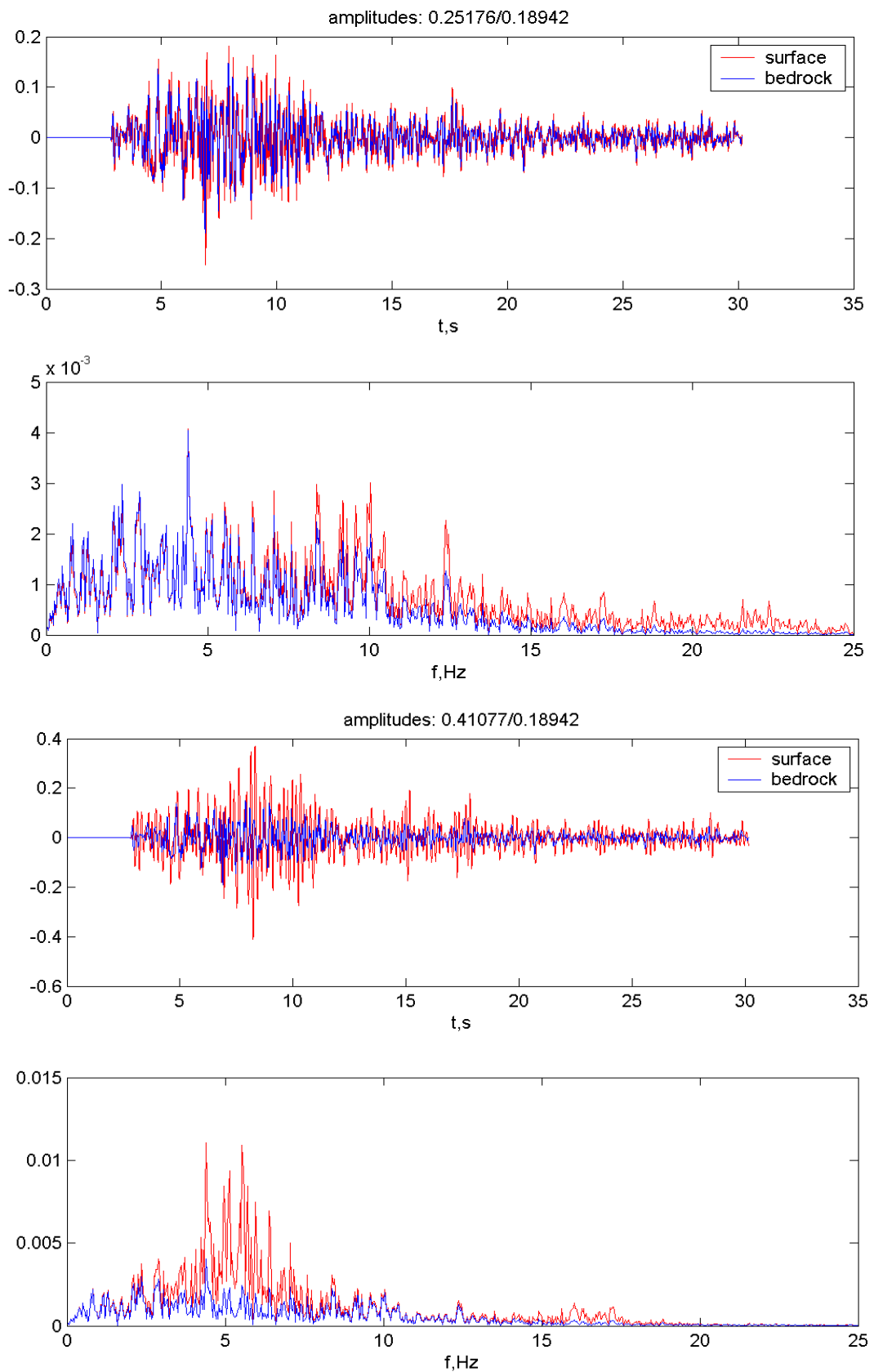


Рис. 5. Расчетные акселерограммы на поверхности грунтовой толщи: а) участок 1 – галечниковые грунты, (перекрытые насыпным слоем), б) участок 2 – глинистые грунты

В последние десятилетия наблюдается стремительный рост информационных технологий. Применение цифровых станций когда-то создало возможность автоматизировать обработку записей землетрясений и создание мощных баз данных. В настоящее время объемы хранения информации и скорости вычислений растут в геометрической прогрессии. Одновременно во многих регионах мира увеличивается число станций регистрации сильных движений. Причем, для решения задач инженерной сейсмологии, места расположения станций выбираются таким образом, чтобы охватить все возможные грунтовые условия территории. Данные об инженерно-геологических условиях являются неотъемлемой составной частью современных сейсмологических баз данных. Подобная база данных создана и в Геофизическом институте ВНИИ РАН и включает в себя данные сетей K-NET (Япония) и ряда других сетей со всего мира [Заалишвили и др., 2013, 2014].

Использование сейсмологических баз данных (БД) для целей СМР имеет определенные особенности. Прежде всего, в БД, кроме характеристик землетрясения, должны быть грунтовые условия расположения сейсмических станций и интенсивности проявления рассматриваемого сейсмического воздействия, т.е. соответствующий сейсмический эффект [Заалишвили, 2014a]. Наличие данных о грунтовых условиях позволяет производить поиск модели грунтовой толщи, наиболее соответствующей исследуемому участку. Учитывая полученные ранее зависимости для плотности и скорости распространения поперечных сейсмических волн [Заалишвили, 2014б] набор параметров сводится к мощностям слоев, слагающих грунтовую толщу и скоростям распространения в ней поперечных сейсмических волн. Далее производится выбор записей землетрясений по определенным параметрам. Такими параметрами являются магнитуда землетрясения, эпицентральное расстояние и глубина очага, которые определяются по карте активных разломов данного региона. Поскольку число записей землетрясений в точности соответствующих условиям будет невелико, производится поиск землетрясений, удовлетворяющих определен-

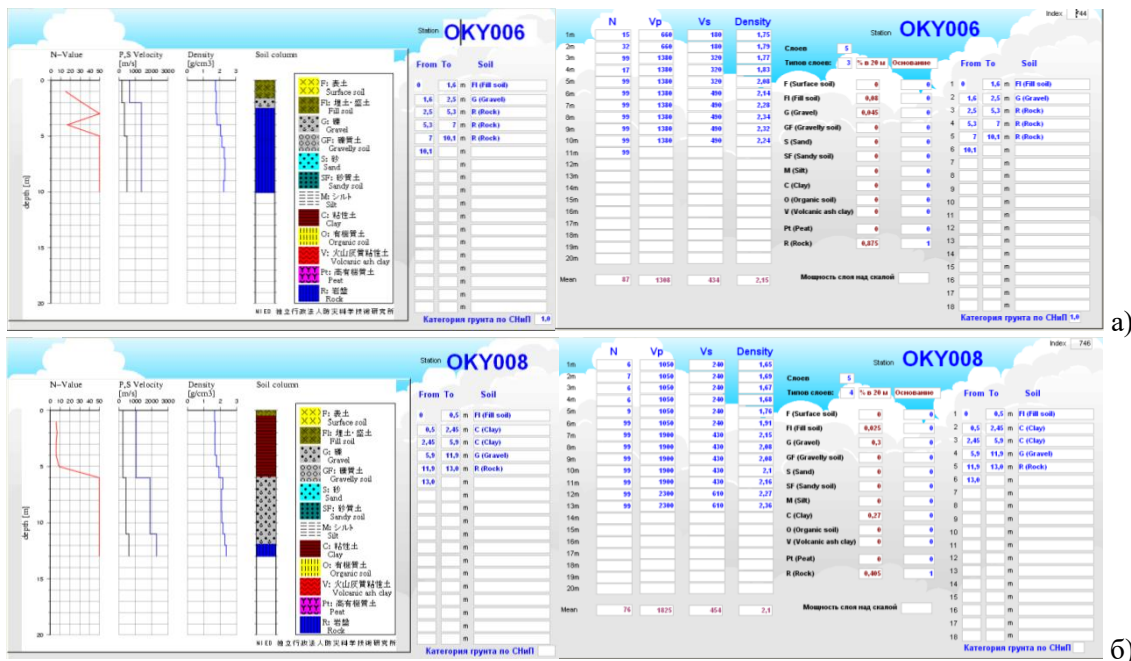


Рис. 6. Грунтовые условия сейсмических станций в базе данных K-NET – аналоги участка 1 галечниковых грунтов (перекрытых насыпным слоем) (а) и участка 2 – глинистых грунтов (б)

ным интервалам значений указанных параметров. По этой причине производится пересчет максимальных амплитуд колебаний на заданное эпицентральное расстояние. Для рассматриваемой базы данных был принят следующий закон затухания:

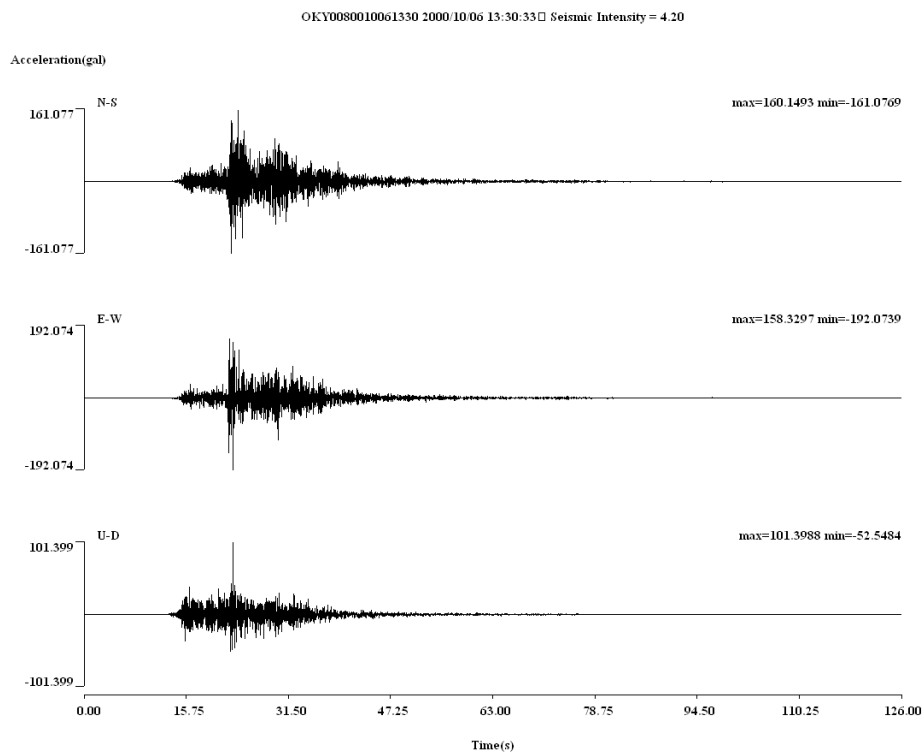
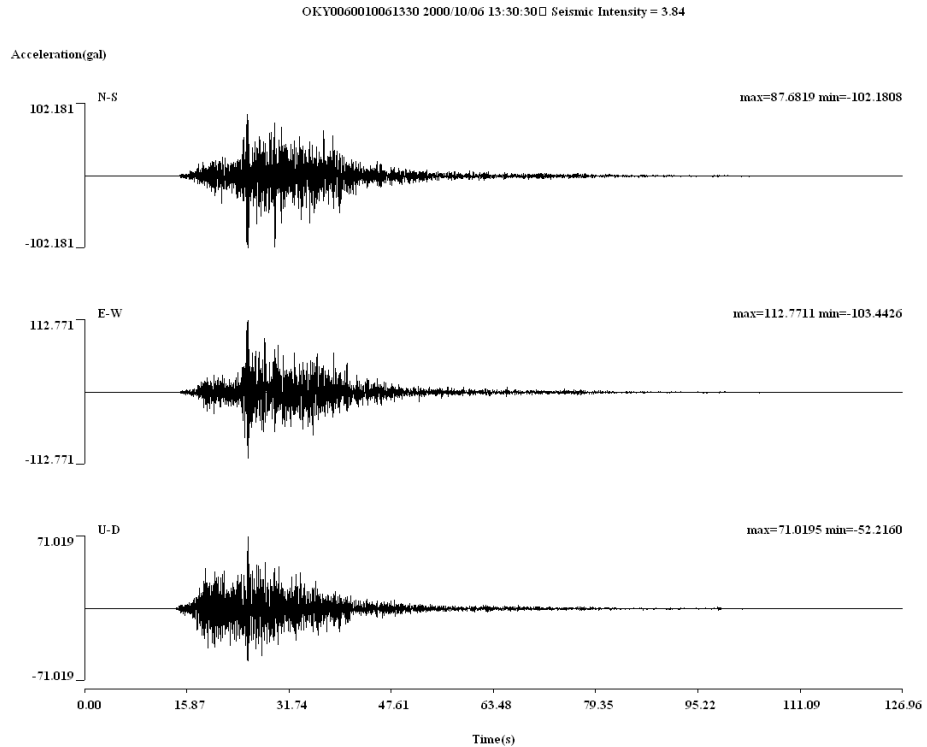


Рис. 7. Акселерограммы-аналоги для выбранных грунтовых условий: участка 1 галечниковых грунтов (перекрытых насыпным слоем) (а) и участка 2 – глинистых грунтов (б)

$$A = A_0 e^{-\alpha x}, \quad (3)$$

где A – амплитуда колебаний;

α – коэффициент затухания;

x – расстояние.

Тогда пересчет амплитуды колебаний A_1 на заданное эпицентрального расстояние даст A_2 :

$$A_2 = A_1 e^{\alpha(\Delta_2 - \Delta_1)} \quad (4)$$

В первом приближении коэффициент поглощения α , можно считать постоянным, в общем случае он является функцией частоты колебаний.

Коэффициент поглощения α может быть вычислен по модели затухания для данного региона. Таким образом, формируется банк данных, который помимо записей землетрясений и данных о грунтовых условиях расположения станций, также содержит эмпирические формулы для различных классов записей. В данной работе использовались данные, приведенные в [Окамото, 1980].

Отобранные из базы данных участки – аналоги рассматриваемых двух участков представлены на рис 6. Поиск производился по моделям, представленным на рис. 3, таким образом, что исходными данными подбора станций являлась зависимость скоростей поперечных сейсмических волн от глубины. Можно видеть, что для первого участка-аналога станции ОКУ006 верхний насыпной слой (Fillsoil) подстилается скальными грунтами (Rock), однако по скоростям сейсмических волн, данные скорости соответствуют галечниковым грунтам в нашей модели. Сейсмические записи одного из подобранных землетрясений представлены на рис. 7, эпицентральные расстояния имеют достаточно близкие значения 64 и 68 км. Амплитуды акселерограмм пересчитаны на идентичное эпицентральное расстояние по формуле (4) – табл. 1.

Таблица 1

Код станции	Эквивалент	Δ , км	A_{\max} , см/ c^2	A_{\max} (50 км), см/ c^2	ΔI
ОКУ006	Эквивалент галечников	64,35	152,18	181,67	-
ОКУ008	Глины	68,12	193,32	241,79	0,4

Выводы

- Рассмотрен процесс создания моделей грунтовой толщи и выполнения расчетов сейсмической реакции на основе способа многократно отраженных волн (МОВ) и инструментальных аналогий.
- Инструментально-расчетный метод в виде способа инструментальных аналогий основан на применении базы данных сильных движений, включающей почти 50000 записей сильных и разрушительных землетрясений.
- Для расчетов из указанной базы данных сильных движений подбираются записи землетрясений на участках с близкими для исследуемого участка грунтовыми условиями и характеристиками землетрясений (магнитуда, эпицентральное расстояние и т. д.).
- Учитывая полученные ранее зависимости для плотности и скорости распространения поперечных сейсмических волн, набор параметров сводится к мощ-

ностям слоев, слагающих грунтовую толщу и скоростям распространения в ней поперечных сейсмических волн. Далее производится выбор записей землетрясений соответствующей магнитуды эпицентрального расстояния и глубины очага.

• Получены приращения сейсмической интенсивности для грунтов, распространенных на территории г. Владикавказа. Для глинистых грунтов мощностью порядка 20 метров с наличием грунтов мягкопластичной консистенции приращение составляет 1 балл по отношению к участку распространения глинистых грунтов полутвердой консистенции мощностью до 5 метров. Для галечников с заполнителем >30% приращение составляет 0 баллов, с заполнителем <30% интенсивность уменьшается на 1 балл.

Литература

1. Бондырев И. В., Заалишвили В. Б. Опасность активизации геодинамических процессов на Северном Кавказе // Вестник Владикавказского научного центра. 2003. Т. 3. №2. С. 39–46.
2. Габеева И. Л., Заалишвили В. Б. Анализ колебаний нелинейной, поглощающей грунтовой среды по данным инструментального метода сейсмического микрорайонирования // В сборнике: Сейсмическая опасность и управление сейсмическим риском на Кавказе I Кавказская международная школа-семинар молодых ученых. Центр геофизических исследований ВНИЦ РАН и РСО-А, Заалишвили В. Б. (редактор), Владикавказский научный центр РАН и РСО-А. 2005. С. 205–211.
3. Заалишвили В. Б. Сейсмическое микрорайонирование по данным искусственного возбуждения колебаний грунтовой толщи: Автореферат дис. ... канд. физ.-мат. наук. Тбилиси, 1986.
4. Заалишвили В. Б. Сейсмическое микрорайонирование на основе изучения нелинейных свойств грунтов искусственными источниками // Автореферат дис.... доктора физ.-мат. наук. Москва, 1996.
5. Заалишвили В. Б. Инструментальный метод сейсмического микрорайонирования // Монография. Владикавказ, 1997.
6. Заалишвили В. Б., Мельков Д. А., Дзеранов Б. В. Особенности динамического поведения грунтов территории г. Владикавказа // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2008. №2. С. 67–71.
7. Заалишвили В. Б., Мельков Д. А., Чотчаев Х. О, Кануков А. С. и др. // Отчет о научно-исследовательской работе по теме: «Сейсмическое микрорайонирование правобережной и левобережной части г. Владикавказа (полевые исследования)» том 3, книга 3, труды ЦГИ ВНИЦ РАН и РСО-А. Владикавказ, 2010а. 327 с.
8. Заалишвили В. Б., Мельков Д. А. Способ сейсмического микрорайонирования Патент Российской Федерации №2389044 от 10 мая 2010 г.
9. Заалишвили В. Б., Мельков Д. А., Бурдзиева О. Г. Определение сейсмического воздействия на основе конкретной инженерно-сейсмологической ситуации района // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2010б. №1. С. 35–39.
10. Заалишвили В. Б., Певнев А. К., Рогожин Е. А. О геодезическом мониторинге для прогноза землетрясений на Северном Кавказе (на примере Владикавказского прогнозного полигона) // Геология и геофизика Юга России. 2011. №2. С. 33–40.
11. Заалишвили В. Б., Мельков Д. А., Габеева И. Л., Дзобоев Б. А., Дзеранов Б. В., Кануков А. С., Шепелев В. Д. Сейсмическое микрорайонирование территории г. Владикавказа // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2012. №1. С. 49–58.

12. Заалишвили В.Б., Харебов К.С., Харебов А.К. Создание баз данных сильных движений на основе современных воззрений // Геология и геофизика Юга России №3 2013. С. 39–44.
13. Заалишвили В.Б. Некоторые проблемы практической реализации сейсмического микрорайонирования. Факторы, формирующие интенсивность землетрясения // Геология и геофизика Юга России. 2014а. №3. С. 3–39.
14. Заалишвили В.Б. Зависимость спектральных характеристик сейсмических волн от строения верхней части разреза // Геология и геофизика Юга России №4. 2014б том 2. С. 15–44.
15. Заалишвили В.Б., Харебов К.С., Харебов А.К. Разработка базы данных сильных движений // Геология и геофизика Юга России №4. 2014. Том 2. С. 48–57.
16. Окамото Ш. Сейсмостойкость инженерных сооружений. М.: Стройиздат, 1980.
17. Отчет о сейсмическом микрорайонировании территории г. Владикавказа. Том 1. Книга 1. Инженерно-геологические и сейсмические исследования // Трест «СтавропольГИСИЗ» Кавминводское отделение. Пятигорск, 1991. 127 с.
18. Руководство по безопасности. РБ-006–98. Определение исходных сейсмических колебаний для проектных основ. М.: Федеральный надзор России по ядерной и радиационной безопасности (Госатомнадзор России), 1998. 63 с.
19. Свод правил. СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция. // СНиП II-7–81. Издание официальное. Подготовлено к изданию ФАУ «ФЦС». Москва. 2014. 126 с.
20. Zaalishvili V.B., Rogozhin E. A. Assessment of seismic hazard of territory on basis of modern methods of detailed zoning and seismic microzonation // Open Construction and Building Technology Journal. 2011. T. 5. P. 30–40.

DOI: 10.23671/VNC.2016.2.20807

GIS SIMULATION OF THE GEOLOGICAL OBJECTS SOIL CONDITIONS. STRONG MOTIONS DATA BASES AND BANKS

© 2016 A.S. Kanukov^{1,2}, Sc. Candidate (Tech.), D.A. Melkov¹, Sc. Candidate (Tech.), K.S. Kharebov¹, Sc. Candidate (Tech.)

¹Geophysical Institute of Vladikavkaz Scientific Center, Russia, 362002, Vladikavkaz, Markov str., 93a, e-mail: cgi_ras@mail.ru;

²Financial University Under the Government of the Russian Federation Vladikavkaz Branch, Russia, 362002, Vladikavkaz, Molodezhnaya str., 7

Influence of soil conditions evaluation on the seismic effect of possible earthquakes includes searches and determination of physic-mechanical conditions of the ground and actions simulation taking into account the ground structure. During the construction of mathematical models some specific assumptions frequently are assumed. Procedures of the ground conditions study and simulation in their indissoluble connection based on the procedure of the Vladikavkaz city soils seismic hazard assessment. Results of strong motions data bases using (based on example K-NET) for selecting the seismic records according to the fundamental characteristics of earthquakes (magnitude, the source depth, epicentral distance) and soil conditions of the corresponding stations on the basis of the greatest similarity of the ground models.

Keywords: ground thickness, geological engineering searches, model, simulation.