

УДК 550.34

DOI: 10.46698/VNC.2023.98.10.005

Оригинальная статья

О новом подходе к учету влияния «грунтового» фактора при вероятностных оценках сейсмической опасности территорий

Ю.К. Чернов 

¹Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук, Россия, 362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: chenta-26@mail.ru

Статья поступила: 05.09.2023, доработана: 20.11.2023, принята к публикации: 30.11.2023

Резюме: Актуальность работы. В последнее время стали появляться данные о том, что при вероятностном анализе сейсмической опасности (PSHA) для учета грунтовых условий лучше использовать новые «одноступенчатые» расчетные схемы, которые дают более точные оценки, чем старые «двухступенчатые». Однако эти данные получены на ограниченном материале и, поэтому, остается вопрос, настолько ли они имеют общий характер и не являются ли частным случаем. В настоящей статье сделана попытка прояснения этого важного в научно-методическом и прикладном плане обстоятельства, чем и определяется ее актуальность. **Цель исследования.** Изучение особенностей и масштабов флуктуаций интегральных вероятностных оценок приращений балльности и спектральных характеристик «мягких» грунтов по отношению к «твердым» при землетрясениях в районах с разными сейсмогеологическими условиями. **Методы исследования.** Рассмотрены четыре тестовых участка территорий с разными сеймотектонической обстановкой и сейсмическим режимом. Для каждого участка выполнен вероятностный анализ сейсмической опасности. Все расчеты PSHA сделаны отдельно для «мягких» и для «твердых» грунтов. Оценивались вероятные интенсивности сотрясений и спектры (Фурье и реакции) ускорений колебаний грунта. В целях повышения информативности эксперимента для одного и того же участка производились расчеты с использованием различных моделей зон ВОЗ и повторяемостей землетрясений. Итоговые оценки сделаны для землетрясений с разными средними периодами повторяемости. Варианты оценок, полученных для «мягких» и «твердых» грунтов применительно к разным сейсмогеологическим условиям и для разных средних периодов повторяемости землетрясений затем сопоставлены между собой, на основании чего и сделаны окончательные выводы. **Результаты исследования.** Для исследуемых участков (гг. Владикавказ, Ставрополь, Моздок и ст. Кавказская) разработаны свои функции распределения вероятностей интенсивностей сотрясений, уровней спектральной плотности Фурье и спектральных ускорений «мягких» и «твердых» грунтов, определены значения этих параметров для землетрясений со средними периодами повторяемости от 100 до 10000 лет и соответствующие их разности (приращения балльности) и соотношения (спектральные характеристики). Анализ всех вариантов расчетов показал, что в соотношениях параметров колебаний «мягких» и «твердых» грунтов наблюдается значительная вариабельность – по приращениям балльности до 2 баллов MSK, по спектральным характеристикам до 60%. Эти результаты показывают, что вероятностные оценки сейсмической опасности по традиционной «двухступенчатой» схеме, когда «грунтовая» составляющая общего эффекта оценивается отдельно от «очаговой» составляющей и затем учитывается в виде некоторой постоянной поправки, могут приводить к существенным искажениям. Более перспективным здесь является использованный в данной работе «одноступенчатый» подход.

Ключевые слова: землетрясения, вероятностный анализ сейсмической опасности, интенсивность сотрясений, спектры колебаний грунта, приращения балльности, спектральные характеристики.

Для цитирования: Чернов Ю.К. О новом подходе к учету влияния «грунтового» фактора при вероятностных оценках сейсмической опасности территорий. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(4): 55-70. DOI: 10.46698/VNC.2023.98.10.005

DOI: 10.46698/VNC.2023.98.10.005

Original paper

About a new approach to accounting for the influence of the “soil” factor in probabilistic assessments of seismic hazard of territories

Y.K. Chernov 

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

Received: 05.09.2023, revised: 20.11.2023, accepted: 30.11.2023

Abstract: Relevance. Recently, the data have begun to appear that in the probabilistic seismic hazard analysis (PSHA), it is better to use new “one-stage” calculation schemes to account soil conditions, which give more accurate estimates than the old “two-stage” ones. However, these data were received on limited material and, therefore, the question remains whether they are so general and are not a special case. In this article, an attempt is made to clarify this important circumstance in scientific, methodological and practical terms, which determines its relevance. **Aim.** To research the features and scale of fluctuations in integral probabilistic estimates of the increments of the score and spectral characteristics of “soft” soils relative to “hard” during earthquakes in areas with different seismogeological conditions. **Methods.** Four test sites of territories with different seismotectonic conditions and seismic regime are considered. A PSHA was performed for each site. All PSHA calculations are made separately for “soft” and “hard” soils. The probable intensities of shaking and the spectra (Fourier and reaction) of accelerations of soil vibrations were estimated. In order to increase the informativeness of the experiment for the same site, calculations were made using different models of PEF zones and earthquake repeatability. Final estimates are made for earthquakes with different average recurrence periods. The variants of estimates obtained for “soft” and “hard” soils in relation to different seismogeological conditions and for different average periods of earthquake repeatability are then compared with each other, on the basis of which the final conclusions are made. **Results.** For the studied sites (Vladikavkaz, Stavropol, Mozdok and village Kavkazskaya) were developed own probability distribution functions for earthquake intensities, Fourier spectral density levels and spectral accelerations of “soft” and “hard” soils, the values of these parameters for earthquakes with average repeatability periods from 100 to 10,000 years and their corresponding differences (intensity increments) and ratios (spectral characteristics) were determined. The analysis of all the calculation options showed that there is significant variability in the ratios of the vibration parameters of “soft” and “hard” soils – in intensity increments up to 2 units of MSK scale, in spectral characteristics up to 60%. These results show that probabilistic estimates of seismic hazard according to the traditional “two-stage” scheme, when the “soil” component of the total effect is estimated separately from the “focus” component and then taken into account in the form of some constant correction, can lead to significant distortions. The “one-stage” approach used in this paper is more prospective.

Keywords: earthquakes, probabilistic seismic hazard analysis, intensity of shaking, spectra of soil vibrations, intensity increments, spectral characteristics.

For citation: Chernov Y.K. About a new approach to accounting for the influence of the “soil” factor in probabilistic assessments of seismic hazard of territories. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(4): 55-70. DOI: 10.46698/VNC.2023.98.10.005

Введение

Количественные оценки сейсмической опасности помимо своего чисто познавательного значения, являются одной из важнейших составляющих комплекса защитных мероприятий от вредного воздействия землетрясений. Уровень сейсмической опасности определяется рядом природных факторов, которые условно можно разделить на две основные группы. Первая – характеристики очагов возможных на данной территории землетрясений и глубинные свойства среды распространения сейсмических возмущений от очагов в расчетную точку и вторая – строение и свойства поверхностных грунтовых массивов, в которых и проявляются сейсмические эффекты.

В Российской Федерации решению проблемы сейсмической опасности служат три последовательно повышающих точность и детальность оценок вида сейсмического районирования – общее сейсмическое районирование (ОСР), детальное сейсмическое районирование (ДСР) и сейсмическое микрорайонирование (СМР) (см. [Медведев, 1962; Сейсмическое... , 1977; 1978; Касымов, 1979; Штейнберг и др., 1993; Оценка... , 1997; Геодинамика... 1997; The global... , 1999; Составление... , 1999; Заалишвили, 2009; Уломов, 2012; Общее... , 2016; Завьялов и др., 2018; Трифонов и др., 2019; Чернов, 2021]).

При ОСР и ДСР делается акцент на изучение «очаговой» группы факторов. Факторы же «грунтовой» группы, здесь учитываются в ограниченном виде – оценки даются только для некоторых «базовых» или «эталонных» грунтов. Поэтому на практике для грунтов, которые отличаются от «эталонных» в оценки ОСР и ДСР вводятся специальные поправки. Для этого используют два основных подхода. При первом (централизованно, на уровне норм и правил) разные грунты предварительно группируют в несколько типов по их «сейсмическим свойствам». В настоящий момент это «твердые» или «скальные», или «улучшенные» грунты (I категория СНиП по сейсмическим свойствам), «средние» или «мягкие», или переходные от «твердых» к «рыхлым» (II категория) и «рыхлые» или «ухудшенные» (III категория). В последних редакциях СНиП выделяется еще более «неблагоприятная» IV категория. Для каждой категории грунта предусматриваются свои поправки, одинаковые (т.е. не зависящие от «очаговых» факторов) на территории всей страны.

Второй подход, реализуется прежде всего в СМР. Здесь уже рассматриваются не условные осредненные типы грунтов, а реальные грунтовые разрезы (точнее модели реальных разрезов), что расширяет возможности для более точного определения степени и характера влияния грунтовой толщи на ожидаемые характеристики сейсмических воздействий.

К настоящему времени достигнут большой прогресс в развитии этого направления. Изучены закономерности и разработаны соответствующие методы, позволяющие достаточно точно оценивать реакцию различных грунтовых разрезов в зависимости от литологического состава, физико-механических свойств и конфигурации слагающих эти разрезы инженерно-геологических элементов, от частоты

и углов подхода сейсмических волн, от рельефа местности и других факторов. Причем, если ранее основные достижения, в основном касались колебательных сейсмических движений, то в последние годы наблюдаются очевидные успехи в изучении нелинейности сейсмической реакции грунтов с выходом на новые виды оценок сейсмической опасности, такие как сейсмогенное разжижение, сейсмогравитационные явления, сейсмические просадки грунта и др. (см. например, [Cotton et al., 2006; Akkar et al., 2014; Bozorgnia et al., 2014; Caprio, 2015; Fäh et al., 2012; Куруоглы, Эскисар, 2015; Mahmood et al., 2021; Заалишвили и др., 2021; 2022; Zumpano et al., 2022; Мельков и др., 2022]). Можно сказать, что сейчас уже в значительной мере наработана научная база, позволяющая производить адекватные оценки вклада «грунтовой составляющей» в общие сейсмические эффекты.

В то же время на практике, в основном, из-за недостаточного знания реальных характеристик грунтовой толщи и параметров, подходящих к ее подошве «исходных» сейсмических сигналов, зачастую не удается в полной мере реализовать в принципе имеющийся здесь потенциал. Поэтому при использовании второго подхода во многих случаях оценивается (хотя и с большей точностью), но по сути та же «грунтовая» поправка, которая затем вводится либо в готовые оценки ОСР или ДСР, либо (что бывает реже) в используемые в дальнейших расчетах модели сильных движений грунта (модели СДГ). Таким образом, отличительной чертой вышеуказанных «грунтовых» поправок как первого, так и второго типов является их слабая зависимость от параметров окружающего расчетную точку сейсмогенерирующего объема энергия-пространство-время.

Такая «двухступенчатая», как мы ее называем, схема расчетов сложилась и могла считаться в достаточной степени корректной в периоды преобладания детерминистских подходов. Сейчас же, в связи с переходом на вероятностные расчеты, ситуация изменилась. Так, проведенные в Геофизическом институте ВНИЦ РАН исследования показали (см. [Чернов и др., 2022]), что при вероятностной постановке задачи вышеописанное разделение оценок на «очаговые» и «грунтовые» может приводить к значительным погрешностям. В то же время в данной работе подчеркивалось, что полученные результаты пока следует расценивать как частный случай, относящийся только к конкретно рассмотренной территории, а имеют ли они более общий характер следует выяснить в процессе дальнейших исследований. Рассмотрению именно этой задачи и посвящена данная работа, чем и определяется ее актуальность и значимость.

Информационная база и методика исследований

Настоящее исследование базируется на результатах наших предыдущих работ и является их продолжением. Некоторые из этих результатов подробно изложены в статье [Чернов и др., 2022], в которой также имеются ссылки на предыдущие наши публикации и первоисточники. Здесь лишь укажем, что первыми и задающими тон дальнейшим разработкам данного цикла были выявленные различия в структуре построенных на основе статистического анализа большого объема эм-

пирических данных, функций затухания спектров Фурье колебаний различных по своим сейсмическим свойствам (см. выше) «мягких» и «твердых» грунтов. Данные различия приводят к тому, что, например, отношения между спектрами колебаний одних и тех же типов грунтов (в нашем случае «мягких» и «твердых») не являются постоянными величинами, как это принимается обычно в отечественной практике оценок сейсмической опасности, а достаточно сложным образом меняются в зависимости от магнитуды землетрясения (M), расстояния до очага (D) и частоты спектральной составляющей (f).

В настоящей работе эти новые модели СДГ использованы для вероятностного анализа сейсмической опасности (PSHA) участков, расположенных в районах с высоким (г. Владикавказ), средним (гг. Ставрополь и Моздок) и низким (ст. Кавказская) уровнем сейсмичности. Рассчитывались функции распределения вероятностей не превышения (превышения) уровней кумулятивных или интегральных сейсмических воздействий, представляющие собой суперпозицию воздействий всех потенциально опасных для расчетного участка очагов землетрясений с учетом вероятности их возникновения в данном месте в заданный промежуток времени. В качестве прогнозируемых параметров воздействий рассмотрены обычно используемые в отечественной инженерно-сейсмологической практике макросейсмические интенсивности (балльности) сотрясений ($I_{сп}$), спектры Фурье ($|S|(f)$) и спектры реакции $SA(f)$ ускорений колебаний грунта. Обозначение интенсивности сотрясений символом $I_{сп}$ показывает, что данный параметр здесь, также, как в [Чернов и др., 2022] рассчитывается через спектр Фурье. По полученным функциям распределения оценивались уровни возможных воздействий для землетрясений со средними периодами повторяемости $t=100, 200, 500, 1000, 2500, 5000$ и 10000 лет. Общая расчетная схема и отдельные математические процедуры в настоящих исследованиях (включая оценки спектров реакции по спектрам Фурье) такие же, как и при выполнении ДСР территории РСО-Алания [Чернов, 2021; Чернов и др., 2022]. Все оценки сначала сделаны отдельно для «мягких» и для «твердых» грунтов, после чего по ним рассчитаны вероятные приращения балльности ($\Delta I_{сп}$) и спектральные характеристики Фурье ($\varphi(f)=|S|(f)_{\text{мяг}}/|S|(f)_{\text{ТВ}}$) и реакции ($\psi(f)=SA(f)_{\text{мяг}}/SA(f)_{\text{ТВ}}$) «мягких» грунтов по отношению к «твердым».

Для производства расчетов помимо описанных выше моделей СДГ использованы так называемые модели локальной сейсмичности, свои для каждого исследуемого участка. Для увеличения информативности эксперимента в ряде случаев для одного и того же участка рассмотрено несколько версий таких моделей. На рисунке 1 приведены используемые версии моделей зон возникновения очагов землетрясений (зон ВОЗ). Подробное описание этих моделей дается в первоисточниках [The global..., 1999; Составление..., 1999]. Здесь лишь поясним, что в наших обозначениях версии ДСР-1 и ДСР-2 соответствуют вариантам зон ВОЗ, разработанным в [Составление..., 1999] внутрирегиональным и внерегиональным методами.

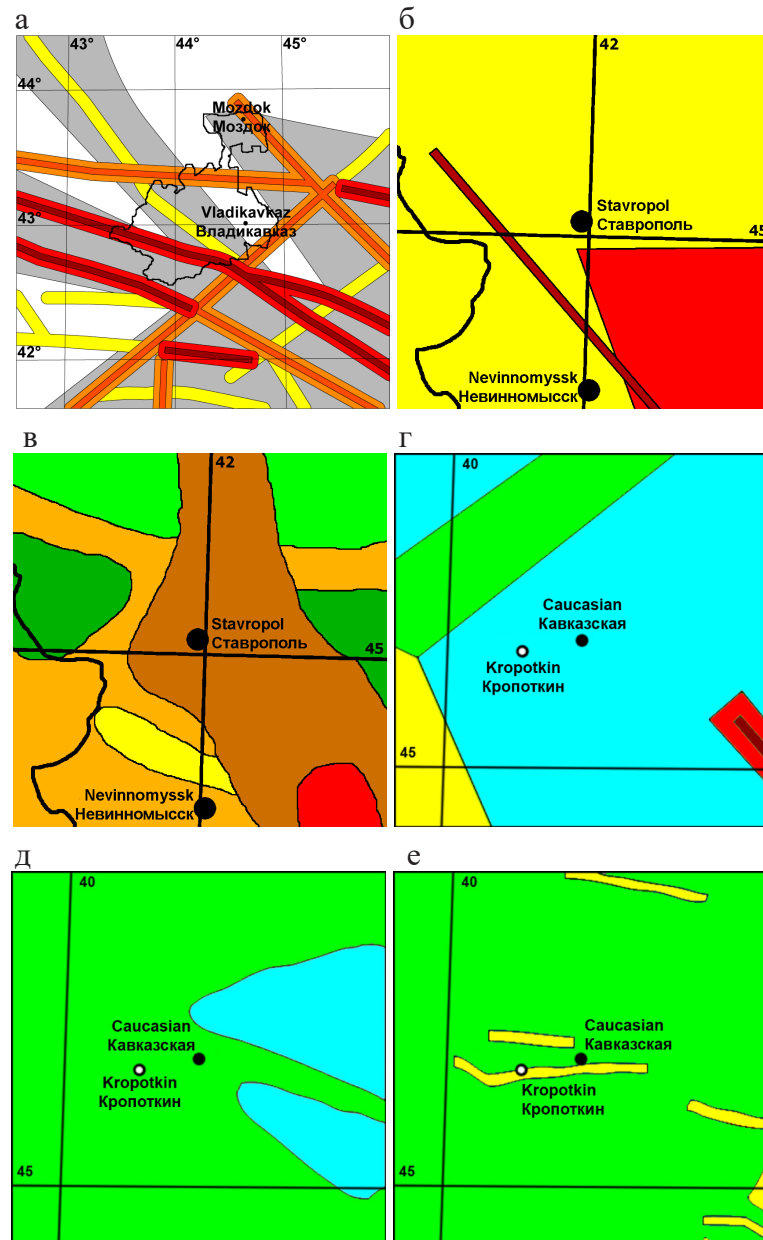


Рис.1. Модели зон ВОЗ для исследуемых районов: а – версия ОСР для гг. Владикавказ и Моздок, где ломаная черная линия – граница РСО-Алания (пояснения в [Чернов, 2021]); б и в – версии ОСР и ДСП-1, соответственно, для г. Ставрополь, где, темно-кричный, красный, коричневый, светло-коричневый, желтый, зеленый и светло-зеленый цвета означают зоны с $M_{max} = 6,0, 5,5, 5,0, 4,5, 4,0, 3,5$ и $3,0$, соответственно; г, д и е – версии ОСР, ДСП-1 и ДСП-2, соответственно, для ст. Кавказская, где темно-коричневый и красный цвета означают, соответственно, осевые и боковые подзоны зоны с $M_{max} = 6,0$, желтый, зеленый и голубой цвета означают зоны с $M_{max} = 5,5, 4,5$ и $4,0$, соответственно /

Fig.1. Models of zones of possible earthquake focuses (PEF) for the researched areas: “a” – the version of the general seismic zoning (GSZ) for Vladikavkaz and Mozdok, where the broken black line is the border of the RSO–Alania (explanations in [Chernov, 2021]); “b” and “c” – the versions of the GSZ and the detailed seismic zoning (DSZ–1), accordingly, for Stavropol, where, dark-brown, red, brown, light-brown, yellow, green and light-green colors mean areas with $M_{max} = 6,0, 5,5, 5,0, 4,5, 4,0, 3,5$ and $3,0$, respectively; d, e and f – versions of the GSZ, DSZ–1 and DSZ–2, accordingly, for Caucasian vill., where dark-brown and red colors mean, accordingly, axial and lateral subzones of the zone with $M_{max} = 6,0$, yellow, green and blue colors mean zones with $M_{max} = 5,5, 4,5$ and $4,0$, respectively.

Прим.: а–а; б–б; в–в; г–г; д–д; е–е.

Модели повторяемости землетрясений разных магнитуд построены таким же способом, как и для ДСР территории РСО-Алания [Чернов, 2021].

Для района гг. Владикавказ и Моздок в качестве базового (общего, без разделения на зоны ВОЗ) для диапазона магнитуд $M=3,0-7,5$ принято выражение:

$$\lg N = -0,898M + 0,368 \quad (1)$$

Для района г. Ставрополь и ст. Кавказская аналогичное выражение для диапазона магнитуд $M=3,0-6,0$ имеет вид:

$$\lg N = -0,868M - 0,102 \quad (2)$$

В выражениях (1) и (2) N – среднее количество очагов землетрясений данной магнитуды, приведенное к площади $S=5 \text{ км} \times 5 \text{ км}$ и времени 1 год. Выражения (1) и (2) справедливы для землетрясений, сгруппированных по магнитудам с шагом 0,5 т.е. для $M=3,0$, $M=3,5$, $M=4,0$ и т.д. Далее, полученные по выражениям (1) и (2) значения $N(M)$ преобразованы (см. [Чернов, 2021]) в оценки, учитывающие показанные на рисунке 1 версии деления территорий на разные зоны ВОЗ. В графическом виде описанные модели для зон ВОЗ с $M_{\max}=7,5$ (район гг. Владикавказа и Моздока) и с $M_{\max}=6,0$ (район г. Ставрополя и ст. Кавказской) показаны на рис. 2. Аналогичные графики для зон ВОЗ с другими (меньшими) M_{\max} получаются из графиков на рисунке 2 отсечением правой части в соответствии с данными рисунка 1.

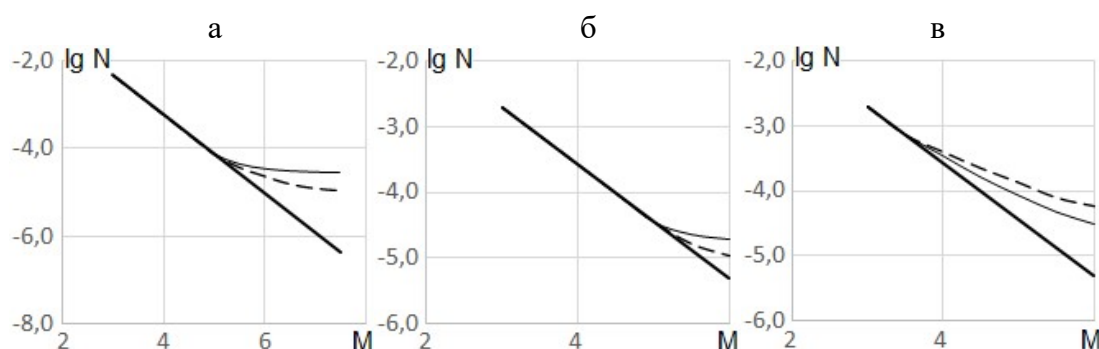


Рис. 2. Среднее количество землетрясений (N) разных магнитуд (M) (приведено к площади $S=5 \text{ км} \times 5 \text{ км}$ и времени $t=1$ год) для районов: а – гг. Владикавказ и Моздок и б – г. Ставрополь и ст. Кавказская, где толстые линии – общие для всего района, тонкая сплошная и пунктир – для осевых и боковых зон линейных зон ВОЗ по моделям ОСР, соответственно; в – г. Ставрополь и ст. Кавказская, где толстая линия – общая для всего района, тонкая сплошная линия и пунктир – для зон ВОЗ по моделям ДСР-1 и ДСР-2, соответственно /

Fig. 2. The average number of earthquakes (N) of different magnitudes (M) (given to an area of $S=5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ and time $t=1$ year) for the districts: “a” – Vladikavkaz and Mozdok and “b” – Stavropol and Kavkazskaya vill., where thick lines are common to the entire district, thin solid and stipple line – for the axial and lateral zones of the linear zones PEF according to the GSZ models, accordingly; “c” – Stavropol and Kavkazskaya vill., where a thick line is common to the entire district, a thin solid line and stipple line – for the PEF zones according to the DSZ-1 and DSZ-2 models, respectively.

Прим.: а-а; б-б; в-в.

Так же, как и в случае моделей повторяемости, в расчетах использованы показанные на рисунке 3 два варианта моделей распределения очагов землетрясений разных магнитуд по глубине – разработанные для района гг. Владикавказ и Моздок и для района г. Ставрополь и ст. Кавказская. Первый вариант – скорректированная модель из [Чернов, 2021]. Второй – это обобщение наших предыдущих разработок,

выполненных в рамках исследований по оценкам сейсмической опасности различных участков территорий Ставропольского и Краснодарского краев (Отчеты находятся в фондах ОАО «СтавропольТИСИЗ», ООО «Изыскатель», ООО «Научно-технический инженерно-геологический центр».

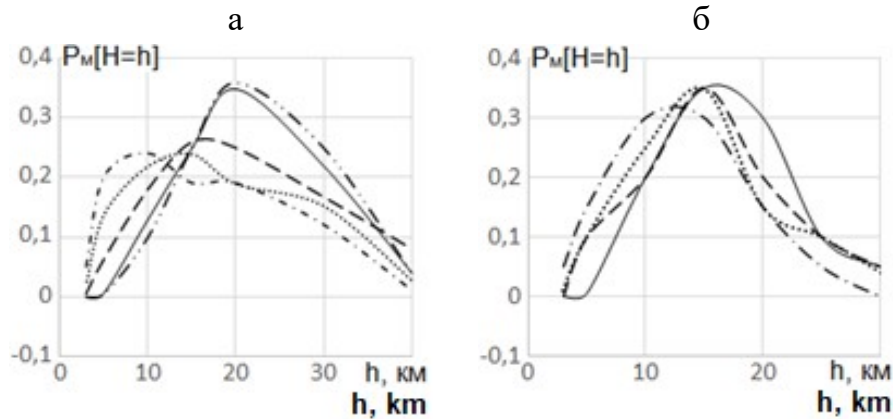


Рис. 3. Эмпирические функции плотности вероятности (гистограммы) распределения очагов землетрясений разных магнитуд по глубине ($P_M[H=h]$): а – для района гг. Владикавказ и Моздок и б – для г. Ставрополь и ст. Кавказская. Пунктир с точкой, точечная, пунктир, сплошная, пунктир с двумя точками – для $M=3$; 4; 5; 6 и 7-7,5, соответственно /

Fig. 3. Empirical functions of probability density (histograms) of the distribution of earthquake foci of different magnitudes by depth ($P_M[H=h]$): “a” – for the area of Vladikavkaz and Mozdok and “b” – for Stavropol and Kavkazskaya vill. Stippled line with a dot, dotted line, stippled line, solid, stippled line with two dots – for $M=3$; 4; 5; 6 and 7-7.5, accordingly.

Прим.: а-а; б-б.

Очаги потенциально опасных землетрясений моделировались площадками в форме эллипсов, большая (L) и меньшая (W) оси которых в зависимости от магнитуды определялись как:

$$\lg L = -0,040M^2 + 0,867M - 2,642 \quad (3)$$

$$\lg W = -0,023M^2 + 0,745M - 2,429$$

где L и W в км.

Выражения (3) являются обобщением определений, приведенных в различных публикациях (см. [Штейнберг и др., 1993; Wells, Coppersmith, 1994; Vakov, 1996; Геодинамика... 1997; The global... , 1999; Чернов, 2021]).

По тем же соображениям, что и в [Чернов, 2021] в расчетах принято, что большие оси эллипсов ориентированы горизонтально, а в поперечном направлении площадки наклонены под углом $\gg 60^\circ$ к горизонтальной поверхности. При этом азимутальная ориентация очагов небольших землетрясений ($M < 6$) в пределах разрешенных для них зон ВОЗ, произвольная, а более крупные очаги ориентированы преимущественно в направлении соответствующих зон ВОЗ (линеаменты на рисунке 1).

Результаты и обсуждение

На рисунке 4 приведены фрагменты интегральных (кумулятивных) функций вероятностей не превышения интенсивностями сотрясений различных уровней за время экспозиции 50 лет ($P_{50}[I_{cp} \leq i]$), рассчитанные для разных исследуемых участков и для разных версий моделей зон ВОЗ и повторяемости землетрясений (модели ОСР, ДСР-1 и ДСР-2).

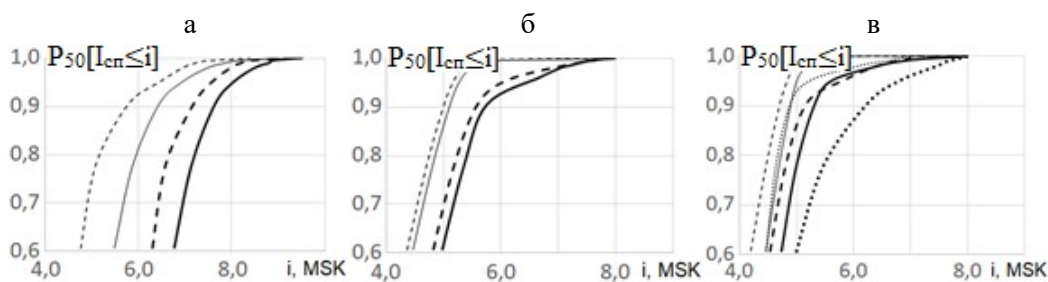


Рис. 4. Фрагменты графиков функций распределения вероятностей ($P_{50}[I_{cn} \leq i]$), рассчитанных для «мягких» (толстые линии) и «твердых» (тонкие линии) грунтов на участках: а – г. Владикавказ (сплошные линии) и г. Моздок (пунктир); б и в – г. Ставрополь и ст. Кавказская, соответственно, где сплошная, пунктир и точечная линии – для моделей ОСР, ДСР-1 и ДСР-2, соответственно / Fig. 4. Fragments of graphs of probability distribution functions ($P_{50}[I_{sp} \leq i]$) calculated for “soft” (thick lines) and “hard” (thin lines) soils in the sections: “a” – Vladikavkaz (solid lines) and Mozdok (stipple line); “b” and “c” – Stavropol and the Caucasian vill., accordingly, where the solid, stipple line and dotted line are for the GSZ, DSZ-1 and DSZ-2 models, respectively.

Прим.: а-а; б-б; в-в.

На рисунке 5 приведены результаты выполненных для рассматриваемых участков оценок разностей между интегральными (кумулятивными) интенсивностями сотрясений «мягких» и «твердых» грунтов (ΔI_{cn}) или, как еще говорят «приращений балльности» «мягких» грунтов по сравнению с «твердыми» при землетрясениях с разными средними периодами повторяемости. Данные рисунка показывают значительную вариабельность значений ΔI_{cn} для всех рассматриваемых участков. При этом в пределах каждого из участков есть свой разброс оценок ΔI_{cn} в зависимости от заложенных в расчеты моделей зон ВОЗ и повторяемостей землетрясений и величины t . Характер этих зависимостей на разных участках также различный. Так, например, значения ΔI_{cn} на участках в районах гг. Владикавказ и Моздок уменьшаются по мере увеличения среднего периода повторяемости землетрясений, а на участке г. Ставрополя и ст. Кавказская для моделей ОСР и ДСР-1, наоборот, увеличиваются. Для моделей ДСР-2 на том же участке ст. Кавказская, характер изменения ΔI_{cn} еще более сложный – сначала при возрастании t от 100 до 1000 лет наблюдается рост величины ΔI_{cn} , затем до значений $t \approx 5000$ лет, наоборот спад, после чего значения ΔI_{cn} стабилизируются. Амплитуда колебаний ΔI_{cn} для разных участков также может меняться – от $\sim 0,5$ баллов MSK для г. Владикавказа, до $\sim 1,8$ баллов MSK для г. Ставрополя. В целом по всем участкам и по всем расчетным моделям в диапазоне $t = 100-10000$ лет оценки ΔI_{cn} варьируют в пределах 0,28–2,13 балла MSK. Для диапазона, который отражен на отечественных картах ОСР $t = 500-5000$ лет оценки ΔI_{cn} меняются от 0,43 до 1,96 балла MSK.

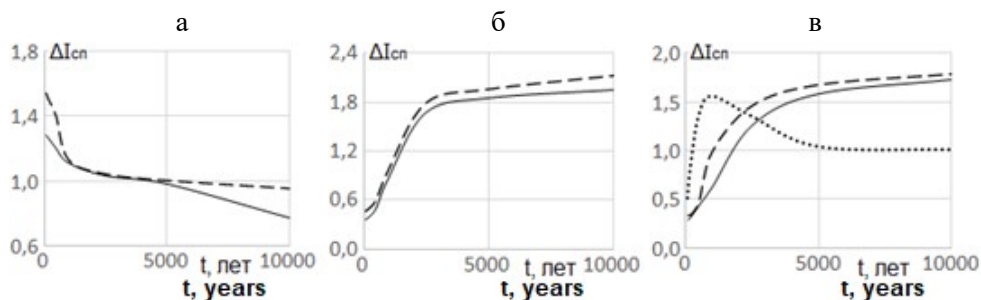


Рис. 5. Разности между интегральными (кумулятивными) интенсивностями сотрясений «мягких» и «твердых» грунтов (ΔI_{cn}), для землетрясений с разными t в районах: а – г. Владикавказ

(сплошная линия) и Моздок (пунктир); б и в – г. Ставрополь и ст. Кавказская, соответственно, где сплошные, пунктирные и точечные линии – оценки для моделей ОСР, ДСР-1 и ДСР-2; ΔI_{cn} в баллах MSK /

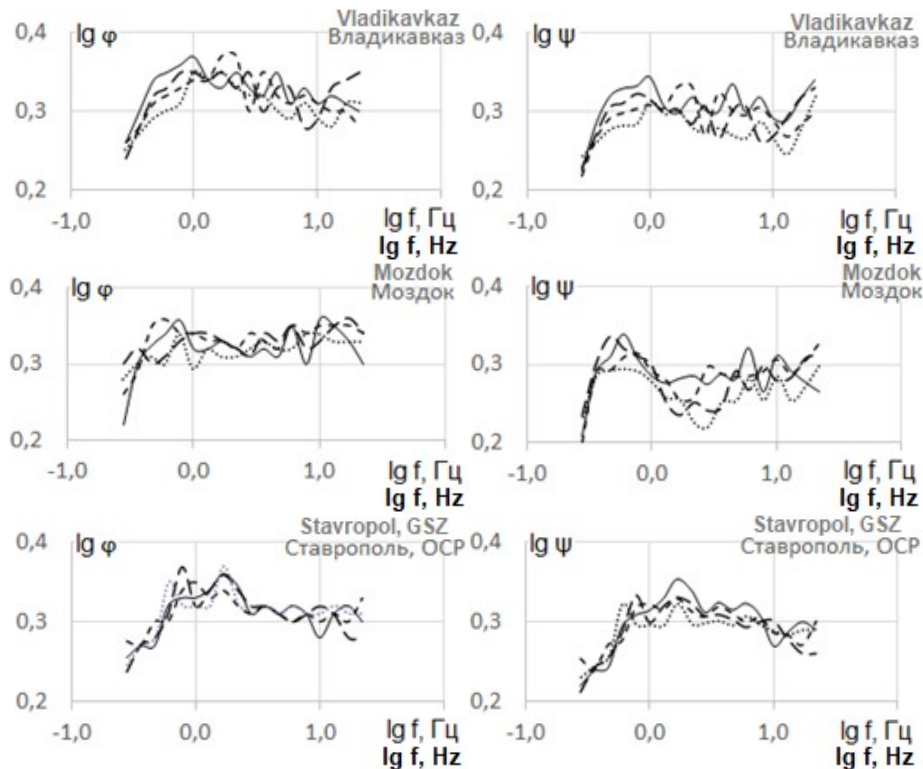
Fig. 5. Differences between the integral (cumulative) intensities of “soft” and “hard” soils (ΔI_{sp}), for earthquakes with different t in the areas: “a” – Vladikavkaz (solid line) and Mozdok (stipple line); “b” and “c” – Stavropol and Kavkazskaya vill., accordingly, where solid, stipple line and dotted line – estimates for the GSZ, DSZ-1 and DSZ-2; ΔI_{sp} models in MSK’s score.

Прим.: а–а; б–б; в–в.

На рисунке 6 показаны полученные для разных участков, моделей и t оценки $\varphi(f)$ и $\psi(f)$, рассчитанные по интегральным спектрам Фурье и спектрам реакции «мягких» и «твердых» грунтов.

Из рисунка видно, что так же, как и приращения балльности спектральные отношения, хотя и в несколько меньшей степени, но все же значительно (до 60%), флуктуируют в зависимости от пространственно-энергетических и временных параметров окружающего рассматриваемый участок сейсмогенерирующего пространства. О величине этих флуктуаций удобнее судить по рисунку 7, где $\varphi(f)$ и $\psi(f)$ обобщены в виде отдельных значений на 18-ти фиксированных частотах, без деления на участки, модели и средние периоды повторяемости.

Таким образом, результаты настоящих исследований, проведенных уже по отношению к разным территориям, с разной сеймотектонической обстановкой и сейсмическим режимом, подтверждают полученные нами ранее данные о том, что «сейсмические свойства» одного и того же типа грунта, т.е. его характеристики, влияющие на уровень сейсмической опасности в данной точке, не являются неким его постоянным качеством, а меняются от места к месту. Изменения эти связаны с изменяющимися по отношению к расчетной точке «очаговыми» факторами – расположением зон ВОЗ, сейсмическим режимом, глубинами и ориентацией очагов и др.



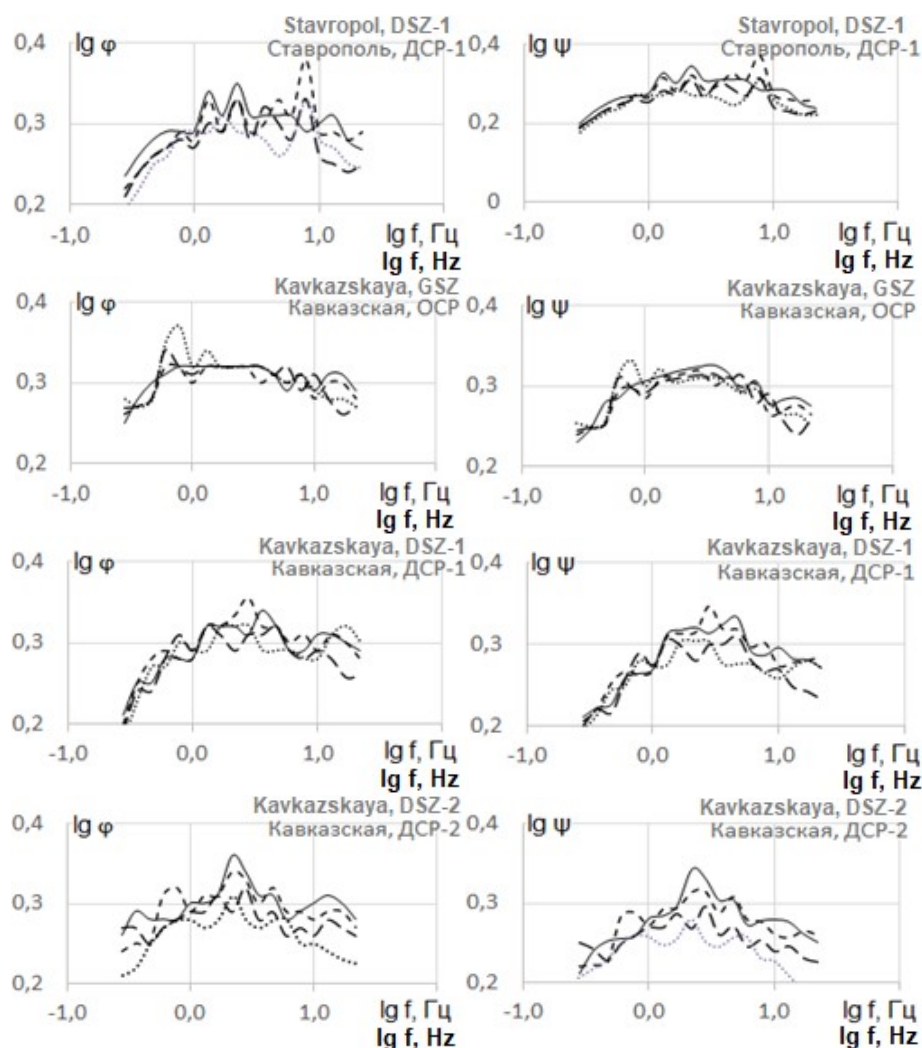


Рис. 6. Интегральные спектральные характеристики $\varphi(f)$ и $\psi(f)$, где сплошная, короткий пунктир, длинный пунктир и точечная линии – оценки для $t=500, 1000, 2500$ и 5000 лет, соответственно /
 Fig. 6. Integral spectral characteristics $\varphi(f)$ and $\psi(f)$, where solid, short stipple line, long stipple line and dotted line are estimates for $t=500, 1000, 2500$ and 5000 years, accordingly.

В принципе, вышеописанные опыты, моделируют ситуации, возникающие при ОСР, ДСР или СМР, в том смысле, что оценки опасности производятся в местах с совершенно разными сочетаниями «очаговых» факторов, которые для каждой точки, вообще говоря, являются уникальными. Поэтому, проецируя вышеописанные результаты на обычную отечественную практику количественных оценок сейсмической опасности, можно заключить, что, разделяя единую цепочку природных факторов, формирующих интегральную картину сейсмических воздействий, наблюдаемых на поверхности на «очаговую» и «грунтовую» составляющие, мы рискуем получить искажения реальности. И искажения эти могут быть весьма значительными. Так, как показывает, например рисунок 5, размах флуктуаций величин $\Delta I_{\text{сп}}$ может превышать 2 балла MSK, в то время, как нормативы (и вообще, имеющийся в данной области консенсус) предполагают, что при переходе от грунтов I категории СНиП по сейсмическим свойствам к грунтам II категории, изменение интенсивности сотрясений составляет $\Delta I=1$ балл MSK. Т.е. ошибка определения величины более чем в два раза может превосходить саму величину. Ситуация может

усугубляться еще и тем, что увеличение ошибки в определении ΔI может возрастать при увеличении значений t (см. рисунок 5). Так, например, увеличение средних периодов повторяемости землетрясений требуется при расчете сейсмических воздействий для ответственных и особо ответственных объектов. То есть там, где требуется повышенная точность оценок она, наоборот, может снижаться.

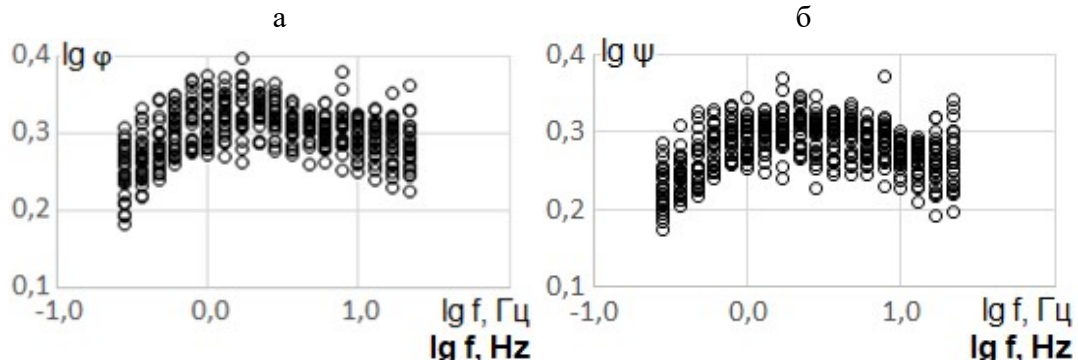


Рис. 7. Отношения $|S|_{\text{мяг}}/|S|_{\text{ме}}$ (а) и $SA_{\text{мяг}}/SA_{\text{ме}}$ (б) на разных частотах (f).
Обобщение данных, полученных для разных участков, моделей локальной сейсмичности и величины t /

Fig. 7. The relations of $|S|_{\text{soft}}/|S|_{\text{hard}}$ ("a") and $SA_{\text{soft}}/SA_{\text{hard}}$ ("b") at different frequencies (f).
Generalization of data received for different sites, models of local seismicity and parameter t
Прим.: а–а; б–б.

Здесь следует сразу сказать, что хотя полученные в настоящем исследовании результаты и базируются на расширенном экспериментальном материале (что повышает их надежность и реалистичность), они не являются окончательными. Учитывая важность рассматриваемых вопросов и, в особенности, практическую сложность их возможных решений, здесь еще требуются дополнительные проработки. Так, например, в наших предыдущих работах (см., например, [Чернов и др., 2022]) указывалось, что используемые в расчетах модели СДГ являются предварительными и их параметры по мере уточнения могут корректироваться. Насколько эти возможные корректировки могут отражаться на конечных вероятностных оценках предстоит еще выяснить.

Тем не менее уже сейчас накапливаются аргументы, говорящие о необходимости обратить на данную проблему больше внимания и одновременно подумать о возможных ее решениях.

Одно из таких решений – переход от старого, основанного на «двухступенчатых» расчетных схемах подхода к новому, «одноступенчатому», подобному тому который применен в настоящей работе. С точки зрения самого подхода – здесь все понятно и больших вопросов нет. Вопросы есть в том, как его вмонтировать в уже сложившуюся и вполне адекватную, с точки зрения наличия в ней трех уровней – ОСР, ДСР и СМР, систему. Представляется, что наиболее просто это можно было бы реализовать на уровне ОСР и ДСР, введя (сходно с тем, как это сделано в настоящем исследовании) в расчеты вместо одной модели СДГ для «среднего» грунта, например четыре «среднестатистических» модели для грунтов, соответствующих I, II, III и IV категории СНиП по «сейсмическим» свойствам. В итоге будут получены не три карты ОСР или ДСР для вероятностей не превышения $P_{50}[X \leq x] = 0,90, 0,95$ и $0,99$, а двенадцать карт (по четыре для каждого уровня вероятности), более

корректно учитывающие «грунтовый» фактор. Такое усложнение работы при ОСР или ДСР пока не кажется слишком большой ценой за ожидаемое приближение новых оценок к реальности. Уточняющие же функции ДСР, по-прежнему могут реализовываться за счет более точного и подробного, чем при ОСР, учета «очаговых» факторов. При ДСР можно было бы также получить дополнительное уточнение оценок, разработав уже не «среднестатистические», а «региональные» модели СДГ для каждого из четырех вышеуказанных типов грунта. Но это уже более сложная задача, которая, пока, по-видимому, может решаться в индивидуальном порядке.

В еще большей степени задача перехода на «одноступенчатую» схему вероятностных расчетов усложняется для СМР, где главным ресурсом для уточнения оценок опасности является учет именно разнообразных реакций местных грунтов. Создание моделей, в достаточной степени отражающих это многообразие обычными статистическими методами представляется проблематичным. Возможно, решения найдутся на основе методов численного моделирования, например создавая (и затем объединяя) большие количества (сотни, тысячи или более) вариантов оценок реакции данного грунтового комплекса при разных фиксированных условиях для входного сейсмического сигнала (углы и направление подхода, спектр и др.), которые, в свою очередь, будут определяться наличествующими в данном месте «очаговыми» факторами.

Выводы

1. Оценки PSHA, выполненные для участков с разными сейсмогеологическими условиями, показывают, что во всех случаях в соотношениях между параметрами колебаний «мягких» и «твердых» грунтов наблюдается значительная вариабельность, что, по-видимому свидетельствует о том, что вариабельность оценок такого рода является их общим свойством, и, поэтому, ее учет может повысить качество прогнозных оценок в целом.

2. Одним из путей вышеозначенного повышения качества вероятностных оценок сейсмической опасности могла бы быть замена преобладающей в российской практике «двухступенчатой» схемы расчетов новой «одноступенчатой». С наименьшими издержками и одновременно с наибольшими положительными эффектами такая замена, в реальных условиях могла бы начаться с оценок уровня ОСР.

3. Учитывая сложность и многогранность поднимаемых в статье вопросов, приведенные в ней результаты и соображения не являются прямой рекомендацией к использованию, а носят текущий информативный характер. В более завершенном виде такие рекомендации могут появиться позднее, после проведения дальнейших исследований, в процессе которых могут появиться существенные дополнения и уточнения.

Литература

1. Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. Том VI. Проблемы сейсмической опасности Дальневосточного региона. Южно-Сахалинск. 1997. – 340 с.
2. Заалишвили В.Б. Сейсмическое микрорайонирование территорий городов, населенных пунктов и больших строительных площадок. М. Наука. – 2009. – 349 с.
3. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Габараев А.Ф., Мерзликин Т.И. Нелинейные колебания грунтовой толщи по инструментальным и численным данным. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. № 4. – С. 70-82. DOI: 10.46698/VNC.2021.77.59.006.

4. 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.
5. 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 среды на сейсмический эффект сильных землетрясений. // *Вопросы инженерной сейсмологии*. – 2018. – Т. 46. №4. – С. 47–68.
6. Касымов С.М. Инженерно-геологическая основа детального сейсмического районирования и микрорайонирования. Изд-во «Фан» УзССР. Ташкент. – 1979. – 224с.
7. Куруоглы М., Эскисар Т. Влияние локальных грунтовых условий на динамический грунтовый отклик на южном побережье залива Измир, Турция. // *Геология и геофизика*. – 2015. – Т. 56. № 8. – С. 1530–1544.
8. Медведев С.В. Инженерная сейсмология. – М.: Госстройиздат. 1962. – 284 с.
9. Мельков Д.А., Габараев А.Ф., Фидарова М.И., Мерзликин Т.И., Персаева З.В. Влияние нелинейных свойств. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2022. – Т. 12. № 4. – С. 72-84. DOI: 10.46698/VNC.2022.75.68.006.
10. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации. Пояснительная записка к комплекту карт ОСР-2016 и список населенных пунктов, расположенных в сейсмоактивных зонах. // *Инженерные изыскания*. – 2016. – №7. – С.40–121.
11. Оценка сейсмической опасности и сейсмического риска. Пособие для должностных лиц. РАН. Объединенный институт физики Земли. 1997. – Москва. – 54с.
12. Сейсмическое микрорайонирование. / Под ред. С.В. Медведева. М.: Наука. 1977. – 248 с.
13. 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.
14. Составление карты детального сейсмического районирования Ставропольского края. – 1–6. – М.: Изд-во ИФЗ РАН, 1999.
15. Трифонов Б.А., Севостьянов В.В., Милановский С.Ю., Несынов В.В. Оценка сейсмических свойств водонасыщенных дисперсных грунтов при решении задач сейсмического микрорайонирования. // *Геоэкология*. – 2019. – №5. – С. 74–81.
16. Уломов В.И. Актуализация нормативного сейсмического районирования в составе единой информационной системы «Сейсmobезопасность России». // *Вопросы инженерной сейсмологии*. – 2012. – Т. 39. № 1. – С. 5–38.
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., Заалишвили В.Б., Чернов А.Ю. Некоторые новые данные о влиянии грунтовых условий на вероятностные оценки сейсмической опасности территорий. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2022. – Т. 12. № 4. – С. 85–100 DOI:10.46698/VNC.2022.32.20.007.
19. Штейнберг В.В., Сакс М.В., Аптикаев Ф.Ф. и др. Методы оценки сейсмических воздействий (пособие). // *Вопросы инженерной сейсмологии*. Вып. 34. М.: Наука. – 1993. С. 5–94.
20. Akkar S, Sandikkaya MA, 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. No. 1. – pp. 359–387. DOI:10.1007/s10518-013-9461-4.
21. Bozorgnia Y., Abrahamson N, Al Atik L, et. al. NGA-West2 Research Project. // *Earthquake Spectra*: August 2014. – Vol. 30. No. 3. – 2014. – pp. 973-987.
22. Caprio M., Tarigan B., Worden C.B., Wiemer S., Wald D.J. Ground motion to intensity conversion equations (GMICEs): A global relationship and evaluation of regional dependency. // *Bull. Seismol. Soc. Am.* – 2015. – Vol. 105. – pp. 1476–1490.

23. Cotton F., Scherbaum F., Bommer J.J., Bungum H. Criteria for selecting and adjusting ground-motion models for specific target regions: application to central Europe and rock sites. // *Journal of Seismology*. –2006. – V. 10. – pp. 137–156.
24. Fäh D. et al. Coupled seismogenic geohazards in Alpine regions. // *Bollettino di geofisica teorica ed applicata*. – 2012. – Vol. 53. Issue 4.
25. Mahmood A., Feezan Ahmad, Jiandong Huang, Muhammad Junaid Iqbal, Muhammad Safdar, Nima Pirhadi. Probabilistic evaluation of CPT-based seismic soil liquefaction potential: towards the integration of interpretive structural modeling and bayesian belief network[J]. // *Mathematical Biosciences and Engineering*. – 2021. – Vol. 18. No. 6. – pp. 9233-9252. DOI: 10.3934/mbe.2021454.
26. The global seismic hazard assessment program (GSHAP) 1992-1999. // *Annali di Geofisica*. – 1999. – Vol. 42. N 6. – 1232 p.
27. Vakov A.V. Relationships between earthquake magnitude, source geometry and slip mechanism. // *Tectonophysics*. – 1996. V. 261. Issue 1–3. – pp. 97–113. DOI:10.1016/0040-1951(96)82672-2.
28. Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. // *Bull. Seim. Soc. Am.* – 1994. –Vol. 84. №4 – pp. 974-1002.
29. Zumpano V., Pisano L., Filice F., Ugenti A., de Lucia D., Wasowski J., Santaloia F., Lollino P. Regional-Scale Seismic Liquefaction Susceptibility Mapping via an Empirical Approach Validated by Site-Specific Analyses. // *Geosciences*. – 2022. Vol. 12. 215 p.

References

1. Geodynamics of the tectonosphere of the junction zone of the Pacific Ocean with Eurasia. Volume VI. Problems of seismic hazard in the Far Eastern region. Yuzhno-Sakhalinsk. 1997. 340 p. (in Russ.)
2. Zaalishvili V.B. Seismic microzoning of territories of cities, settlements and large construction sites. Moscow. Nauka. 2009. 349 p. (in Russ.)
3. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Gabaraev A.F., Merzlikini T.I. Nonlinear vibrations of the soil column according to instrumental and numerical data. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 4. pp. 70–82. DOI: 10.46698/VNC.2021.77.59.006. (in Russ.)
4. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Nikonova N.V., Smirnova L.N., Uzdin A.M. Characteristics of spatial inhomogeneity of the acceleration field of the day surface. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 1. pp. 75–88. DOI: 10.46698/VNC.2022.74.27.006. (in Russ.)
5. Zavyalov A.D., Peretokin S.A., Danilova T.I., Medvedeva N.S., Akatova K.N. General seismic zoning from GSZ-97 to GSZ-2016 maps and new generation maps in the parameters of physical characteristics of the environment for the seismic effect of strong earthquakes. *Questions of engineering seismology*. 2018. Vol. 46. No. 4. pp. 47–68. (in Russ.)
6. Kasymov S.M. Engineering-geological basis of detailed seismic zoning and microzoning. Publishing house. Fan. UzSSR. Tashkent. 1979. 224 p. (in Russ.)
7. Kuruogly M., Eskisar T. Influence of local soil conditions on dynamic ground response on the southern coast of Izmir Bay, Turkey. *Geology and Geophysics*. 2015. Vol. 56. No. 8. pp. 1530–1544. (in Russ.)
8. Medvedev S.V. Engineering seismology. Moscow. Gosstroyizdat. 1962. 284 p. (in Russ.)
9. Melkov D.A., Gabaraev A.F., Fidarova M.I., Merzlikin T.I., Persaeva Z.V. Influence of nonlinear properties. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 4. pp. 72–84 DOI: 10.46698/VNC.2022.75.68.006. (in Russ.)
10. General seismic zoning of the territory of the Russian Federation. Explanatory note to the set of maps OSR-2016 and a list of settlements located in seismically active zones. *Engineering surveys*. 2016. No. 7. pp. 40–121. (in Russ.)
11. Assessment of seismic hazard and seismic risk. Manual for public officials. Russian Academy of Sciences. United Institute of Physics of the Earth. Moscow. 54 p. (in Russ.)

12. Seismic microzoning. Edited by S.V. Medvedev. Moscow. Nauka. 1977. 248 p. (in Russ.)
13. Seismic zoning of the territory of the USSR. Methodological foundations and regional description of the map of 1978. Ed. V.I. Bune, G.P. Gorshkov. Moscow. Nauka. 1980. 307 p. (in Russ.)
14. Preparation of the map of detailed seismic zoning of the Stavropol Territory. 1–6. Moscow. Publishing House of the IFZ RAS. 1999. (in Russ.)
15. Trifonov B.A., Sevostyanov V.V., Milanovsky S.Yu., Nesynov V.V. Assessment of seismic properties of water-saturated dispersed soils in solving problems of seismic microzoning. *Geoecology*. 2019. No. 5. pp. 74–81. (in Russ.)
16. Ulomov V.I. Updating of normative seismic zoning as part of the united information system “Seismic safety of Russia”. *Questions of engineering seismology*. 2012. Vol. 39. No. 1. pp. 5–38. (in Russ.)
17. Chernov Yu.K. Experience of detailed probabilistic assessments of possible seismic impacts on the territory of the Russian Federation. *Geology and geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 2. pp. 87–102. DOI: 10.46698/VNC.2021.83.10.007. (in Russ.)
18. Chernov Yu.K., Zaalishvili V.B., Chernov A. Yu. Some new data on the influence of various soil conditions on probabilistic seismic hazard assessment of territories. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 4. pp. 85–100 DOI: 10.46698/VNC.2022.32.20.007. (in Russ.)
19. Steinberg V.V., Saks M.V., Aptikaev F.F., etc. *Methods of seismic impact assessment (manual)*. *Questions of engineering seismology*. Issue 34. Moscow. Nauka. 1993. pp. 5–94. (in Russ.)
20. Akkar S, Sandikkaya MA, 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. No. 1. pp. 359–387. DOI: 10.1007/s10518-013-9461-4.
21. Bozorgnia Y., Abrahamson N, Al Atik L, et. al. NGA-West2 Research Project. *Earthquake Spectra*: August 2014. Vol. 30. No. 3. pp. 973-987.
22. Caprio M., Tarigan B., Worden C.B., Wiemer S., Wald D.J. Ground motion to intensity conversion equations (GMICEs): A global relationship and evaluation of regional dependency. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2015. Vol. 105. pp. 1476–1490.
23. Cotton F., Scherbaum F., Bommer J.J., Bungum H. Criteria for selecting and adjusting ground-motion models for specific target regions: application to central Europe and rock sites. *Journal of Seismology*. 2006. Vol. 10. pp. 137–156.
24. Fäh D. et al. Coupled seismogenic geohazards in Alpine regions. *Bollettino di geofisica teorica ed applicata*. 2012. Vol. 53. Issue 4.
25. Mahmood A., Feezan Ahmad, Jiandong Huang, Muhammad Junaid Iqbal, Muhammad Safdar, Nima Pirhadi. Probabilistic evaluation of CPT-based seismic soil liquefaction potential: towards the integration of interpretive structural modeling and bayesian belief network[J]. *Mathematical Biosciences and Engineering*. 2021. Vol. 18. No. 6. pp. 9233–9252. DOI: 10.3934/mbe.2021454.
26. The global seismic hazard assessment program (GSHAP) 1992-1999. *Annali di Geofisica*. 1999. Vol. 42. No 6. 1232 p.
27. Vakov A.V. Relationships between earthquake magnitude, source geometry and slip mechanism. *Tectonophysics*. 1996. Vol. 261. Issue 1–3. pp. 97-113. DOI: 10.1016/0040-1951(96)82672-2.
28. Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull. Seim. Soc. Am.* 1994. Vol. 84. No 4. pp. 974–1002.
29. Zumpano V., Pisano L., Filice F., Ugenti A., de Lucia D., Wasowski J., Santaloia F., Lollino P. Regional-Scale Seismic Liquefaction Susceptibility Mapping via an Empirical Approach Validated by Site-Specific Analyses. *Geosciences*. 2022. Vol. 12. 215 p.