ГЕОФИЗИКА

УДК 550.34
DOI: 10.46698/VNC.2022.32.20.007

Оригинальная статья

Некоторые новые данные о влиянии различных грунтовых условий на вероятностные оценки сейсмической опасности территорий

Ю. К. Чернов[1], В. Б. Заалишвили[1], А. Ю. Чернов[2]

[1]Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук, Россия, 362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: vzaal@mail.ru;

[2]Инженерный институт ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» Россия, 355029, г. Ставрополь, пр. Кулакова, 2

Статья поступила: 31.10.2022, доработана: 24.11.2022, одобрена в печать: 05.12.2022

Резюме: Актуальность работы. В свете новых данных о спектрах колебаний грунта при землетрясениях рассмотрены важные с научной и практической точек зрения вопросы учета «грунтового» фактора в качестве одной из основных составляющих вероятностного анализа сейсмической опасности (*probabilistic seismic hazard analysis* или *PSHA*) территорий. **Цель исследования**. Изучение влияния установленных ранее различий в спектрах колебаний разных типов грунтов при землетрясениях разной величины и удаленности на результирующие вероятностные оценки сейсмической опасности территорий в конкретных сейсмогеологических условиях. **Методы исследования.** Работа основана на сопоставлении функций распределения вероятностей макросейсмической интенсивности сотрясений, полученных по результатам *PSHA* территории РСО-Алания. Сравнивались оценки, выполненные раздельно для «мягких» и «твердых» грунтов. Используемые в расчетах модели сейсмичности идентичны моделям, разработанным для детального сейсмического районирования этой территории. В качестве моделей сильных движений использованы разработанные в процессе предыдущих исследований новые эмпирические функции затухания спектров «мягких» и «твердых» грунтов. Итоговые оценки макросейсмической интенсивности получены пересчетом из вероятных спектров колебаний грунта. **Результаты исследования.** В рамках *PSHA* для средних периодов сотрясаемости 500, 1000, 2500 и 5000 лет произведены оценки и картирование по площади возможных на территории РСО-Алания макросейсмических интенсивностей сотрясений в условиях «мягких» и «твердых» грунтов с последующим определением разностей между ними. Значения этих разностей («приращений балльности») меняются от места к месту. Кроме того, они зависят от средних периодов повторяемости сотрясений. Размер этих вариаций может достигать 0,8 баллов *MSK*, что является достаточно большой величиной с практической точки зрения. Изменчивость «приращений балльности» показывает, что вероятностные оценки сейсмических воздействий с учетом местных грунтовых условий, выполняемые на основе распространенных в РФ «двухступенчатых» расчетных схем (где сначала дается «фоновая» интегральная вероятностная оценка, в которую затем вводится некоторая фиксированная «грунтовая» поправка), не являются корректными и могут содержать значительные погрешности. Более перспективными в данном отношении являются «одноступенчатые» схемы, когда реакции разных типов грунтов учитываются уже на первом этапе (т. е. до получения интегральных оценок) путем разработки соответствующих моделей сильных движений грунта.

Ключевые слова: вероятностные оценки сейсмической опасности, сейсмические свойства «мягких» и «твердых» грунтов, спектры колебаний грунта, сейсмическое микрорайонирование.

Для цитирования: Чернов Ю. К., Заалишвили В. Б., Чернов А. Ю. Некоторые новые данные о влиянии различных грунтовых условий на вероятностные оценки сейсмической опасности территорий. *Геология и Геофизика Юга России*. 2022. 12 (4): 85-100. DOI: 10.46698/VNC.2022.32.20.007.

GEOPHYSICS

DOI: 10.46698/VNC.2022.32.20.007

Original paper

Some new data on the influence of various soil conditions on probabilistic seismic hazard assessment of territories

Y. K. Chernov[1], V. B. Zaalishvili[1], A. Y. Chernov[2]

[1]Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation, e-mail: vzaal@mail.ru;

[2]Institute of Construction in the North-Caucasian Federal University, Stavropol Krai, 2 Kulakov Str., Stavropol 355029, Russian Federation

Reseived: 31.10.2022, revised: 24.11.2022, accepted: 05.12.2022

Abstract: Relevance. The issues of taking "ground" factor into account as one of the main components of probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) of territories, important from scientific and practical points of view, are considered in the light of the recent data on the ground vibration spectra during earthquakes. **Aim.** Study of the influence of the previously identified differences in the vibration spectra of various types of soils during earthquakes with different magnitude and distance on the resulting probabilistic assessments of the seismic hazard of territories in specific seismogeological conditions. **Methods.** The work is based on a comparison of the probability-distribution functions of the macroseismic intensity of ground motions, obtained from the PSHA results for the North Ossetia-Alania territory. The assessments carried out separately for "soft" and "hard" soils were compared. The seismicity models used in the calculations are identical to the models developed for the detailed seismic zoning of this territory. New empirical attenuation functions of spectra of "soft" and "hard" soils, developed during the previous studies, were used as strong motion models. The final assessments of macroseismic intensity were obtained by recalculation of the probable spectra of ground vibrations. **Results.** Within the framework of PSHA, for average periods of ground motions of 500, 1000, 2500 and 5000 years, assessment and mapping of the area of possible macroseismic intensities in the territory of North Ossetia-Alania under "soft" and "hard" soil conditions were made, followed by determination of the differences between them. The values of these differences ("intensity increments") vary from place to place. In addition, they depend on the average return periods of ground motions. The size of these variations can be up to 0.8 intensity of MSK-scale, which is quite a large value from a practical point of view. The variability of "intensity increments" shows that probabilistic assessments of seismic impacts, taking local soil conditions into account, performed on the basis of the "two-stage" calculation schemes common in the Russian Federation (where a "background" integral probabilistic assessment is first given, and then some fixed "soil" correction is introduced to it), are not correct and may contain significant errors. More promising in this regard are "single-stage" schemes, when the reactions of different soil types are taken into account already at the first stage (i. e., before the integral assessments obtaining) by developing appropriate models of strong ground motions.

Keywords: probabilistic seismic hazard assessmen, seismic properties of "soft" and "hard" soils, ground vibration spectra, seismic microzoning**.**

For citation: Chernov Y. K., Zaalishvili V. B., Chernov A. Y. Some new data on the influence of various soil conditions on probabilistic seismic hazard assessment of territories. *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (4): 85-100. DOI: 10.46698/VNC.2022.32.20.007.

Введение

Основные характеристики движений поверхности Земли при землетрясениях (макросейсмическая интенсивность сотрясений, амплитудный уровень и спектраль-

ный состав колебаний, их длительность и др.), определяющие уровень опасности этих землетрясений, зависят от местных грунтовых условий. Как показывают начавшиеся еще с исторических времен наблюдения, влияние «грунтового фактора» на общий негативный эффект от землетрясений весьма велико и находится в одном ряду с такими определяющими показателями, как величина (магнитуда) и удаленность землетрясения. Поэтому изучение различных аспектов формирования поля сильных движений грунта (СДГ) в различных инженерно-геологических условиях традиционно является одним из основных направлений исследований в области инженерной сейсмологии. Особенно глубоко и результативно эти исследования стали проводиться после появления специальных систем инструментальной регистрации сильных землетрясений. Среди наиболее крупных работ, подводящих итоги первых десятилетий таких исследований и указывающих перспективы на будущее можно отметить труд выдающегося ученого (которого многие считают отцом европейской инженерной сейсмологии) С.В. Медведева [Медведев, 1962]. Этому направлению большое внимание уделяли в своих исследованиях многие отечественные и зарубежные исследователи (см. обзоры и отдельные работы [Саваренский, 1972; Напетваридзе, 1973; Сейсмическое…, 1977; Сейсмический…, 1981; Аки, Ричардс, 1983; Ризниченко, 1985; Штейнберг, 1986; Оценка…, 1988; Чернов, 1989; Ратникова и др., 1988; Штейнберг и др., 1993; Кригер и др., 1994; Заалишвили, 2009; Atkinson, Boore, 2011; Campbell, Bozorgnia. 2014; Akkar et al., 2014; Beven et al., 2015; Алешин, 2017; Калинина и др., 2017; Sokolov, Sahran, 2018; Bora et al., 2019]). К настоящему времени уже создана общая научная база и выявлены основные элементы данного природного явления. В то же время ещё остаются отдельные вопросы, относящиеся к данной тематике. В частности, это относится к использованию вышеупомянутых знаний в практических целях. Так, например, несмотря на понимание того, что реакция грунта на входное сейсмическое воздействие сложным образом зависит от многих факторов (частоты сейсмического сигнала, геометрии границ слоев, углов подхода сейсмических волн, неупругих свойств реальных грунтов и др.) в большинстве случаев отечественные (и не только) нормативно-методические документы содержат рекомендации, сводящиеся к использованию некоторых констант, упрощенным способом учитывающих влияние расчетной грунтовой толщи (см., например, [Заалишвили и др., 2018; 2022]). Это связано, в том числе, с тем обстоятельством, что вышеуказанные зависимости достаточно сложны и определяются большим количеством входящих в них параметров, определение которых обычно затруднительно при проведении рутинных оценок сейсмической опасности.

В связи с этим в ряде инженерно- сейсмологических исследований (см. выше) предлагаются различные усовершенствования процедур учета грунтовых условий, направленные на то, чтобы повысить точность прогнозных оценок, не усложняя их выше некоторого приемлемого уровня. Одна из попыток продвинуться в этом вопросе предпринята и нами (см. [Чернов, 2022]). В этой работе описан первый этап начатых в данном направлении исследований. Основным результатом здесь стали полученные на основе достаточно представительного статистического материала эмпирические функции затухания уровней спектральной плотности Фурье ($|S|$) в зависимости от ограниченного и доступного для рутинного применения набора параметров – магнитуды землетрясения (M), расстояния до очага (D) и частоты спектральной составляющей (f). Оценки $|S|$ (M, D, f) в виде соответствующих функций распределения вероятностей выполнены раздельно для двух групп землетрясений,

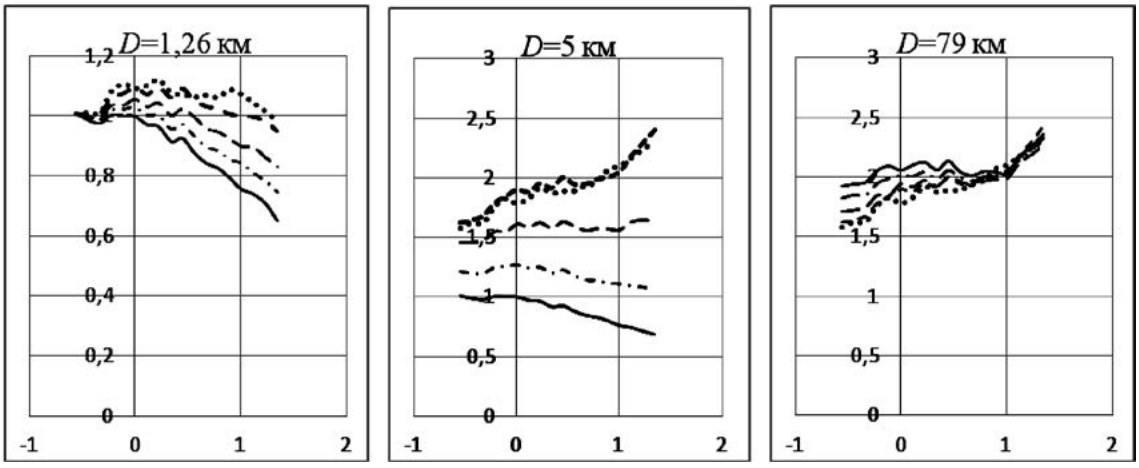

Рис. 1. Примеры наиболее вероятных спектральных характеристик «мягких» грунтов по отношению к «твердым» грунтам (φ (f) – ось ординат) на различных расстояниях до очага (D), рассчитанных для землетрясений разных магнитуд – сплошная линия, штрих-пунктир, длинный пунктир, короткий пунктир и точечная линии оценки для землетрясений с M = 7, 6, 5, 4 и 3, соответственно. Ось абсцисс – логарифм частоты в Гц /

Fig. 1. Examples of the most probable spectral characteristics of "soft" soils in relation to "hard" soils (φ (f) – the y-axis) at different distances to the source (D), calculated for earthquakes with different magnitudes – a solid line, a dot-dash line, a long dotted line, short dotted line and dotted line of the assessments for earthquakes with M = 7, 6, 5, 4 and 3, respectively. The x-axis – logarithm of frequency in Hz

различающихся грунтовыми условиями в пункте регистрации. Эти две группы грунтовых условий объединены под названиями «мягкие» и «твердые» грунты. Построенные функции затухания оказались существенно различными для «мягких» и «твердых» грунтов и для разных значений *M*, *D*, *f*, что приводит к тому, что соотношения уровней спектров колебаний «мягких» и «твердых» грунтов не являются константой, а сложным образом меняются при изменении *M*, *D*, *f*, что отлично от вышеупомянутых стандартных оценок, применяемых на практике. Сказанное наглядно иллюстрируется рисунком 1.

Очевидно, что использование подобных моделей СДГ в расчетах сейсмической опасности будет корректировать прогнозные оценки по сравнению с теми, что обычно используются на практике. Ответам на некоторые из вопросов о том, в каких сейсмогеологических условиях и в какой степени эти новые функции затухания влияют на конечные оценки сейсмической опасности и насколько это важно с практической точки зрения и посвящена настоящая работа, являющаяся продолжением начатых в [Чернов, 2022] исследований, чем и определяется ее *актуальность* и *новизна*, а также *цель* и *практическая значимость*.

Информационная база и методика исследований

Работа базируется на результатах вероятностного анализа сейсмической опасности (*probabilistic seismic hazard analysis* или *PSHA*), в качестве примера, выполненного для территории РСО-Алания. При этом применена та же расчетная схема, что и при оценках возможных сейсмических воздействий для детального сейсмического районирования (ДСР) данной территории (подробнее см. [Чернов, 2021]). Здесь укажем лишь, что в настоящей работе анализируются оценки, рассчитанные в рамках формулы полной вероятности, где условная вероятность описывает не-

определенности, связанные с прогнозированием параметров колебаний грунта при возникновении очага землетрясения, а безусловная – неопределенности возникновения этого очага в данном месте в заданный промежуток времени. Итоговая оценка при этом представляет собой вероятностную суперпозицию воздействий всех потенциально опасных очагов землетрясений с учетом их повторяемости.

При производстве вышеуказанных построений используются исходные данные, соответствующие двум типам участвующих в расчетах моделей – моделей локальной сейсмичности и моделей СДГ. Модели сейсмичности (модели зон ВОЗ, оценки размеров, механизмов и ориентации в пространстве очагов потенциально опасных землетрясений разных магнитуд, распределение очагов землетрясений разных магнитуд по глубине, их повторяемость во времени) для рассматриваемой территории приведены в [Чернов и др., 2018]. В качестве моделей СДГ используются новые вероятностные функции затухания спектров Фурье ускорений колебаний «мягких» и «твердых» грунтов, подробное описанные в [Чернов, 2022]. Здесь лишь отметим, что данные модели представляют собой статистические аппроксимации большого объема эмпирических данных (около 3400 спектров) колебаний грунта, зарегистрированные при землетрясениях с M=2,5-7,3 и D =1-658 км в различных грунтовых условиях, условно разделенных на две группы – «мягкие» и «твердые» грунты. Под терминами «мягкие» и «твердые» подразумеваются грунты, которые могут быть отнесены (с известной долей точности, конечно) к грунтам, соответственно, II и I категорий СНиП по сейсмическим свойствам.

Учитывая, что в отечественных нормативно-методических документах уровень сейсмической опасности выражается в виде баллов макросейсмической шкалы, в настоящей работе также сделаны оценки вероятных интенсивностей сотрясений (I) по 12-тибалльной шкале *MSK*. Исследования осуществлены в несколько этапов. Сначала в каждой из расчетных точек, расположенных в границах территории РСО-Алания и на прилегающих участках с шагом по сетке 5×5 км произведены оценки функций распределения вероятностей случайной величины I, которые рассчитывались через спектр Фурье ускорений колебаний грунта (см. [Чернов, 2022]) по формуле:

$$P[I \le i] = \prod_{j=i}^{12} \prod_{\mathrm{f}=\mathrm{f}_{\max}}^{\mathrm{f}_{\mathrm{j}}} \left(1 - \frac{1}{\sigma_{\mathrm{j,f}}\sqrt{2\pi}} \int_{x_{\min}}^{x_{j,f}} e^{-\frac{(x-a_{j,f})^2}{2\sigma_{\mathrm{j,f}}^2}} dx\right)^{k_f} \qquad (1)$$

где $a_{j,f}$ и $\sigma_{j,f}$ обозначают, соответственно, значения и стандарты величин $x=lg|S|$ приписанных балльности $I=j$ на частотах, «ответственных» за интенсивность сотрясений f_j, а также средние значения и стандарты величин $x=lg|S|$, приписанных балльности $I=i$, f на частотах f, больших, чем частота, «ответственная» за сейсмический эффект данной силы $I=j$; $x_{j,f}$ – значение логарифма наблюденного спектра на частотах f_j, а также на частотах больших частоты, «ответственной» за балльность $I=j$; x_{min} – так же как и в выражении (1.6) равно $a_{j,f}$-5$\sigma_{j,f}$; k_f – показатель степени, равный единице для частот, «ответственных» за макросейсмический эффект I_j, и меньше единицы для частот, больших, чем частота f_j, для которых $k_f \approx k_g/k_i$, когда k_g – эмпирически определяемый коэффициент линейной регрессии $lg|S|$ на I для частоты f_j.

В связи с тем, что в данном случае интенсивность сотрясений оценивается не по результатам прямых макросейсмических обследований, а посредством пересче-

тов через спектр Фурье колебаний грунта, то далее (также, как в [Чернов, 2021] и других наших предыдущих работах) будем называть получаемые с помощью выражения (1) оценки спектральной балльностью ($I_{сп}$).

На следующем этапе по полученным функциям распределения (1) оценивались значения $I_{сп}$, вероятность не превышения которых в данных расчетных точках за время экспозиции 50 лет составляет 0,9; 0,95; 0,98 и 0,99, что согласно принятым пуассоновским моделям распределения землетрясений во времени, соответствует средним периодам повторяемости превышений этих уровней t=500, 1000, 2500 и 5000 лет. Такие построения выполнены раздельно для «мягких» и «твердых» грунтов.

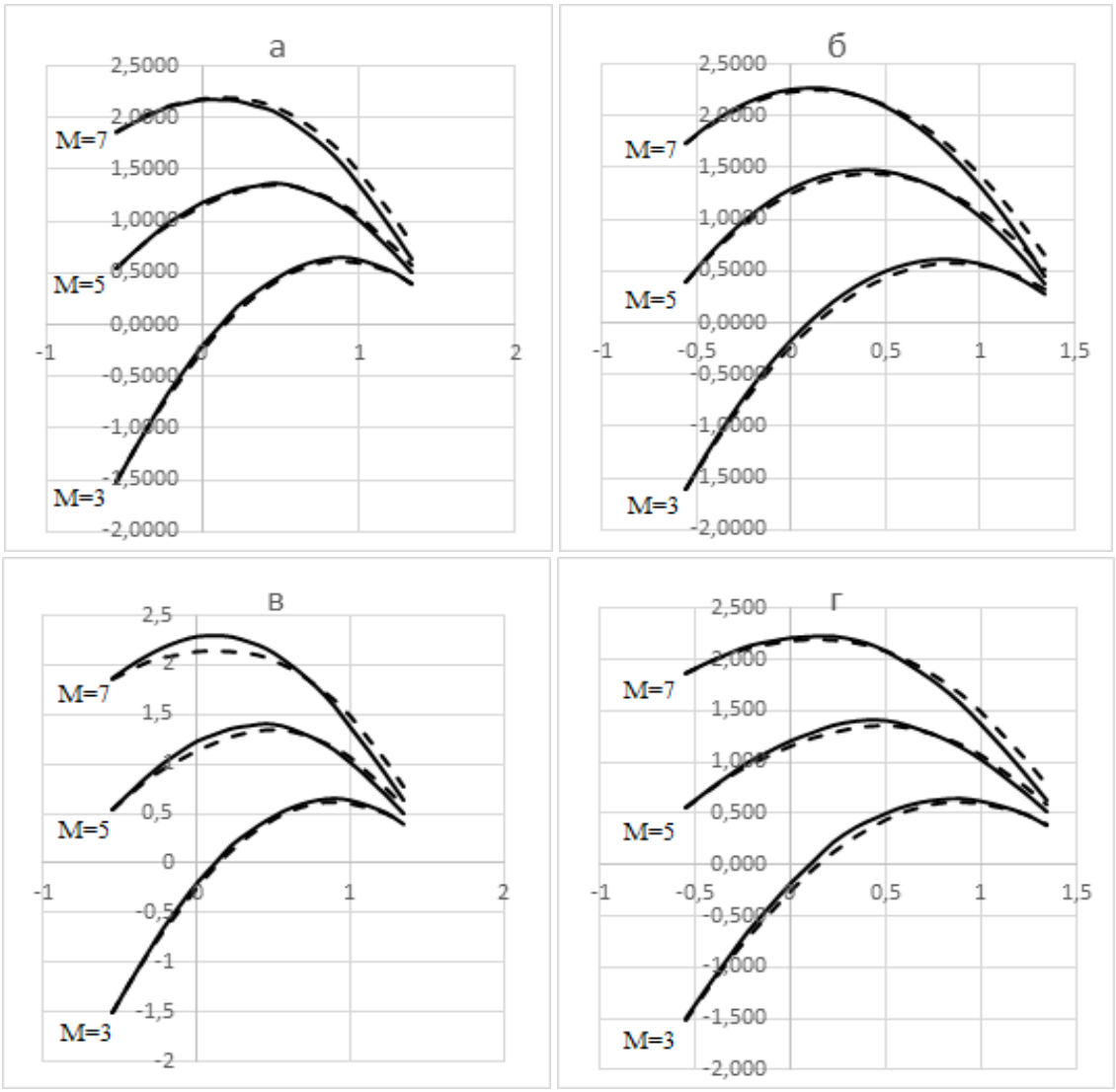

Рис. 2. Наиболее вероятные значения спектральной плотности Фурье ускорений колебаний «мягких» (сплошная линия) и «твердых» (пунктирная линия) грунтов в ближней зоне землетрясений разных магнитуд (M), соответствующие Вариантам 1, 2, 3 и 4 (индексы а, б, в, г, соответственно). Ось ординат – lg|S| в см/с; ось абсцисс – lg f в Гц /

Fig. 2. The most probable values of the Fourier spectral density of vibration accelerations of "soft" (solid line) and "hard" (dashed line) soils in the near zone of earthquakes of different magnitudes (M), corresponding to Variants 1, 2, 3 and 4 (indices a, b, c, d, respectively). The y-axis is lg|S| in cm/s; the x-axis – lg f in Hz

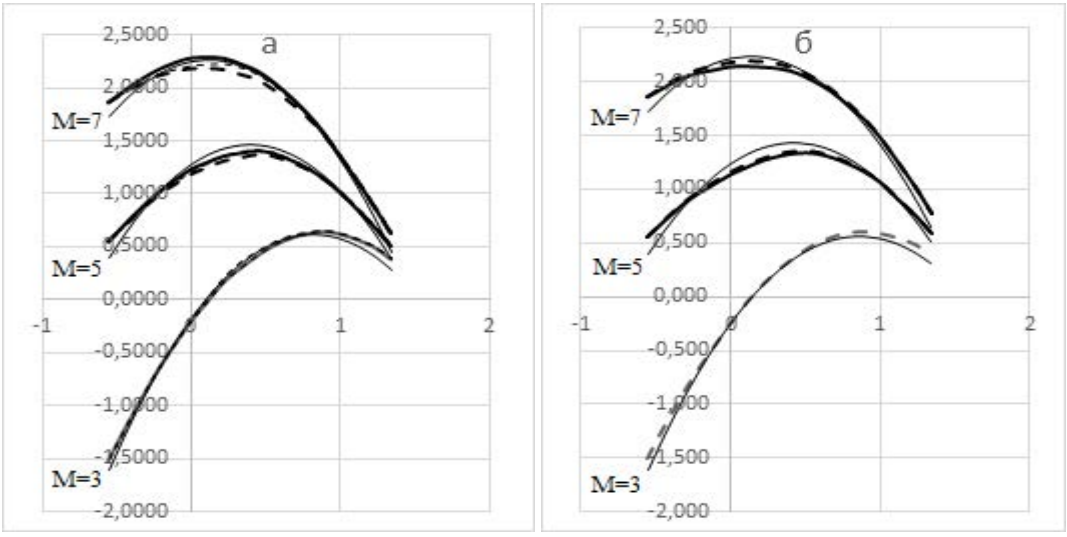

Рис. 3. Сравнение различных вариантов наиболее вероятных спектров Фурье ускорений колебаний «мягких» (а) и «твердых» (б) грунтов, в ближних зонах землетрясений разных магнитуд (цифры около кривых). Варианты 1, 2, 3 и 4- толстый пунктир, тонкая линия, толстая линия и тонкий пунктир, соответственно. Ось абсцисс – lgf (Гц); ось ординат – lg|S| (см/с) /
Fig. 3. Comparison of various variants of the most probable Fourier spectra of vibration accelerations of "soft" (a) and "hard" (b) soils in the near zones of earthquakes with different magnitudes (numbers near the curves). Variants 1, 2, 3 and 4 are denoted by thick dotted line, thin line, thick line and thin dotted line, respectively. The x-axis is lgf (Hz); the y-axis – lg|S| (cm/s)

Далее для каждой расчетной точки определялись разности в значениях $I_{сп}$, полученных для «мягких и «твердых» грунтов ($\Delta I_{сп}$ *MSK*) при одинаковых значениях t=500, 1000, 2500 и 5000 лет.

И, наконец, в качестве итогового построения по этим определенным для каждой из расчетных точек разностям произведено зонирование рассматриваемой территории РСО-Алания и прилегающих участков по величинам $\Delta I_{сп}$ *MSK*, рассчитанным для разных периодов повторяемости t=500, 1000, 2500 и 5000 лет. Выделение зон с различными уровнями $\Delta I_{сп}$ сделано при помощи изолиний, проводимых с шагом 0,2 балла *MSK*.

Для оценки чувствительности производимых вероятностных оценок $\Delta I_{сп}$ к вариабельности функций $|S|$ (M, D, f) наряду с первоначальными оценками этих функций из [Чернов, 2022], которые в дальнейшем обозначаются как Вариант 1, дополнительно рассмотрены еще три, несколько отличных от Варианта 1. варианта пар таких функций затухания для «мягких» и «твердых» грунтов (см. рис. 1 и 2).

Вариант 2 построен на базе исходного массива данных, но с использованием иного, чем в работе [Чернов, 2022] способа их аппроксимации. Здесь зависимости $|S|$ (M, f) в ближней зоне землетрясений разных магнитуд строились в виде $\lg|S| = a \ln M + b$, где в рассматриваемых диапазонах магнитуд и частот для «мягких» грунтов:

$$a = -1{,}978\ lgf + 2.853 \quad и \quad b = -1.199\ (lgf)^2 + 4{,}122\ lgf - 3{,}305 \qquad (2)$$

для «твердых» грунтов:

$$a = -1{,}877\ lgf + 2.909 \quad и \quad b = -1.092\ (lgf)^2 + 3{,}945\ lgf - 3{,}436 \qquad (3)$$

В выражениях (2) и (3) $|S|$ в см/с.

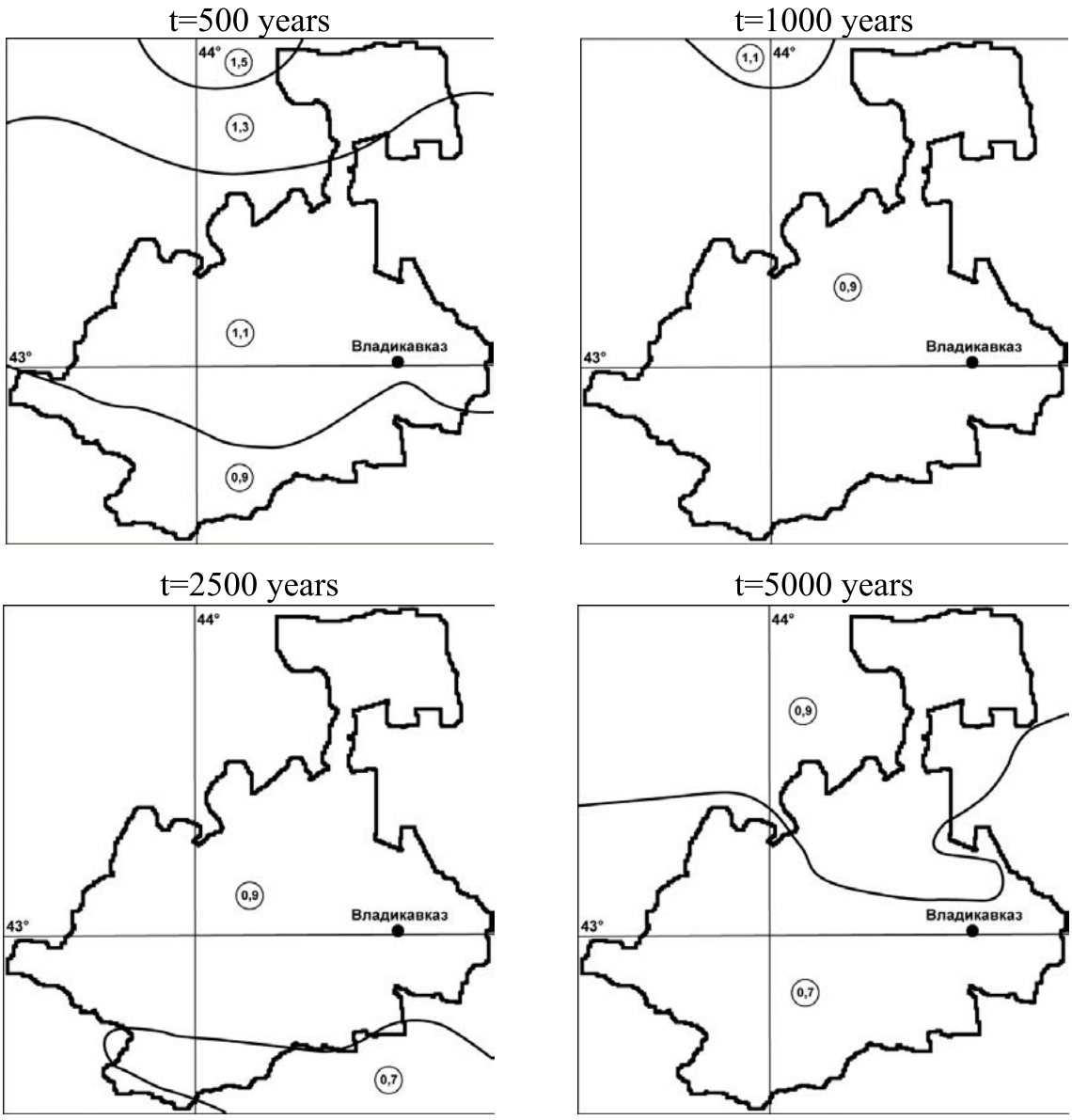

Рис. 4. Зонирование рассматриваемой территории по вероятным значениям ΔI_{cp}, для разных средних периодов повторяемости сотрясений t с использованием функций затухания |S| (M, D, f) по Варианту 1. Толстая линия – граница РСО-Алания, тонкие линии – границы зон с разными значениями ΔI_{cp}. Цифры в кружках – средние по зоне значения ΔI_{cp} в баллах MSK /
Fig. 4. Zoning of the considered territory according to the probable values of ΔI_{sp}, for different average return periods of ground motions t using the attenuation functions |S| (M, D, f) according to the Variant 1. The thick line denotes the boundaries of RNO-Alania, the thin lines – the boundaries of zones with different values of ΔI_{sp}. The numbers in circles denote the average for the zone values of ΔI_{sp} in MSK intensity scale

Варианты 3 и 4, используются в целях численного эксперимента и представляют собой корректировку Вариантов 1 и 2.

В Варианте 3 уровни спектров для «мягких» грунтов в ближней зоне землетрясений с M=7 в области их максимальных значений (на частотах ~1,3 Гц) повышены примерно на 30% по сравнению с Вариантом 1. Для других магнитуд и частот данное превышение постепенно снижается до нуля. Спектры «твердых» грунтов в данном варианте построены схожим образом, с той разницей, что в области макси-

мальных частот спектр по Варианту 3, наоборот, снижен по отношению к аналогичной оценке по Варианту 1 примерно на 6%.

В Варианте 4 логарифмы уровней спектров «мягких» грунтов в ближней зоне землетрясений приняты равными средним значениям между оценками по Вариантам 1 и 3. Спектры для «твердых» грунтов здесь приняты такими же, как в Варианте 1.

Кроме уровней спектров в ближних зонах все остальные характеристики функций затухания спектров с расстоянием (размеры ближних, переходных и дальних

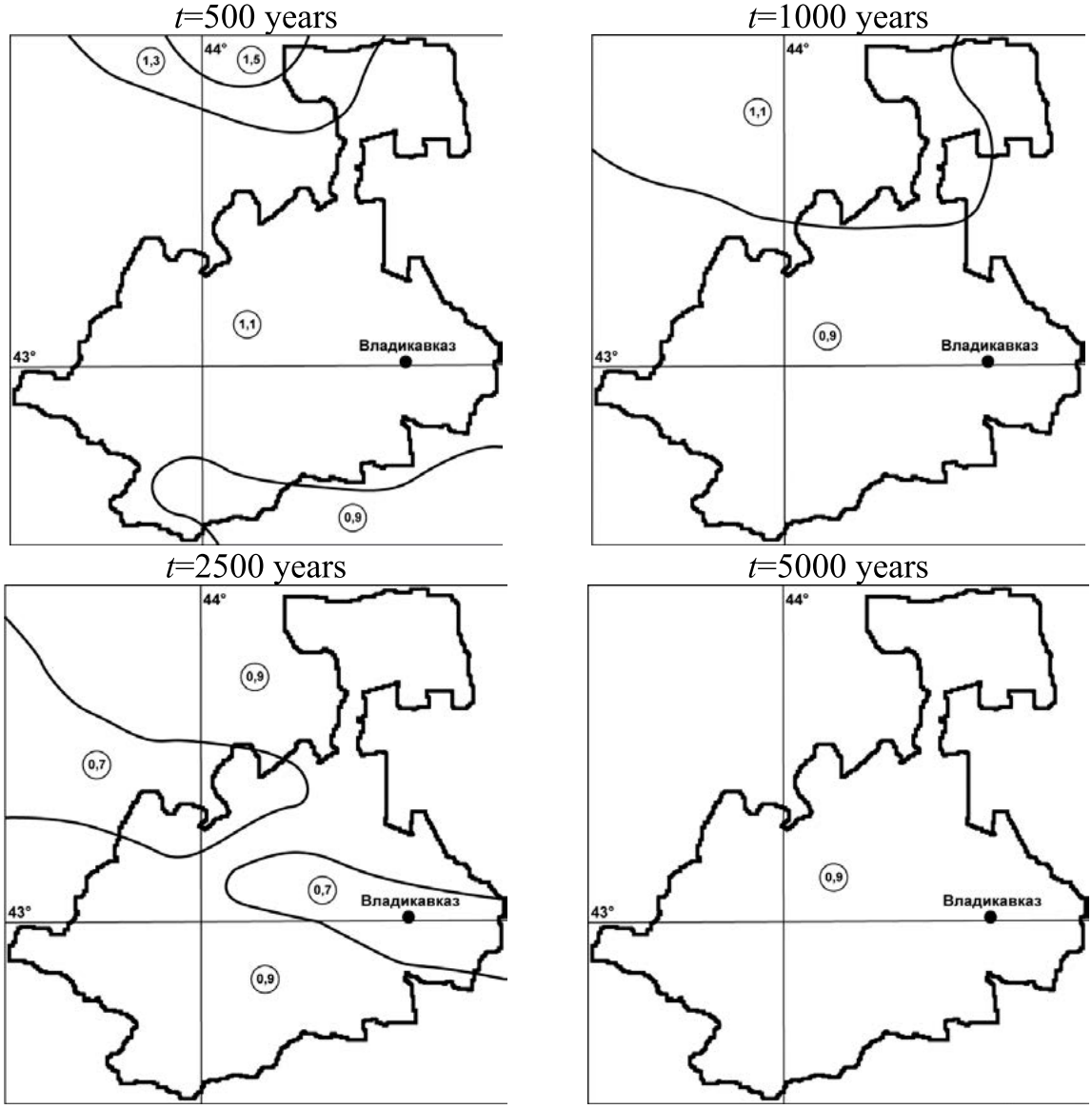

Рис. 5. Зонирование рассматриваемой территории по вероятным значениям ΔI_{cp}, для разных средних периодов повторяемости сотрясений t с использованием функций затухания |S| (M, D, f) по Варианту 2. Толстая линия – граница РСО-Алания, тонкие линии – границы зон с разными значениями ΔI_{cp}. Цифры в кружках – средние по зоне значения ΔI_{cp} в баллах MSK /

Fig. 5. Zoning of the considered territory according to the probable values of ΔI_{sp}, for different average return periods of ground motions t using the attenuation functions |S| (M, D, f) according to the Variant 2. The thick line denotes the boundaries of RNO-Alania, the thin lines – the boundaries of zones with different values of ΔI_{sp}. The numbers in circles denote the average for the zone values of ΔI_{sp} in MSK intensity scale

зон, подзон дальней зоны, коэффициенты затухания на разных частотах) в Вариантах 2-4 приняты такими же, как и в описанном в [Чернов, 2022] базовом Варианте 1.

Результаты работы и их обсуждение

На рисунках 3, 4 и 5 показаны результаты зонирования территории РСО-Алания и прилегающих районов по вероятным значениям $\Delta I_{сп}$, выполненного с использованием разных вариантов функций затухания $|S|$ (M, D, f). Рисунками 3 и 4 оценки, произведенные с помощью функций $|S|$ (M, D, f), аппроксимирующих данные реальных наблюдений (Варианты 1 и 2), проиллюстрированы в полном объеме, т. е. для всех рассматриваемых значений t=500, 1000, 2500 и 5000 лет. Оценки же, с применением функций $|S|$ (M, D, f), соответствующих Вариантам 3 и 4 показаны не все, а только те, которые получены для t = 500 лет. Это сделано во избежание перегрузки статьи иллюстративным материалом и с учетом того, что вариации расчетных значений $\Delta I_{сп}$ и в таком виде (см. рис. 5) прослеживаются достаточно четко.

Проиллюстрированные рисунками 3-5 результаты выполненных построений позволяют выделить два основных момента. Первый – это наблюдаемая в пределах рассматриваемой территории площадная вариабельность вероятных значений «интегральных приращений балльности» «мягких» грунтов по сравнению с «твердыми» грунтами ($\Delta I_{сп}$), которая, в свою очередь также изменяется в зависимости от среднего периода повторяемости сотрясений (t). Второй – это размер таких флуктуаций, который в наших опытах, например, для средних периодов повторяемости t =500 лет, может достигать 0,8 балла *MSK*, что уже является достаточно существенной величиной с практической точки зрения. Если же сравнивать между собой оценки $\Delta I_{сп}$ по всем вариантам расчетов и по всем рассмотренным средним периодам сотрясений (t=500-5000 лет), то величина вариаций $\Delta I_{сп}$ становится еще больше и в нашем случае может достигать 1,2 балла *MSK*.

Оценивая реалистичность полученных оценок $\Delta I_{сп}$ можно, отметить, что они достаточно адекватным образом реагируют, например, на изменения в исходных спектрах колебаний. Так, при возрастании разницы между уровнями спектров «мягких» и «твердых» грунтов на 20-40% (рис. 2), значения $\Delta I_{сп}$ также увеличиваются на 0,3-0,4 балла *MSK*. При этом площадная изменчивость и зависимость от t расчетных разностей $\Delta I_{сп}$ сохраняется примерно на том же уровне. В пользу реалистичности настоящих оценок говорит также близость значений $I_{сп}$, рассчитанных в настоящей работе для «мягких» грунтов к вероятностным оценкам макросейсмической интенсивности сотрясений, полученным при ДСР территории РСО-Алания. Средние значения и стандартные отклонения поточечных различий варьируют здесь в пределах 0,03-0,06 и 0,03-0,05 баллов *MSK*, соответственно. Далее. Средневзвешенные по всей рассматриваемой территории значения $\Delta I_{сп}$ для разных частот, периодов повторяемости сотрясений и вариантов расчетов варьируют в пределах 0,82-1,14 балла *MSK* при изменении оцененных по исходным функциям затуханий средних значений $\Delta lg|S|$ (M, D, f) $= lg|S|$ (M, D, f) $_{мяг. гр.} - lg|S|$ (M, D, f) $_{тв. гр.}$ от 0,243 до 0,345. Это значит, что уровень спектров при переходе от «мягких» к «твердым» грунтам изменяется (уменьшается) в среднем в 1,75-2,21 раза, что хорошо согласуется с современными представлениями о характере таких соотношений. Наконец, указанные выше средние значения $\Delta I_{сп}$ практически совпадают с рекомендациями отечественных СНиП, по увеличению расчетной сейсмичности на один балл при переходе от грунтов I категории СНиП по сейсмическим свойствам к грунтам II

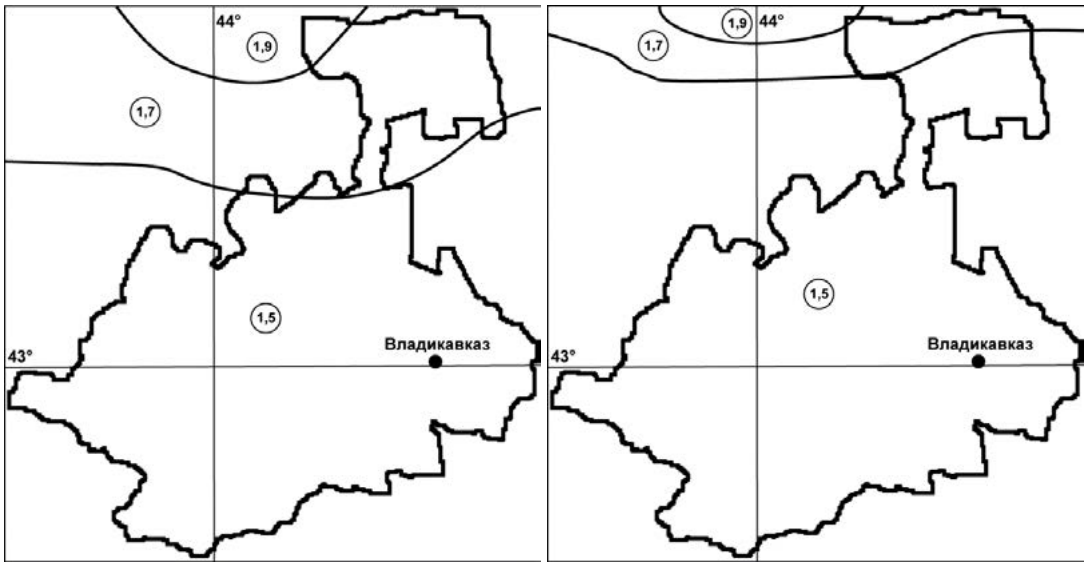

Рис. 6. Зонирование рассматриваемой территории по вероятным значениям $\Delta I_{сп}$, для среднего периода повторяемости сотрясений t =500 лет с использованием функций затухания |S| (M, D, f) по Варианту 3 (а) и по Варианту 4 (б). Толстая линия – граница РСО-Алания, тонкие линии – границы зон с разными значениями $\Delta I_{сп}$. Цифры в кружках – средние по зоне значения $\Delta I_{сп}$ в баллах MSK /

Fig. 6. Zoning of the considered territory according to the probable values of ΔI_{sp}, for the average return period of ground motions t =500 years using the attenuation functions |S| (M, D, f) according to the Variant 3 (a) and according to the Variant 4 (b). The thick line denotes the boundaries of RNO-Alania, the thin lines – the boundaries of zones with different values of ΔI_{sp}. The numbers in circles denote the average for the zone values of ΔI_{sp} in MSK intensity scale

категории. Таким образом, проведенные сопоставления свидетельствуют о том, что полученные в результате настоящего исследования оценки обладают определенным уровнем реалистичности и надежности.

Анализируя вышеизложенное, следует подчеркнуть, что сама по себе вариабельность параметра $\Delta I_{сп}$ не является неожиданной. Она уже предопределена показанными в [Чернов, 2022] различиями в исходных функциях затухания спектров с расстоянием для «мягких» и «твердых» грунтов. Очевидно, что эти различия должны приводить к тому, что значения $\Delta I_{сп}$ могут изменяться из-за разного расположения расчетных точек по отношению к имеющейся в рассматриваемом районе системе зон ВОЗ и соответствующих разностей в абсолютных и относительных повторяемостях потенциально опасных для этих расчетных точек землетрясений. Вышеописанные результаты полностью подтверждают сказанное. Таким образом, адекватные вероятностные оценки сейсмической реакции разных типов грунтов (и, соответственно, их разностей) должны строиться на основе взаимосвязанного учета как различий в сейсмических свойствах самих грунтов, так и в характеристиках всего включающего расчетную точку сейсмогенерирующего объема энергия-пространство – время. При этом заранее, (т. е. без проведения соответствующих расчетов) оценить, например, величину и площадную конфигурацию таких вариаций, представляется проблематичным из-за уникальности сочетаний факторов (M, D, f и t) определяющих итоговые значения $\Delta I_{сп}$ в каждой расчетной точке.

В связи с этим возникает вопрос о возможности получения (без существенной потери точности) таких (т. е. с учетом местных грунтовых условий) вероятностных оценок сейсмической опасности на основе стандартных рекомендаций

большинства российских нормативно-методических документов. Действительно, в отечественной инженерно-сейсмологической практике пока доминирует подход, согласно которому интегральные оценки сейсмической опасности, учитывающие объективно существующие различия в локальных грунтово-геоморфологических условиях, принципиально разделены на два этапа (мы называем эту систему оценок «двухступенчатой»). Здесь полный анализ сейсмической опасности (PSHA), учитывающий характеристики сейсмогенерирующего объема энергия-пространство – время, производится только для некоторого, в известной степени абстрактного, (т. к. его присутствие в расчетной точке не обязательно), типа грунта. Иногда такие грунты еще называют «эталонными». В российской практике за «эталонные» обычно принимают так называемые «средние» грунты, соответствующие грунтам II категории СНиП по сейсмическим свойствам. В последнее время, кстати, в нашей стране вслед за западными тенденциями появляются предложения использовать в качестве «эталонных» скальные грунты. Не обсуждая здесь высказываемые при этом резоны таких замен, заметим лишь, что, в контексте поставленных перед нашим исследованием задач, эти замены дела не меняют. В любом случае, упомянутые выше процедуры (т. е. оценки воздействий для «эталонного» грунта) составляют содержание и осуществляются в рамках вышеозначенного первого этапа. В отечественной практике они реализуются исследованиями типа общего (ОСР) и детального (ДСР) сейсмического районирования, а также осуществляемого в рамках сейсмического микрорайонирования (СМР) уточнения исходной сейсмичности (УИС). Переход же от оценок для «эталонных» грунтов к оценкам для «реальных» грунтов, т. е. грунтов, наличествующих в данной расчетной точке, осуществляется в рамках второго этапа, путем введения в сформированный на первом этапе результат, тех или иных «грунтовых» поправок. Особенностью этих поправок в свете рассматриваемых здесь вопросов, является их независимость от результатов *PSHA* первого этапа и, главное то, что они имеют другой физический смысл. Так, если результат *PSHA* есть суперпозиция воздействий от разных сейсмических событий с учетом фактора *неопределенности* их возникновения, то «грунтовые» поправки таковыми не являются т. к. дают оценку (пусть даже вероятностную) для некоего *достоверного* события.

Таким образом, продемонстрированная настоящим исследованием органическая связь «грунтовых» поправок с особенностями зон ВОЗ и сейсмического режима в окружающем расчетную точку сейсмогеологическом пространстве «двухступенчатыми» схемами практически игнорируется. Это, как показывают, например, рисунки 3-5, может приводить к существенным погрешностям в итоговых оценках уровня сейсмической опасности в данном месте, что является органическим недостатком таких «двухступенчатых» решений.

Указанные несоответствия показывают, что при более корректной постановке вопроса «грунтовая» поправка должна вводится в соответствующие модели сильных движений грунта еще на первом этапе, до интегрирования воздействий от отдельных потенциально опасных очагов землетрясений, а не после их интегрирования, что происходит, когда в вероятностные результаты ОСР, ДСР или УИС затем вводятся те или иные «грунтовые» поправки. Такие оценки мы называем «одноступенчатыми». В то же время просто переход к «одноступенчатыми» расчетным схемам является условием необходимым, но недостаточным. Достаточным он мажет стать в том случае, если, так же, как и базовые «региональные» или «фоновые» оценки, «грунтовые» поправки, будут учитывать их зависимость, в том числе, и

от тех характеристик, от которых зависят выполняемые для «эталонных» грунтов базовые оценки. В настоящем исследовании, например, такими характеристиками являются M, D, f и t.

Выводы

Результаты настоящих исследований свидетельствуют о том, что учет выявленного на предыдущих этапах более сложного, чем обычно принимается в стандартных оценках характера изменения с расстоянием спектров «мягких» и «твердых» грунтов может приводить к значительным корректировкам итоговых вероятностных оценок сейсмической опасности. Корректировки эти имеют индивидуальный характер, т. к. зависят не только свойств самих грунтов, но и от характеристик всего сейсмогенерирующего пространства (включая параметры сейсмического режима), в пределах которого имеет распространение данный тип грунта. Причем характер этих зависимостей различен для разных типов грунта. Данное исследование проведено на примере территории РСО-Алания, со своими сейсмогеологическими условиями, вообще говоря, отличными от других сейсмоактивных районов. Поэтому для составления более полных представлений о рассматриваемом вопросе, как таковом, полезно провести подобные оценки и для других территорий, с другими сейсмогеологическими условиями. Кроме того, учитывая, что в данной работе среди многих важных для инженерно-сейсмологической практики характеристик сейсмических воздействий, пока рассмотрены только макросейсмические интенсивности сотрясений, в дальнейшем нужно подобным образом рассмотреть также вопрос и относительно других параметров СДГ. Эти и некоторые другие аспекты, касающиеся данной тематики, планируется рассмотреть в дальнейшем.

На сновании вышеизложенного могут быть сделаны следующие **выводы:**

1. Вероятностные оценки возможных сейсмических воздействий с учетом местных грунтовых условий, выполняемые на основе распространенных в РФ «двухступенчатых» расчетных схем (где сначала дается «фоновая» интегральная вероятностная оценка, в которую затем вводится «грунтовая» поправка), не являются корректными и могут содержать погрешности, имеющие существенное практическое значение.

2. Более перспективными в данном отношении являются «одноступенчатые» схемы расчетов, когда реакции разных типов грунтов учитываются уже на первом этапе (т. е. до получения интегральных оценок) путем разработки соответствующих моделей СДГ.

3. Поскольку в данной работе рассмотрены частные случаи оценок только макросейсмических интенсивностей сотрясений и только для сейсмогеологических условий территории РСО-Алания, в дальнейшем, для выявления более общей картины, под тем же углом следует рассмотреть и другие параметры сейсмических воздействий (амплитуды, спектры, акселерограммы и др.), а также оценки сейсмической опасности в других сейсмоактивных районах.

Литература

1. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Теория и методы. Т. 1-2. – М.: Мир, 1983. – 520 с.

2. Алешин А. С. Континуальная теория сейсмического микрорайонирования. – М.: Научный мир, 2017. – 300 с.

3. Заалишвили В.Б. Сейсмическое микрорайонирование территорий городов, населенных пунктов и больших строительных площадок. Учебное пособие. – М.: Наука, 2009. – 350 с.

4. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Макиев В.Д. Макросейсмическое проявление сейсмических событий, обусловленное влиянием грунтовых условий и формирование карт сейсмического микрорайонирования. // Геология и геофизика Юга России. – 2018. – №1. С. 48-55. DOI 10.23671/VNC.2018.1.11247

5. Заалишвили В.Б. Мельков Д.А., Никонова Н.В., Смирнова Л.Н., Уздин А.М. Характеристики пространственной неоднородности поля ускорений дневной поверхности // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12 (1). – С. 75-88. DOI: 10.46698/VNC.2022.74.27.006

6. Калинина А.В., Аммосов С.М., Быкова В.В., Татевосян Р.Э. О применимости стандартного спектра реакции для оценки ожидаемых сейсмических воздействий. // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2017. – Т. 44. №2. – С. 67-73. DOI: 10/21455/VIS2017/ 2-4.

7. Кригер Н.И., Кожевников А.Д., Миндель И.Г. Сейсмические свойства дисперсных пород (сейсмоэкологический подход). – М.: ИНЖЕКО, 1994. – 195 с.

8. Медведев С.В. Инженерная сейсмология. – М.: Госстройиздат, 1962. – 284 с.

9. Напетваридзе Ш.Г. Некоторые задачи инженерной сейсмологии. – Тбилиси: Мицниерба, 1973. – 162 с.

10. Оценка влияния грунтовых условий на сейсмическую опасность. Методическое руководство. / Отв. Ред. О. В. Павлов; Институт земной коры. – М.: Наука, 1988. – 244 с.

11. Ратникова Л.И. Сакс М.В. Кронрод Т.Л. К вопросу о пересчете акселерограмм сильных движений на различные грунтовые условия. // Исследования по сейсмической опасности. – М.: Наука. 1988. – С. 81-93.

12. Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. Избран. труды. – М.: Наука, 1985. – 408 с.

13. Саваренский Е.Ф. Сейсмические волны. – М.: Наука, 1972. – 293 с.

14. Сейсмический риск и инженерные решения. / Под ред. Ц. Ломнитца и Э. Розенблюта. – М.: Недра, 1981-375 с.

15. Сейсмическое микрорайонирование. / Под ред. С.В. Медведева. – М.: Наука, 1977. – 248 с.

16. Чернов Ю.К. Сильные движения грунта и количественная оценка сейсмической опасности территории. – Ташкент: Фан, 1989. – 295 с.

17. Чернов Ю.К. Опыт детальных вероятностных оценок возможных сейсмических воздействий на территории РСО-Алания. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11 (2). – С. 87-102. DOI: 10.46698/VNC.2021.83.10.007

18. Чернов Ю.К. Некоторые предварительные данные о спектрах колебаний «мягких» и «твердых» грунтов при землетрясениях разных магнитуд и удаленностей. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12 (3). – С. 61-76. DOI: 10.46698/VNC.2022.45.59.004

19. Чернов Ю.К., Заалишвили В.Б., Дзеранов Б.В. Модели сейсмичности для вероятностного детального сейсмического районирования территории РСО-Алания. // Геология и геофизика Юга России. – 2018. – №4. – С. 162-178. DOI:10.23671/VNC.2018.4.20158

20. Штейнберг В.В., Сакс М.В., Аптикаев Ф.Ф. и др. Методы оценки сейсмических воздействий. // Вопросы инженерной сейсмологии. Вып. 34. – М.: Наука. 1993. – С. 5-94.

21. Штейнберг В.В. О поведении рыхлых грунтов при сильных землетрясениях. // ДАН СССР. – 1984. – Т. 275. №2. – С. 350-354.

22. Akkar S., Sandikkaya M.A., Bommer J.J. Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. // Bull. Earthq. Eng. – 2014. – Vol. 12 (1). – pp 359-387. DOI: 10.1007/s10518-013-9461-4

23. Atkinson G.M. and D.M. Boore. Modifications to existing ground-motion prediction equations in light of new data. // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2011. – Vol. 101 (3). – pp. 1121-1135.

24. Beven K.J., Aspinall W.P., Bates P.D., Borgomeo E., Goda K., Hall J.W., Page T., Phillips J.S., Rougier J.T., Simpson M., Stephenson D.B., Smith P.J., Wagener T.,

Watson M. Epistemic uncertainties and natural hazard risk assessment. Part 1. // A review of the issues. Nat. Hazards Earth. Syst. Sci. Discuss. – 2015. – No. 3. – pp. 7333-7377. DOI: 10.5194/nhessd-3-7333-2015.

25. Bora S. S., Cotton F., Scherbaum F. NGA-West^2 empirical fourier and duration models to generate adjustable response spectra. // Earthquake Spectra. – 2019. – Vol. 55 (1). – pp. 61-93.

26. Campbell K. W., Bozorgnia Y. NGA West^2 ground motion model for the average horizontal components of PGA, PGV, and 5% damped linear acceleration response spectra. // Earthquake Spectra. – 2014. – Vol. 30 (3). – pp. 1087-1115. DOI: 10.1193/062913EQS175M.

27. Sokolov V., Sahran H. M. Generation of stochastic earthquake ground motion in western Saudi Arabia as f first step development of regional ground motion prediction model. // Arabian Journal of Geosciences. – 2018. – p. 11638. DOI: 10.1007/s12517-018-3394-9

References

1. Aki K., Richards P. Quantitative seismology. Theory and methods. Vol. 1-2. Moscow. Mir. 1983. 520 p. (In Russ.)

2. Aleshin A. S. Continuum theory of seismic microzonation. Moscow. Nauchnyy Mir. 2017. 300 p. (In Russ.)

3. Zaalishvili V. B. Seismic microzonation of urban territories, settlements and large building sites. Moscow. Nauka. 2009. 350 p. (In Russ.)

4. Zaalishvili V. B., Melkov D. A., Makiev V. D. Macroseismic evidence of seismic events caused by influence of ground conditions and formation of maps of seismic microzonation. Geology and geophysics of Russian South. 2018. No. 1. pp. 48-55. (In Russ.) DOI 10.23671/VNC.2018.1.11247.

5. Zaalishvili V. B., Melkov D. A., Nikonova N. V., Smirnova L. N., Uzdin A. M. Characteristics of spatial inhomogeneity of the acceleration field on the day surface. Geology and Geophysics of Russian South. 2022. Vol. 12. No. 1. pp. 75-88. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2022.74.27.006.

6. Kalinina A. V., Ammosov S. M., Bykova V. V., Tatevosyan R. E. On the applicability of the standard response spectrum for assessing expected seismic impacts. Voprosy Inzhenernoi Seismologii. 2017. Vol. 44. No. 2. pp. 67-73. (in Russ.) DOI: 10/21455/VIS2017/2-4.

7. Kriger N. I., Kozhevnikov A. D., Mindel I. G. Seismic properties of dispersed rocks (seismoecological approach). Moscow. INGEKO. 1994. 195 p. (in Russ.)

8. Medvedev S. V. Engineering seismology. Moscow. Gosstroyizdat. 1962. 284 p. (in Russ.)

9. Napetvaridze Sh. G. Some tasks of engineering seismology. Tbilisi, Mitsnierba. 1973. 162 p. (in Russ.)

10. Pavlov O. V. (ed.) Assessment of the influence of soil conditions on seismic hazard. Methodological guide. Institute of the Earth's Crust. Moscow. Nauka. 1988. 244 p. (in Russ.)

11. Ratnikova L. I. Saks M. V. Kronrod T. L. To the question of recalculation of accelerograms of strong motions for different ground conditions. Studies on seismic hazard. Moscow. Nauka. 1988. pp. 81-93. (in Russ.)

12. Riznichenko Yu. V. Problems of seismology. Elected works. Moscow. Nauka. 1985. 408 p. (in Russ.)

13. Savarensky E. F. Seismic waves. Moscow. Nauka. 1972. 293 p. (in Russ.)

14. Lomnitz C., Rosenbluth E. (eds.) Seismic risk and engineering solutions. Moscow. Nedra. 1981. 375 p. (in Russ.)

15. Medvedev S. V. (ed.) Seismic microzonation. Moscow. Nauka. 1977. 248 p. (in Russ.)

16. Chernov Yu. K. Strong ground motions and quantitative assessment of the seismic hazard of the territory. Tashkent, Fan. 1989. 295 p. (in Russ.)

17. Chernov Yu. K. The experience of detailed probabilistic assessments of possible seismic effects on the territory of North Ossetia-Alania. Geology and Geophysics of Russian South. 2021. Vol. 11. No. 2. pp. 87-102. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2021.83.10.007.

18. Chernov Yu. K. Some preliminary data on the vibration spectra of "soft" and "hard" soils during earthquakes of different magnitudes and distances. Geology and Geophysics of Russian South. 2022. Vol. 12. No. 3. pp. 61-78. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2022.45.59.004.

19. Chernov Yu. K., Zaalishvili V. B., Dzeranov B. V. Seismicity patterns for a detailed probabilistic seismic zoning of the North Ossetia-Alania territory. Geology and Geophysics of Russian South. 2018. No. 4. pp. 162-178. (in Russ.) DOI:10.23671/VNC.2018.4.20158.

20. Shteinberg V. V., Saks M. V., Aptikaev F. F. et al. Methods for assessing seismic impacts. Voprosy Inzhenernoi Seismologii. Issue. 34. Moscow. Nauka. 1993. pp. 5-94. (in Russ.)

21. Steinberg V. V. On the behavior of loose soils during strong earthquakes. Doklady AS USSR. 1984. Vol. 275. No. 2. pp. 350-354. (in Russ.)

22. Akkar S., Sandikkaya M. A., Bommer J. J. Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. Bull. Earthq. Eng. 2014. Vol. 12. pp 359-387. DOI: 10.1007/s10518-013-9461-4.

23. Atkinson G. M. and D. M. Boore. Modifications to existing ground-motion prediction equations in light of new data. Bulletin of the Seismological Society of America. 2011. Vol. 101. pp. 1121-1135.

24. Beven K. J., Aspinall W. P., Bates P. D., Borgomeo E., Goda K., et al. Epistemic uncertainties and natural hazard risk assessment. Part 1. A review of the issues. Nat. Hazards Earth. Syst. Sci. Discuss. 2015. No. 3. pp. 7333-7377. DOI: 10.5194/nhessd-3-7333-2015.

25. Bora S. S., Cotton F., Scherbaum F. NGA-West^2 empirical fourier and duration models to generate adjustable response spectra. Earthquake Spectra. 2019. Vol. 55. pp. 61-93.

26. Campbell K. W., Bozorgnia Y. NGA West^2 ground motion model for the average horizontal components of PGA, PGV, and 5% damped linear acceleration response spectra. Earthquake Spectra. 2014. Vol. 30. pp. 1087-1115. DOI: 10.1193/062913EQS175M.

27. Sokolov V., Sahran H. M. Generation of stochastic earthquake ground motion in western Saudi Arabia as f first step development of regional ground motion prediction model. Arabian Journal of Geosciences. 2018. p. 11638. DOI: 10.1007/s12517-018-3394-9