=ГЕОФИЗИКА =

VДК 550.34+550.341

DOI: 10.46698/VNC. 2021.83.10.007

Оригинальная статья

Опыт детальных вероятностных оценок возможных сейсмических воздействий на территории РСО-Алания

Ю.К. Чернов

Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук, Россия, 362002, PCO-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93a, e-mail: chenta-26@mail. ru

Статья поступила: 01.04.2021, доработана: 28.04.2021, одобрена в печать: 17.05.2021

Резюме: Актуальность работы. В настоящее время во многих сейсмоактивных районах Российской Федерации (включая и территорию РСО-Алания) наблюдается определенный дефицит точных и детальных данных о возможных на этих территориях сейсмических воздействиях. Помимо того, что без этих данных не могут решаться многие академические задачи инженерной и общей сейсмологии, они также необходимы для обеспечения должного качества антисейсмического проектирования и прогнозов сейсмического риска, принятия эффективных управленческих решений и других мер защиты населения, объектов инфраструктуры и окружающей среды от возможных здесь сильных землетрясений. Поэтому настоящее исследование, направленное на уменьшение дефицита таких данных в сейсмогеологических условиях РСО-Алания представляется актуальным. Цель исследования. Совершенствование методики и получение на этой основе более точных и детальных вероятностных оценок используемых в инженерно- сейсмологической практике параметров колебаний грунта при землетрясениях, представляющих опасность для территории РСО-Алания. Методы исследования. Работа выполнена с использованием оригинальной вероятностной технологии оценки сейсмической опасности, включающей в себя разработку на основе анализа большого объема экспериментальных данных по инструментальной регистрации и макросейсмическому описанию землетрясений Кавказа и других сейсмоактивных районов мира региональных моделей сильных движений грунта и сейсмичности с последующими расчетами (на основе формулы полной вероятности) результирующих характеристик возможных сейсмических воздействий на исследуемой территории. Результаты. Впервые для изучаемого района с единых методологических позиций получены уточненные вероятностные оценки широкого перечня параметров (макросейсмических интенсивностей, амплитуд, периодов, длительностей, спектров и акселерограмм) колебаний грунта при возможных на данной территории землетрясениях со средними периодами повторяемости 500, 1000, 2500 и 5000 лет, которые в ряде случаев существенно отличаются от действующих нормативов. Например, показано, что на изучаемой территории прогнозируемые амплитуды и спектры ускорений грунта в пределах одной и той же зоны балльности могут существенно (до 100%) различаться в зависимости от периодов повторяемости ожидаемых землетрясений. Вероятные спектры реакции ускорений колебаний грунта, в зависимости от частот спектральных составляющих также могут существенно (до 100%) отличаться от нормативных спектров.

Ключевые слова: сейсмическая опасность, сейсмические воздействия детальное сейсмическое районирование, макросейсмическая интенсивность, вероятностные оценки параметров колебаний грунта.

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

= GEOPHYSICS =

DOI: 10.46698/VNC. 2021.83.10.007

Original paper

The experience of detailed probabilistic assessments of possible seismic effects on the territory of North Ossetia-Alania

Yu. K. Chernov

Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation, e-mail: chenta-26@mail. ru

Reseived: 01.04.2021, revised: 28.04.2021, accepted: 17.05.2021

Abstract: Relevance. At present, in many seismically active regions of the Russian Federation (including the territory of North Ossetia-Alania), there is a certain deficit of accurate and detailed data on possible seismic effects on these territories. In addition to the fact that without these data many academic problems of engineering and general seismology cannot be solved, they are also necessary to ensure the proper quality of earthquake-proof design and seismic risk predictions. These data is also necessary to make effective management decisions and other measures to protect the population, infrastructure and the environment from possible strong earthquakes. Therefore, the present study aimed at reducing the deficit of such data in the seismogeological conditions of North Ossetia-Alania is relevant. Aim. Improvement of the methodology and obtaining, on this basis, more accurate and detailed probabilistic estimates of the ground vibration parameters used in engineering and seismological practice during earthquakes, which are dangerous for the territory of the Republic of North Ossetia-Alania. Methods. The work was carried out using an original probabilistic technology for seismic hazard assessment, which includes the development, based on the analysis of a large amount of experimental data on instrumental registration and macroseismic description of earthquakes in the Caucasus and other seismically active regions of the world, regional models of strong ground motion and seismicity with subsequent calculations (based on the formula for complete probabilities) of the resulting characteristics of possible seismic effects on the studied territory. Results. For the first time for the studied territory, from a unified methodological standpoint, refined probabilistic estimates of a wide range of parameters (macroseismic intensities, amplitudes, periods, durations, spectra and accelerograms) of ground vibrations were obtained for possible earthquakes in a given territory with average recurrence periods of 500, 1000, 2500 and 5000 years, which in some cases differ significantly from the current standards. For example, it has been shown that in the considered territory the predicted amplitudes and spectra of ground accelerations within the same magnitude zone can differ significantly (up to 100%) depending on the recurrence periods of expected earthquakes. The probable response spectra of ground vibration accelerations, depending on the frequencies of the spectral components, can also significantly (up to 100%) differ from the standard spectra.

Keywords: seismic hazard; seismic impacts; detailed seismic zoning; macroseismic intensity; probabilistic estimates of soil vibration parameters.

For citation: Chernov Yu. K. The experience of detailed probabilistic assessments of possible seismic effects on the territory of North Ossetia-Alania. *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2021. 11 (2): 87 – 102. DOI: 10.46698/VNC. 2021.83.10.007.

Введение

Отечественными нормативами предусмотрены три типа оценок сейсмических воздействий, различающихся масштабами объектов исследования, а также точностью и полнотой описания прогнозируемых характеристик — оценки, получаемые в

результате общего сейсмического районирования (ОСР), детального сейсмического районирования (ДСР) и сейсмического микрорайонирования (СМР). Менее точными и информативными являются карты ОСР, более точными и информативными — карты СМР. ДСР занимает промежуточное положение.

Для территории Российской Федерации (а ранее Советского Союза) создано уже несколько поколений нормативных карт ОСР – сначала детерминистских, а затем вероятностных (см., [Сейсмическое..., 1980; Ulomov et al., 1999; Уломов, 2012; Завьялов и др., 2018]). Наработан также определенный опыт вероятностных оценок типа СМР. Вероятностные же оценки типа ДСР пока очень малочисленны. На Северном Кавказе такие исследования стали проводиться Геофизическим институтом ВНЦ РАН начиная с 2007-2008 гг. и дали ряд новых и важных результатов [Заалишвили, 2009; Заалишвили и др., 2011]. Однако некоторые ограничения используемых в этих исследованиях методик и исходных данных, делают актуальной задачу наращивания дальнейших усилий в данном направлении. Поэтому в ГФИ ВНЦ РАН начиная с 2017 г. стал разрабатываться новый вариант вероятностной карты ДСР РСО-Алания. Цель этих исследований – совершенствование технологии детальных вероятностных оценок и получение для данной территории новых и более точных оценок возможных сейсмических воздействий. Для достижения данной цели решались следующие задачи: разработка адекватной условиям исследуемой территории вероятностной расчетной схемы, включая создание эффективных региональных моделей сильных движений грунта и сейсмичности; производство на этой базе уточненных и детализированных вероятностных оценок макросейсмических балльностей, пиковых амплитуд, периодов, длительностей, спектров и акселерограмм ускорений колебаний грунта при возможных на территории РСО-Алания землетрясениях со средним периодом повторяемости 500, 1000, 2500 и 5000 лет. Описание способов и результатов решения вышеозначенных задач и является содержанием настоящей статьи.

Информационная база и методика исследования

Исследования проводятся с использованием апробированной на региональном и локальном уровне во многих сейсмоактивных районах вероятностной технологии оценки сейсмической опасности [Zaalishvili, Chernov, 2018]. Согласно данной технологии вероятностный анализ сейсмической опасности (probabilistic seismic hazard analysis или PSHA) производится по принципу оценки полной вероятности, т.е. с учетом как условной вероятности, описывающей неопределенности, связанные с прогнозированием параметров сотрясений грунта при возникновении потенциально опасных очагов землетрясений, так и безусловной вероятности, описывающей неопределенности возникновения этих очагов в данном месте в заданный промежуток времени. Получаемая в результате PSHA оценка, представляет собой суперпозицию воздействий всех потенциально опасных очагов землетрясений с учетом их повторяемости в пространстве и во времени. Для реализации общей расчетной схемы разработаны две группы региональных моделей. Первая – вероятностные модели сейсмичности, описывающие зоны ВОЗ, возможные магнитуды землетрясений (M), размеры, механизмы, ориентацию в пространстве и частоту возникновения очагов землетрясений во времени, их распределение по глубине. Вторая – вероятностные модели сильных движений грунта (СДГ), описывающие пиковые амплитуды (точнее среднегеометрические значения между пиковыми амплитудами

на двух горизонтальных компонентах записи -PGA), относительные длительности $(\tau_{0,3})$, периоды (T_a) , спектры Фурье $(|S|\ (f))$, спектры реакции $(SA\ (f))$, макросейсмические балльности (I) и акселерограммы при землетрясениях разных магнитуд (M) и расстояний до очага (D). Эти две группы моделей, подробно в [Чернов и др., 2018; Чернов Ю. и др., 2020].

Для учета всех потенциально опасных для территории РСО-Алания очагов землетрясений, анализировался достаточно большой (\sim 325×325 км²) район, включающий территорию Республики (см. [Чернов и др., 2018]). Этот район разбит на элементарные участки размером 5×5 кв. км, каждый из которых до глубины \sim 30 км в соответствии с разработанными моделями СДГ и сейсмичности характеризуется набором параметров, определяющих уровень и вероятность прогнозируемых сейсмических воздействий (см. [Zaalishvili, Chernov, 2018]). Итоговые оценки (функции распределения вероятностей) каждого параметра рассчитываются для каждого элементарного участка как суперпозиция воздействий всех очагов, находящихся под ним и под всеми окружающими его элементарными участками. Все оценки проведены для «средних» грунтовых условий и для землетрясений со средним периодом повторяемости t=500, 1000, 2500 и 5000 лет (вероятности превышения P_{50} =0,1; 0,05; 0,02, 0,01 за время экспозиции 50 лет).

Первичные оценки вероятных значений I, PGA и SA (f) для каждого элементарного участка, с применением элементов технологии «логического дерева» (см. например, [Delavaud et al., 2012; Akkar et al., 2014; Kale, Akkar, 2017]) сначала выполнялись в нескольких альтернативных вариантах, а затем объединялись в итоговые оценки. Первичные оценки I для каждого значения t выполнены в пяти вариантах, два из которых — прямые расчеты с использованием «традиционной» ($I_{\rm тp}$) и «спектральной» ($I_{\rm cn}$) моделей балльности (см. [Чернов Ю. и др., 2020]), остальные три — оценки, полученные пересчетом по выражениям (13), (15), (16) из [Zaalishvili, Chernov, 2018]. Пиковые ускорения также сначала оценивались прямыми расчетами по описанным в [Чернов Ю. и др., 2020] региональным моделям PGA (M, D), которые затем дополнены еще тремя вариантами, полученными пересчетом I в PGA по соотношениям из [Zaalishvili, Chernov, 2018, (выражения (13), (15), (16))].

Первичные оценки спектров реакции выполнены в трех вариантах. Первый (основной) и второй (дополнительный) – это пересчеты полученных интегральных спектров Фурье по методике, описанной в [Ванмарке, 1981; Соколов, 1991] и по выражению, составленному нами по данным [Atkinson, Sonley, 2000]:

$$lgSA(f) = 0.877lg|S|(f) + 0.581lg(f) + 0.919,$$
(1)

где |S| (f) и f — уровень спектральной плотности Фурье и частота спектральной составляющей, соответственно.

Третий вариант (тоже дополнительный) — стандартные спектры, вытекающие из полученных, а затем преобразованных в эффективные ускорения (см. ниже) интегральных оценок PGA и рекомендуемой российскими строительными нормативами стандартной кривой динамичности.

Итоговые оценки I, PGA и SA (T) рассчитывались как средневзвешенные по всем вариантам расчетов с весами, заданными исходя из точности варианта первичной оценки.

Чтобы обеспечить прямую сопоставимость результатов, получаемых в настоящих исследованиях с действующими нормативами итоговые карты построены в баллах макросейсмической шкалы и в «эффективных» ускорениях колебаний грун-

та $(a_{3\varphi\varphi})$, которые по смыслу совпадают с нормативными коэффициентами сейсмичности и численно равны 0,75 PGA. Физический смысл «эффективных» ускорений состоит в том, что они отражают не какую-либо одну максимальную амплитуду на данной записи ускорений, а характеризуют некоторый средний уровень амплитуд на участке акселерограммы, на котором выделяется основная часть сейсмической энергии.

Зонирование изучаемой территории по уровням I и $a_{9\varphi\varphi}$ осуществлялось путем объединения элементарных участков с близкими оценками этих параметров, полученными для заданных P_{50} или t.

Привязка получаемых нами оценок к нормативным характеристикам сейсмической опасности (к оценкам I) сохранена и в отношении других прогнозируемых параметров сейсмических воздействий — T_a , $\tau_{0,3}$, |S| (f), SA (f) и акселерограмм. Для этого в каждой выделенной по значениям I и t зоне выбран «представительный» элементарный участок, для которого производились соответствующие оценки. Территориально эти участки расположены вблизи «центров тяжести» этих зон и характеризуются средними (среди участков данной зоны) значениями I.

Результаты и обсуждение

Результаты площадного распределения независимых вероятностных оценок I, полученных для элементарных участков на основе традиционной и спектральной моделей балльности показаны на рисунке 1.

На этом рисунке (для его упрощения) приведены не все оценки, а только полученные для участков, расположенных через один. В совокупности они составля-

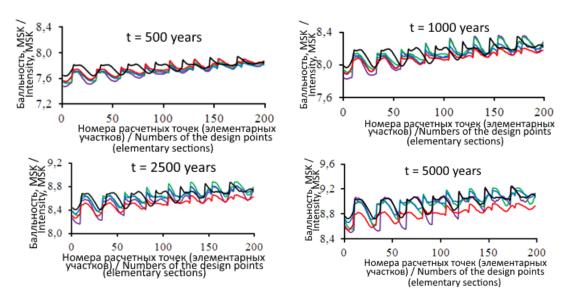


Рис. 1. Оценки макросейсмических балльностей, полученных для элементарных участков на территории РСО-Алания при землетрясениях с разными t. Зеленый и фиолетовый цвета — прямые оценки по «спектральной» и «традиционной» моделям балльности, соответственно. Синий, красный и черный цвета — пересчет из ускорений при помощи выражений (13), (15) и (16) из [Zaalishvili, Chernov, 2018], соответственно /

Fig. 1. Assessments of macroseismic intensities obtained for elementary areas on the territory of RNO-Alania during earthquakes with different t. Green and purple colors are direct assessments for "spectral" and "traditional" intensity models, respectively. Blue, red and black colors denote recalculation of accelerations using expressions (13), (15) and (16) from [Zaalishvili, Chernov, 2018], respectively

ют квадрат (размером $\sim 140 \times 140 \,\mathrm{km^2}$), в который вписана территория РСО-Алания. Нумерация начинается с крайней северо-западной точки и возрастает в восточном направлении последовательно смещающимися с севера на юг рядами по 14 точек в ряду.

Сравнение между собой полученных для каждого из элементарных участков независимых оценок с использованием двух разных моделей балльности показывает их близость. Средние по всей территории РСО-Алания значения разностей $I_{\rm cn}$ - $I_{\rm тр}$ для разных значений t колеблются от 0,033 до 0,112 балла MSK при стандартах от

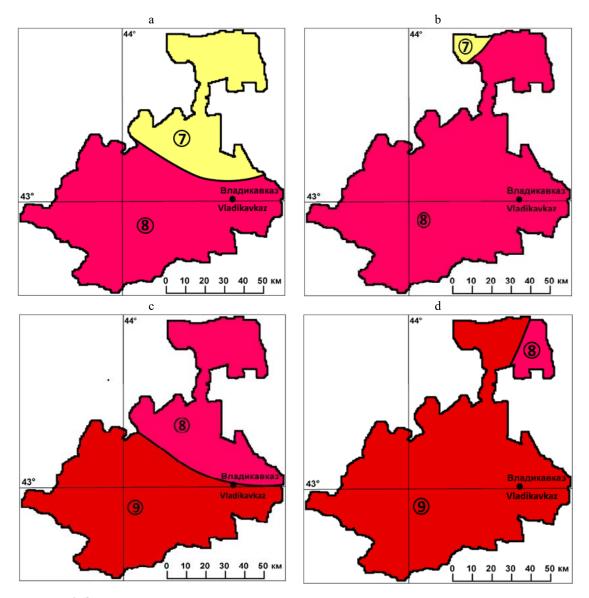


Рис. 2. Зоны с различными значениями макросейсмических интенсивностей сотрясений, выделенные по интегральным вероятностным оценкам на территории РСО-Алания при возможных землетрясениях с t=500, 1000, 2500 и 5000 лет, обозначенные индексами а, b, c и d, соответственно. Желтый, малиновый и темно-красный цвета с цифрами в кружках обозначают интенсивности 7, 8 и 9 баллов, соответственно /

Fig. 2. Zones with different values of macroseismic intensities of vibration, identified by integral probabilistic assessments on the territory of RNO-Alania during possible earthquakes with t = 500, 1000, 2500 and 5000 years, indicated by the indices a, b, c and d, respectively. Yellow, crimson and dark red colors denote the intensities of 7, 8 and 9 points, respectively

0,044 до 0,11 балла MSK. Такая близость двух независимых оценок I в сочетании с проведенным в [Чернов и др., 2018; Чернов Ю. и др., 2020] анализом надежности используемых в расчетах моделей сейсмичности и СДГ может свидетельствовать об их обоснованности и реалистичности.

Прямые оценки вероятных ускорений (см. выше) также рассмотрены на предмет их надежности и реалистичности. Для этого наиболее вероятные значения PGA пересчитаны по выражениям (13), (15) и (16) из [Zaalishvili, Chernov, 2018] в значения I, которые затем (на рис. 1) сопоставлены с независимыми определениями балльности. Сопоставления показывают высокую степень сходимости прямых и пересчитанных из PGA оценок I по всей рассматриваемой территории для всех периодов повторяемости сотрясений. Так, например, среднее значение разностей между пересчитанными и прямыми оценками I составляет – 0,118 MSK при стандарте 0,151 MSK.

Считая качество полученных первичных оценок достаточным, итоговые вероятные значения I для каждого t рассчитаны как средневзвешенные значения, когда прямым оценкам, как более точным приданы веса по 3, а пересчитанным — по 1. В случае аналогичных построений для PGA прямой (основной) оценке придан вес 4, остальным — по 1. Результаты итоговых построений в виде карт распределения по территории РСО-Алания макросейсмических интенсивностей сотрясений и эффективных ускорений колебаний грунта приведены на рисунках 2 и 3.

При разграничении различных зон на этих картах первоначально полученные дробные оценки I в соответствии с градациями, предусмотренными российскими строительными нормативами, округлялись до целочисленных значений. При выделении зон, различающихся по величине $a_{9\varphi\varphi}$ также использовано округление полученных дробных величин до значений $1.0\,\mathrm{m/c^2}$, $2.0\,\mathrm{m/c^2}$ и $4.0\,\mathrm{m/c^2}$, совпадающих с применяемыми в российских нормативах расчетными ускорениями при интенсивностях сотрясений $7.8\,\mathrm{u}$ 9 баллов MSK.

Сопоставление между собой рисунков 2 и 3 показывает высокий уровень их согласованности. Особенно это видно на примере зон, выделяемых по параметрам I и $a_{3\varphi\varphi}$ для землетрясений с t=500, 1000 и 2500 лет. Несколько большее расхождение в границах между зонами, выделенными для землетрясений с t=5000 лет, связано с меньшей точностью оценок «на хвостах» оцениваемых функций распределения вероятностей. Этот результат в сочетании с результатами предыдущих сопоставлений независимых «точечных» оценок, показанных на рисунке 1, свидетельствует о том, что выполненные для территории РСО-Алания вероятностные оценки I и PGA (или $a_{3\varphi\varphi}$) в достаточной степени обоснованы и обладают «внутренней» согласованностью.

Для выяснения «внешней» согласованности наши оценки сопоставлены с результатами, полученными ранее для данной территории при проведении работ по ОСР [Комплект..., 1995] и по ДСР [Заалишвили, 2009; Заалишвили и др., 2011], выполненных при помощи вероятностных технологий концептуально совместимых с нашей технологией — технологии ОСР-97 (ОСР-2015) и технологии SEISRISK, соответственно. Сравнение показывает в целом более низкий (в среднем на 0,3-0,5 балла *MSK*) уровень сейсмической опасности на картах настоящего исследования относительно Карт ОСР и, наоборот, примерно на столько же более высокий, по отношению к более ранним версиям ДСР. Такие же соотношения наблюдались нами и в результате более широких сопоставлений вероятностных оценок сейсмической

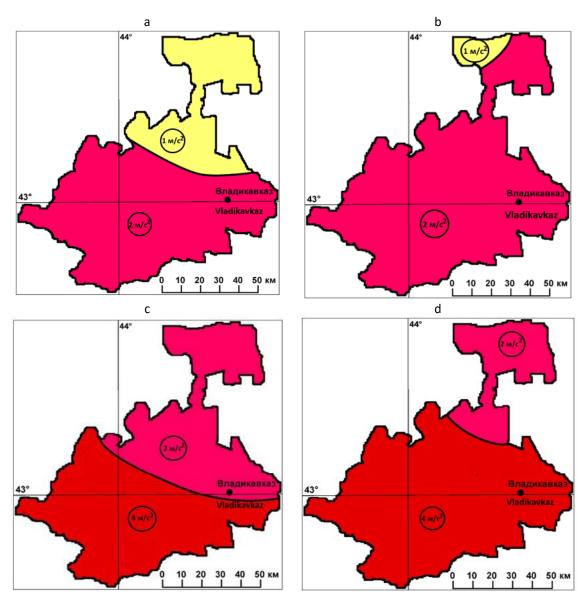


Рис. 3. Зоны с различными значениями эффективных ускорений колебаний грунта, выделенные по интегральным вероятностным оценкам на территории РСО-Алания при возможных землетрясениях с $t=500,\ 1000,\ 2500$ и 5000 лет, обозначенные индексами $a,\ 6,\ 8$ и $c,\ coombe emcmbe ehho. Желтый, малиновый и темно-красный цвета с цифрами в кружках, обозначают величины <math>a_{3\phi\phi}=1,0$ м/ $c^2,2,0$ м/ c^2 и 4,0 м/ $c^2,$ coombe emcmbe ehho/

Fig. 3. Zones with different values of effective ground vibration accelerations, identified by integral probabilistic assessments on the territory of RNO-Alania during possible earthquakes with $t=500,\,1000,\,2500$ and 5000 years, indicated by indices a, b, c and d, respectively. Yellow, crimson and dark red colors denote the values $a_{\rm eff}=1.0~{\rm m/s^2},\,2.0~{\rm m/s^2}$ and $4.0~{\rm m/s^2},\,{\rm respectively}$

опасности, выполненных разными авторами в различных сейсмоактивных районах мира с использованием вышеуказанных трех технологий. Попутно можно отметить, что к сходным выводам относительно оценок ОСР-97 пришли, например, авторы работ [Zhang et al., 1999; Balassanian et al., 1999]. Среди возможных причин указанных расхождений в случае ОСР, можно предположить использование в расчетах более мелких (по сравнению со многими другими оценками) глубин очагов землетрясений и более интенсивных функций затухания балльности. Оценки же типа SEISRISK могут быть более низкими, из-за более генерализованного (не учи-

тывающие, например, распределение очагов землетрясений по глубине) описания очаговых зон.

Таким образом, проведенный сравнительный анализ позволяет считать, что описанные выше вероятностные оценки I и PGA (или $a_{•\varphi}$) могут считаться в достаточной мере обоснованными и реалистичными.

Данные на рисунках 2 и 3 являются обобщенными, что, как сказано выше, связано с необходимостью соответствовать отечественным нормативам. Но результаты настоящих исследований позволяют также рассмотреть данные оценки более подробно. Так, например, из приведенных в таблице 1 и на рисунке 4а данных видно, что значения параметров колебаний, рассчитанные для зон с одной и той же балльностью, но для землетрясений с разными t могут отличаться от обобщенных (т. е. не учитывающих к каким по величине t землетрясениям они относятся). Именно такие (обобщенные) оценки определены в результате исследований по ОСР территории Российской Федерации.

В то же время, как видно из таблицы 1 и рисунка 4а, значения PGA, T_a , $\tau_{0,3}$ и |S| (f) в одних и тех же зонах балльности могут флуктуировать в зависимости от величины t. Наибольшие флуктуации наблюдаются в зонах с I=8 баллов MSK, для величин PGA и |S| (f) и для землетрясений с t=500, 1000-2500 и 5000 лет. Различий же между оценками для землетрясений с t=1000 лет и t=2500 лет, а также для зон других балльностей и для других параметров либо почти нет, либо они незначительны.

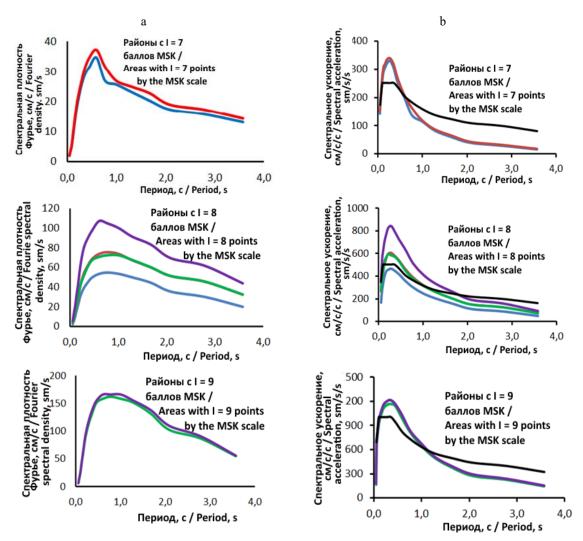
С учетом вышеуказанных различий |S| (f) итоговые (средневзвешенные, см. выше) оценки спектров реакции тоже сделаны раздельно для каждой зоны и для землетрясений с разными t. Результаты представлены на рисунке 46, где наблюдаются те же соотношения, что и на рисунке 4a. На основе данных таблицы 1 и рисунка 4 определены итоговые значения прогнозируемых параметров сейсмических воздействий на территории РСО-Алания (табл. 2). Для зон с I=7 баллов MSK и зон с I=9 баллов MSK итоговые оценки определены как среднегеометрические значения между оценками для t=500 и 1000 лет в первом случае и с t=2500 и 5000 лет, во

Таблица 1 / Table 1

Интегральные вероятностные оценки PGA, T_a и $\tau_{0,3}$ в пределах, выделенных на территории PCO-Алания зон с разными I при землетрясениях с разными $t.\ PGA$ в см/с²; T_a и $\tau_{0,3}$ в с / Integral probabilistic assessments of PGA, T_a and $\tau_{0,3}$ within the limits identified on the territory of RNO-Alania with different I during earthquakes with different $t.\ PGA$ in cm/s²; T_a and $T_{0,3}$ in s

t, лет / t, years	Зоны с <i>I=7 MSK /</i> Zones with <i>I=7 MSK</i>			Зоны с <i>I</i> =8 <i>MSK</i> / Zones with <i>I</i> =8 <i>MSK</i>			Зоны с <i>I</i> =9 <i>MSK</i> / Zones with <i>I</i> =9 <i>MSK</i>		
	PGA	T_a	τ _{0,3}	PGA	T_a	τ _{0,3}	PGA	T_a	τ _{0,3}
500	129	0,32	4,5	192	0,36	5,0	-	-	-
1000	137	0,35	5,0	265	0,40	6,5	-	-	-
2500	-	-	-	270	0,40	6,5	457	0,44	8,1
5000	-	-	-	368	0,43	7,4	501	0,44	8,2
Общее* / Total	133	0,33	4,7	267	0,40	6,3	479	0,44	8,1

^{*} – среднегеометрические значения по оценкам с разными t. / * – geometric mean values according to the assessments with different t.



 $Puc.\ 4.\ Интегральные\ спектры\ Фурье\ (a)\ u\ umoговые\ (средневзвешенные)\ u\ стандартные\ спектры\ реакции\ (b)\ ускорений\ колебаний\ грунта,\ рассчитанные\ для\ «представительных»\ точек в выделенных на территории\ PCO-Алания\ зонах\ c\ I=7,\ 8,\ u\ 9\ баллов\ MSK\ при\ землетрясениях\ c\ t=500,1000,\ 2500\ u\ 5000\ лет\ (синий,\ красный,\ зеленый,\ сиреневый\ цвета,\ соответственно)\ /$ $Fig.\ 4.\ Integral\ Fourier\ spectra\ (a)\ and\ final\ (weighted\ average)\ and\ standard\ response\ spectra\ (b)\ of\ ground\ vibration\ accelerations,\ calculated\ for\ "representative"\ points\ in\ the\ zones\ allocated\ on\ the\ territory\ of\ RNO-Alania\ with\ I=7,\ 8,\ and\ 9\ MSK\ points\ at\ earthquakes\ with\ t=500,\ 1000,\ 2500\ and\ 5000\ years\ (blue,\ red,\ green,\ lilac\ colors,\ respectively)$

втором. В таблице 2, помимо описанных выше параметров, приведены оценки пиковых горизонтальных ускорений (PHA), пиковых вертикальных ускорений (PVA) и относительных длительностей ($\tau_{0,5}$), полученные пересчетом по рекомендованным в [Zaalishvili, Chernov, 2018] средним соотношениям – PGA=0,86 PHA=1,33 PVA и $\tau_{0,3}$ =1,7 (1,5-2,0) $\tau_{0,5}$.

На базе приведенных на рисунке 46 и в таблице 2 данных разработаны наборы акселерограмм для землетрясений с t=500-1000 лет в зонах с I=7 баллов MSK, для землетрясений с t=500 лет, с t=1000-2500 лет и с t=5000 лет в зонах с I=8 баллов MSK и для землетрясений с t=2500-5000 лет в зонах с I=9 баллов MSK. Каждый набор состоит из 10 трехкомпонентных акселерограмм (5 из них получены искусственной генерацией и 5 — подбором записей реальных землетрясений). Формат

Таблица 2 / Table 2

Рекомендуемые значения пиковых ускорений грунта (PGA), пиковых горизонтальных, вертикальных и эффективных ускорений (PHA, PVA и $a_{3\varphi\varphi}$), длительностей ($\tau_{0,3},\tau_{0,5}$), периодов (T_a) для выделенных на территории PCO-Алания зон с разными возможными интенсивностями сотрясений (I). PGA, PHA, PVA, $a_{3\varphi\varphi}$ – в см/с²; $\tau_{0,5}$, $\tau_{0,3}$ и T_a – в с. / Recommended values of peak ground acceleration (PGA), peak horizontal, vertical and effective accelerations (PHA, PVA and PAA, durations (PAA, PAA), periods (PAA) for the zones allocated on the territory of RNO-Alania with different possible intensities of vibration (PAA), PAA, PAA, aeff are measured in cm/s²; $\tau_{0.5}$, $\tau_{0.3}$ and T_a – in s.

	Зоны с <i>I</i> =7 баллов <i>MSK</i> / Zones with <i>I</i> =7 points <i>MSK</i>		Зоны с <i>I</i> =8 баллов <i>MSK</i> / Zones with <i>I</i> =8 points <i>MSK</i>							Зоны с <i>I</i> =9 баллов <i>MSK</i> / Zones with <i>I</i> =9 points <i>MSK</i>	
T, c / T, s	<i>t</i> =500-1000 лет / <i>t</i> =500-1000 years		t=500 лет / t=500 years		t=1000-2500 лет / t=1000-2500 years		<i>t</i> =5000 лет / <i>t</i> =5000 years		<i>t</i> =2500-5000 лет / <i>t</i> =2500-5000 years		
	Гориз- комп. / Hori- zontal compo- nents	Bept. KOMII. / Vertical compo- nents	Гориз- комп. / Hori- zontal compo- nents	Bept. KOMII. / Vertical compo- nents	Гориз- комп. / Hori- zontal compo- nents	Верт. комп. / Vertical compo- nents	Гориз- комп. / Hori- zontal compo- nents	Верт. комп. / Vertical compo- nents	Гориз- комп. / Hori- zontal compo- nents	Верт. комп. / Vertical compo- nents	
PGA	133	-	192	-	267	-	368	-	533	-	
PHA	155	-	223	-	310	-	428	-	620	-	
PVA	-	100	-	144	-	200	-	276	-	400	
$a_{ightarrow}$	100	-	144	-	200	-	276	-	400	-	
$\tau_{0,3}$	4,7	4,7	5,8	5,8	6,5	6,5	7,4	7,4	8,1	8,1	
$ au_{0,5}$	2,8	2,8	3,4	3,4	3,8	3,8	4,4	4,4	4,8	4,8	
T_a	0,34	0,34	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,42	0,42	

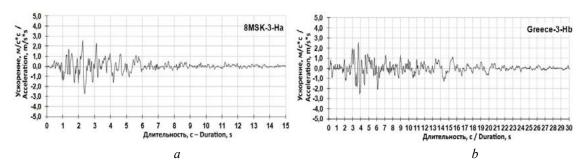


Рис. 5. Примеры горизонтальных составляющих трехкомпонентных акселерограмм, рассчитанных для землетрясений с t=1000-2500 лет в выделенных на территории РСО-Алания зонах с I=8 баллов MSK. а и b – полученные методом искусственной генерации и методом подбора и масштабирования записей реальных землетрясений, соответственно /

Fig. 5. Examples of horizontal components of three-component accelerograms calculated for earthquakes with t=1000-2500 years in the zones identified in the territory of RNO-Alania with I=8 MSK points. a and b are accelerograms obtained by the method of artificial generation and by trail-and-error method and scaling of real earthquakes records, respectively

построения этих акселерограмм подробно описаны в [Салганик, 1987; Чернов Ю. и др., 2020]. Примеры прогнозных акселерограмм приведены на рисунке 5.

О качестве разработанных акселерограмм можно судить по высокому уровню соответствия измеренных по этим акселерограммам параметров колебаний (таблица 3) прогнозным характеристикам из таблицы 2. Такое же хорошее соответствие показывает и сравнение спектров реакции, рассчитанных по разработанным акселерограммам и прогнозных спектров реакции (рис. 46), примеры которого приведены на рисунке 6.

Таким образом, оценки всех прогнозируемых параметров, полученные в процессе настоящего исследования — пиковых амплитуд, периодов, длительностей, спектров и акселерограмм ускорений колебаний грунта хорошо согласуются между

Таблица 3 / Table 3

Параметры колебаний грунта, измеренные по всем входящим в разработанный ансамбль акселерограммам, рекомендованном для выделенных на территории РСО-Алания зон с *I*=8 баллов *MSK* при землетрясениях с разными периодами повторяемости (*t*): без скобок – средние по массивам, в скобках – диапазон индивидуальных значений / Parameters of ground vibrations, measured according to all accelerograms included to the developed ensemble, recommended for the zones with *I* = 8 MSK points allocated in the territory of RNO-Alania for earthquakes with different return periods (*t*): values without brackets are average for the arrays, values in brackets denote the range of individual values

Зоны балль-		Параметры акселерограмм / Accelerogram parameters								
ности / Intensity zones	t, лет / t, years	PGA (PHA) *, cm/c² / PGA (PHA) *, cm/s²	T_a , c / T_a , s	τ _{0,3} , c / τ _{0,3} , s	τ _{0,5} , c / τ _{0,5} , s					
Горизонтальные компоненты акселерограмм / Horizontal components of accelerograms										
7 MSK	500-1000	135 (112-162)	0,35 (0,16-0,50)	4,8 (3,0-7,3)	2,8 (2,0-3,8)					
	500	198 (144-315)	0,38 (0,21-0,81)	4,9 (2,5-9,2)	3,2 (1,8-6,2)					
8 MSK	1000-2500	276 (200-437)	0,38 (0,23-0,88)	5,6 (2,5-11,4)	3,7 (1,8-7,7)					
	5000	380 (276-603)	0,41 (0,24-0,84)	7,2 (4,3-10,1)	4,7 (2,8-8,7)					
9 MSK	2500-5000	524 (375-758)	0,4290,22-0,66)	7,5 (4,5-15,5)	4,3 (3,1-6.1)					
Вертикальные компоненты акселерограмм / Vertical components of accelerograms										
7 MSK	500-1000	105 (98-126)	0,33 (0,20-0,60)	5,0 (2,8-8,0)	2,9 (2,1-4,0)					
8 MSK	500	162 (125-212)	0,36 (0,28-0,60)	5,1 (2,9-9,1)	3,7 (2,0-8,7)					
	1000-2500	225 (174-295)	0,36 (0,31-0,60)	5,5 (2,9-9,5)	3,8 (2.2-8,0)					
	5000	311 (240-407)	0,39 (0,29-0,60)	5,7 (2,9-11,1)	3,7 (2,0-8,7)					
9 MSK	2500-5000	448 (376-537)	0,40 (0,28-0,8)	7,2 (5,0-14,5)	4,4 (3,5-7,8)					

^{*}PGA и PHA – оценки для горизонтальных и вертикальных компонент акселерограмм, соответственно. /*PGA and PHA are assessments for horizontal and vertical components of accelerograms, respectively.

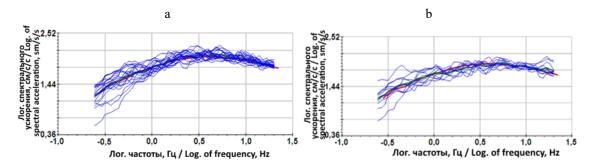


Рис. 6. Сопоставление прогнозных спектров реакции (красный цвет) и спектров, рассчитанных по синтезированным и реальным масштабированным акселерограммам землетрясений с t=1000-2500 лет, для выделенных на территории РСО-Алания зон с I=8 баллов МЅК. Синий цвет — индивидуальные значения; зеленый цвет — средний по массиву. Индексы а и в обозначают горизонтальные и вертикальные компоненты записи, соответственно /

Fig. 6. Comparison of the predicted response spectra (red) and the spectra calculated according to the synthesized and real scaled earthquake accelerograms with t=1000-2500 years for the zones with I=8 MSK points allocated on the territory of RNO-Alania. Blue color denotes individual values; green color – average for the array. Indices a and b denote the horizontal and vertical components of the record, respectively

собой и не противоречат другим известным данным по изучаемому району и другим сейсмоактивным районам. Поэтому они могут быть рекомендованы для использования в дальнейших исследованиях и в практических целях.

Исходя из общих соображений по практическому использованию прогнозных акселерограмм и в соответствиеи с рекомендациями из [Штейнберг и др., 1993] можно сказать, что для достижения необходимой точности, расчет реакции конструкций целесообразно производить по каждой из рекомендуемого для данного случая набора акселерограмм с последующим усреднением всех индивидуальных определений реакций по каждой акселерограмме. Эти оценки и будут являться прогнозируемыми наиболее вероятными реакциями данных систем (конструкций) на расчетные сейсмические воздействия.

Заключение

Поводя итог можно сказать, что проведенные исследования позволили в значительной мере уточнить и расширить известные по предыдущим работам оценки вероятных сейсмических воздействий на территории РСО-Алания. При этом впервые для данного района на основании единого методического подхода с использованием однотипных расчетных схем получены полноценные и согласованные вероятностные оценки большинства из используемых в инженерно-сейсмологической практике характеристик возможных сейсмических воздействий. Прежде всего, это относится к оценкам макросейсмических интенсивностей сотрясений, пиковых амплитуд и спектров ускорений колебаний грунта, а также других количественных (физических) параметров колебаний грунта, ожидаемых в выделенных на изучаемой территории зонах с различными вероятными интенсивностями (балльностями) сотрясений. При этом важными как в региональном, так и в более общем плане представляются результаты, свидетельствующие о том, что вероятностные уровни спектров и амплитуд ускорений колебаний грунта в пределах одной и той же зоны балльности могут различаться в зависимости от среднего периода повторяемости прогнозируемых землетрясений. При этом степень этих различий может быть неодинакова в зонах с разными прогнозируемыми балльностями сотрясений. Так, если в выделенных на изучаемой территории зонах с сейсмичностью 7 баллов MSK и в зонах с сейсмичностью 9
баллов MSK выявленные различия по уровню этих параметров не превышают 8-9%,
то в зонах с сейсмичностью 8 баллов MSK эти различия достигают 100%. В настоящее время в отечественных нормативных документах это никак не регламентируется. Второе важное обстоятельство – отличия полученных в настоящем исследовании
прогнозных спектров реакции от стандартных спектров, рекомендуемых для данной
территории строительными нормативами. Здесь так же, как и в предыдущем случае,
эти отличия зависят от периодов повторяемости прогнозируемых землетрясений.
Кроме того, эти различия зависят от частот спектральных составляющих. Так если
на высоких частотах спектры настоящего исследования могут давать более высокие
(до 80%) значения спектральных ускорений, то на низких частотах (менее 1 Гц) они
наоборот могут быть до 100% ниже стандартных. Эти различия могут оказывать существенное влияние на качество расчетов на сейсмостойкость, например, протяженных или высотных объектов.

Выводы

- 1. Разработанные и использованные в настоящих исследованиях новые методические подходы позволили получить более точные и детальные оценки возможных на территории РСО-Алания сейсмических воздействий макросейсмических интенсивностей сотрясений, пиковых амплитуд, периодов, длительностей и спектров ускорений колебаний грунта, а также акселерограмм при землетрясениях со средними периодами повторяемости *t*=500, 1000, 2500 и 5000 лет.
- 2. Полученные новые данные о вероятных сейсмических воздействиях на территории РСО-Алания показывают, что связанные с амплитудными уровнями прогнозируемые характеристики колебаний грунта могут существенно (до 100%) различаться в пределах одной и той же зоны балльности в зависимости от периодов повторяемости ожидаемых землетрясений.
- 3. Прогнозируемые на территории РСО-Алания уровни вероятных спектров реакции ускорений колебаний грунта, в зависимости от частот спектральных составляющих могут существенно (до 100%) отличаться от нормативных спектров, как в большую, так и в меньшую стороны.
- 4. Полученные новые данные свидетельствуют о том, что рекомендуемые для территории РСО-Алания нормативные оценки возможных сейсмических воздействий могут содержать неточности и поэтому нуждаться в дополнительных уточнениях и детализациях, особенно по отношению к проектированию ответственных и уникальных объектов.
- 5. В дальнейшем исследования по детальным оценкам сейсмической опасности целесообразно продолжить и в других районах Северного Кавказа.

Литература

- 1. Ванмарке Э. Х. Реакция сооружений на землетрясения. // В кн.: Сейсмический риск и инженерные решения. М.: Недра, 1981. С. 256-299.
- 2. Заалишвили В.Б. Сейсмическое микрорайонирование территорий городов, населенных пунктов и больших строительных площадок. М.: Наука, 2009. 349 с.
- 3. Заалишвили В.Б., Дзеранов Б.В., Габараев А.Ф. Оценка сейсмической опасности территории и построение вероятностных карт. // Геология и геофизика Юга России. 2011. № 1. С. 48-58.

- 4. Завьялов А.Д., Перетокин С.А., Данилова Т.И., Медведева Н.С., Акатова К.Н. Общее сейсмическое районирование от карт ОСР-97 к ОСР-2016 и картам нового поколения в параметрах физических характеристик. // Вопросы инженерной сейсмологии. 2018. Т. 46. № 4. С. 47-68.
- 5. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-97. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. Министерство науки и технологий, Российская Академия наук, Объединенный Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта. М. 1999. 57 с.
- 6. Салганик М.П. О моделировании сейсмических воздействий на строительные сооружения. // Вопросы инженерной сейсмологии. 1987. Вып. 28. С. 157-173.
- 7. Сейсмическое районирование территории СССР. Методические основы и региональное описание карты 1978 г. / Отв. ред. В. И. Бунэ, Г. П. Горшков. М.: Наука, 1980. 307 с.
- 8. Соколов В.Ю. Оценка вероятных спектров колебаний грунта и спектров реакции с учетом локальных грунтовых условий. // Вопросы инженерной сейсмологии. 1991. Вып. 32. С. 137-147.
- 9. Уломов В.И. Актуализация нормативного сейсмического районирования в составе единой информационной системы «Сейсмобезопасность России». // Вопросы инженерной сейсмологии. 2012. Т. 39. № 1. С. 5-38.
- 10. 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
- 11. Чернов Ю. К., Заалишвили В. Б., Чернов А. Ю. Моделирование сильных движений грунта для прогнозирования вероятных сейсмических воздействий на территории РСО-Алания. // Физика Земли. -2020. -№ 5. 2020. C. 46-58.
- 12. Штейнберг В.В., Сакс М.В., Аптикаев Ф.Ф. и др. Методы оценки сейсмических воздействий (пособие). // Вопросы инженерной сейсмологии. 1993. Вып. 34. С. 5-94.
- 13. 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. https://doi. org/10.1007/s10518-013-9461-4.
- 14. Atkinson G.M., Sonley E. Empirical Relationships between Modified Mercalli Intensity, and Response Spectra. // BSSA. 2000. Vol. 90. No. 2. pp. 533-544.
- 15. Balassanian S., Ashirov T, Cheligze T. et al. Seismic hazard assessment for the Caucasus test area. // The global seismic hazard assessment program (GSHAP) 1992-1999. Annali di Geofisica. 1999. Vol. 42. No. 6. pp. 1139-1152.
- 16. Delavaud E., Cotton F., Scherbaum F. et al. Toward a ground-motion logic tree for probabilistic seismic hazard assessment in Europe. // J Seismol. 2012. Vol. 16. pp. 451-473. DOI: 10.1007/s10950-012-9281-z
- 17. Kale Ö., Akkar S. A ground-motion logic-tree scheme for regional seismic hazard studies. // Earthquake Spectra. 2017. Vol. 33. No. 3. pp. 837-856. DOI: 33 (3):837-856.
- 18. Ulomov V.I. et al. Seismic hazard of Northern Eurasia. // The global seismic hazard assessment program (GSHAP) 1992-1999. Annali di Geofisica. 1999. Vol. 42. No. 6. pp. 1023-1038.
- 19. Zaalishvili V.B., Chernov Yu.K. Methodology of Detailed Assessment of the Seismic Hazard of the Republic of North Ossetia-Alania. // The Open Construction and Building Technology Journal. 2018. No. 12. pp. 309-318.
- 20. Zhang P., Yang Z., Gupta H.K., Bhatia S.C., Shedlock K.M. Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP) in continental Asia. // The global seismic hazard assessment program (GSHAP) 1992-1999. // Annali di Geofisica. 1999. Vol. 42. No. 6. pp. 1167-1190.

References

1. Vanmarke E. H. The response of structures to earthquakes. In: Seismic risk and engineering solutions. Moscow. Nedra, 1981. pp. 256-299. (In Russ.)

- 2. Zaalishvili V.B. Seismic microzonation of cities, settlements and large construction sites. Moscow. Nauka, 2009. 349 p. (In Russ.)
- 3. Zaalishvili V.B., Dzeranov B. V., Gabaraev A. F. Assessment of seismic hazard of the territory and construction of probabilistic maps. Geology and Geophysics of Russian South. 2011. No. 1. pp. 48-58. (In Russ.)
- 4. Zavyalov A. D., Peretokin S.A., Danilova T. I., Medvedeva N. S., Akatova K. N. General seismic zoning from GSZ-97 maps to GSZ-2016 and new generation maps in the parameters of physical characteristics. Questions of engineering seismology. 2018. Vol. 46. No. 4. pp. 47-68. (In Russ.)
- 5. A set of maps of general seismic zoning of the territory of the Russian Federation GSZ-97. Explanatory note and a list of cities and towns located in earthquake-prone areas. Ministry of Science and Technology, Russian Academy of Sciences, Joint Institute of Physics of the Earth named after O. Yu. Schmidt. Moscow. 1999. 57 p. (In Russ.)
- 6. Salganik M.P. On the modeling of seismic impacts on building structures. Questions of engineering seismology. 1987. Issue 28. pp. 157-173.
- 7. Seismic zoning of the territory of the USSR. Methodological foundations and regional description of the 1978 map. editors V.I. Bune, G.P. Gorshkov. Moscow. Nauka, 1980. 307 p. (In Russ.)
- 8. Sokolov V. Yu. Assessment of probable ground motion spectra and response spectra taking into account local ground conditions. Questions of engineering seismology. 1991. Issue 32. pp. 137-147. (In Russ.)
- 9. Ulomov V.I. Updating the normative seismic zoning as part of the unified information system "Seismic Safety of Russia". Questions of engineering seismology. 2012. Vol. 39. No. 1. pp. 5-38. (In Russ.)
- 10. Chernov Yu.K., Zaalishvili V.B., Dzeranov B.V. Seismicity models for probabilistic detailed seismic zoning of the territory of North Ossetia-Alania. Geology and Geophysics of Russian South. 2018. No. 4. pp. 162–178. DOI:10.23671/VNC.2018.4.20158 (In Russ.)
- 11. Chernov Yu. K., Zaalishvili VB, Chernov A. Yu. Modeling of strong ground movements for predicting probable seismic effects in the territory of North Ossetia-Alania. Physics of the Solid Earth. 2020. No. 5. 2020. pp. 46-58. (In Russ.)
- 12. Steinberg V.V., Saks M.V., Aptikaev F.F. et al. Methods for assessing seismic effects (manual). Questions of engineering seismology. 1993. Issue 34. pp. 5-94. (In Russ.)
- 13. 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.
- 14. Atkinson G. M., Sonley E. Empirical Relationships between Modified Mercalli Intensity, and Response Spectra. BSSA. 2000. Vol. 90. No. 2. pp. 533-544.
- 15. Balassanian S., Ashirov T, Cheligze T. et al. Seismic hazard assessment for the Caucasus test area. The global seismic hazard assessment program (GSHAP) 1992-1999. Annali di Geofisica. 1999. Vol. 42. No. 6. pp. 1139-1152.
- 16. Delavaud E., Cotton F., Scherbaum F. et al. Toward a ground-motion logic tree for probabilistic seismic hazard assessment in Europe. J Seismol. 2012. Vol. 16. pp. 451-473. DOI: 10.1007/s10950-012-9281-z
- 17. Kale Ö., Akkar S. A ground-motion logic-tree scheme for regional seismic hazard studies. Earthquake Spectra. 2017. Vol. 33. No. 3. pp. 837-856. DOI: 33 (3):837-856.
- 18. Ulomov V. I. et al. Seismic hazard of Northern Eurasia. The global seismic hazard assessment program (GSHAP) 1992-1999. Annali di Geofisica. 1999. Vol. 42. No. 6. pp. 1023-1038.
- 19. Zaalishvili V.B., Chernov Yu.K. Methodology of Detailed Assessment of the Seismic Hazard of the Republic of North Ossetia-Alania. The Open Construction and Building Technology Journal. 2018. No. 12. pp. 309-318.
- 20. Zhang P., Yang Z., Gupta H. K., Bhatia S. C., Shedlock K. M. Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP) in continental Asia. The global seismic hazard assessment program (GSHAP) 1992-1999. Annali di Geofisica. 1999. Vol. 42. No. 6. pp. 1167-1190.