

УДК 550.34

DOI: 10.46698/VNC.2024.27.90.004

Оригинальная статья

Геоэкологические аспекты формирования интенсивности землетрясения на основе инструментальных данных

В.Б. Заалишвили , Д.А. Мельков , М.И. Фидарова , Г.В. Шманатов 

Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, Россия, 362002,
г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: vzaal@mail.ru

Статья поступила: 24.05.2024, доработана: 10.06.2024, принята к публикации: 10.06.2024

Резюме: Актуальность работы. Факторами, определяющими интегральный геоэкологический риск территорий, являются его основные составляющие: природные – геолого-тектонические, искусственно-техногенные, экологические, социально-экономические и административные, состояние которых определяет потенциал ущерба и его проявленную величину. Сейсмическая интенсивность является наиболее точной характеристикой сейсмических воздействий, поскольку она напрямую связана с повреждаемостью объектов. При этом на практике осуществляется округление данных полученных различными способами до десятичных знаков, без оценки точности и статистической (вероятностной) обеспеченности получаемых результатов. Это предполагает необходимость разработки методологии использования при оценках сейсмической опасности дробных значений интенсивности в баллах. **Методы.** Современные цифровые геоинформационные технологии позволяют производить системную оценку состояния каждого фактора риска на основе алгоритмов машинного обучения. В работе использован метод опорных векторов (support vector regression) и процедура кросс-валидации. В рамках разрабатываемой геоинформационно-вычислительной системы выполнена системная интеграция блоков регионального моделирования сейсмических воздействий на основе зон ВОЗ и реакции отдельных участков на данные воздействия. При этом моделировались ансамбли акселерограмм с варьированием характеристик разломов, и выполнялась статистическая обработка результатов с представлением пространственных данных в ГИС-технологиях, формирующих геоэкологический риск территории. **Результаты.** Разработана оригинальная методика оценки состояния грунтовой толщи по критерию дисперсии и на ее основе введены поправки в распределение зон по сейсмическим свойствам, подтверждающиеся инструментальными данными (наличие просадочных грунтов) и обуславливающие различный геоэкологический риск.

Ключевые слова: макросейсмическая интенсивность, инструментальные записи, база данных сильных движений, сейсмическая шкала, машинное обучение.

Для цитирования: Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Фидарова М.И., Шманатов Г.В. Геоэкологические аспекты формирования интенсивности землетрясения на основе инструментальных данных. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(2): 45-60. DOI: 10.46698/VNC.2024.27.90.004

DOI: 10.46698/VNC.2024.27.90.004

Original paper

Geoecological aspects of earthquake intensity formation based on instrumental data

V.B. Zaalishvili , D.A. Melkov , M.I. Fidarova , G.V. Shmanatov 

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

Received: 24.05.2024, revised: 10.06.2024, accepted: 10.06.2024

Abstract: Relevance. The factors that determine the integral geo-ecological risk of territories are its main components: natural-geological-tectonic, artificial-technogenic, environmental, socio-economic and administrative. Their state of which determines the potential for damage and its manifested rate. Seismic intensity is the most accurate characteristic of seismic impacts, since it is directly related to the damageability of objects. At the same time, in practice, data obtained in various ways is rounded to decimal places, without assessing the accuracy and statistical (probabilistic) reliability of the results obtained. This suggests the need to develop a methodology for using fractional intensity values in points when assessing seismic hazard. **Methods.** Modern digital geographic information technologies allow for a system assessment of the state of each risk factor based on machine learning algorithms. The work used the support vector regression method and the cross-validation procedure. Within the framework of the developed geographic information and computing system, system integration of blocks of regional modeling of seismic effects based on possible seismic sources zones and the response of individual areas to these impacts was carried out. At the same time, ensembles of accelerograms with varying fault characteristics were modeled, and statistical processing of the results was performed with the presentation of spatial data in GIS technologies that form the geoecological risk of the territory. **Results.** An original method for assessing the state of the soil stratum using the dispersion criterion has been developed and, on its basis, amendments have been introduced to the distribution of zones by seismic properties, confirmed by instrumental data (presence of subsidence soils) and causing various geo-ecological risks.

Keywords: macroseismic intensity, instrumental records, strong motion database, seismic scale, machine learning.

For citation: Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Fidarova M.I., Shmanatov G.V. Geoecological aspects of earthquake intensity formation based on instrumental data. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(2): 45-60. DOI: 10.46698/VNC.2024.27.90.004

Введение

В горных районах, большей частью характеризующихся высокой сейсмической опасностью, находится значительное количество промышленных и гражданских зданий, гидротехнических сооружений и объектов транспортной инфраструктуры, создающих различные виды антропогенного воздействия на геологическую среду. Интенсификация урбанизации, образование крупных городов и городских агломераций, промышленного производства, а также рост населения связаны с интенсивным использованием ограниченных земельных, водных и минеральных ресурсов. Концепция анализа факторов сейсмического риска использует возможности гео-

информационных систем, комбинируя информационные слои с данными о пространственном распределении сейсмической опасности, о техногенной нагрузке и уязвимости застройки, а также о величинах, подверженных риску повреждения и позволяющие оценивать возможные потери [Yodgorov, 2018]. Для урбанизированных горных территорий проблема оценки и снижения сейсмического риска с целью разработки мер по управлению и снижению ущерба является актуальной.

Сейсмическая интенсивность является наиболее точной характеристикой сейсмических воздействий, поскольку она напрямую связана с повреждаемостью строительных объектов. В то же время, повреждаемость объектов определяется параметрами сейсмических воздействий. Таким образом, оценки сейсмической интенсивности тесно связаны с параметрами сейсмического движения грунта. Заметим, что действующая шкала ГОСТ Р 57546-2017 однозначно связывает баллы шкалы сейсмической интенсивности со степенями повреждений различных типов зданий и является первой регламентированной шкалой интервалов. При этом на практике осуществляется округление данных полученных различными способами до десятичных знаков, без оценки точности и статистической (вероятностной) обеспеченности получаемых результатов. В этой связи оценка интенсивности в целочисленных величинах, несомненно, характеризуется высокой погрешностью. Это предполагает необходимость разработки методологии использования при оценках сейсмической опасности дробных значений интенсивности в баллах.

Факторами, определяющими интегральный геоэкологический риск территорий, являются его основные составляющие: природные – геолого-тектонические, искусственно-техногенные, экологические, социально-экономические и административные, состояние которых определяет потенциал ущерба и его проявленную величину [Yodgorov, 2018; Чотчаев и др., 2021]. Каждый из этих факторов характеризуется особенностями текущего состояния и уровнем реализации. Современные цифровые геоинформационные технологии позволяют производить системную оценку состояния каждого фактора риска на основе алгоритмов машинного обучения. Основой такой оценки является, несомненно, адекватный выбор величин, определяющих сейсмическую опасность и зависящих от решаемой геоэкологической задачи. Так, для оценки геоэкологического риска целесообразно использовать макросейсмическую интенсивность в баллах, важно получить обоснованные формулы пересчета непрерывных физических величин, выражаемых через параметры инструментальных данных в интенсивность макросейсмической шкалы, которая в данном случае обоснованно будет являться непрерывной (однородной). Геоэкологические задачи могут отличаться от инженерных задач, и интегральная мера воздействия, выраженная в величине интенсивности, является более общей и более обоснованной для применения. В частности, установление сейсмической опасности в единицах пиковых ускорений не отражает, в целом, все особенности процесса, но является определенной величиной, для которой по инструментальным данным строятся региональные модели, а интенсивность, выраженная в баллах, отличается меньшей «разрешающей способностью» исходных данных, выраженной в целочисленных баллах. В этой связи разработка инструментально обоснованного подхода будет сочетать преимущества обеих мер сейсмических воздействий.

Методы

Использование сейсмических приборов позволяет по параметрам записи получить точечную оценку сейсмической интенсивности, и здесь возникает вопрос – насколько единичная оценка соответствует макросейсмической интенсивности данной зоны в целом. Для оценки любой величины требуется указать ее погрешность. При этом в зависимости от решаемой геоэкологической задачи может рассматриваться как среднее значение оценки, так и интервальные значения или определенные значения с заданной вероятностью неперевышения. Таким образом, требуется оценить тип и параметры распределения анализируемых случайных величин.

Каждая точечная оценка может рассматриваться для определенного радиуса, в зависимости от плотности таких оценок. Или могут использоваться диаграммы Вороного, определяющие наибольшую близость к данной точке [Okabe et al., 2000; Laurenzano et al., 2023]. При этом также необходимо учитывать, что границы между зонами различной интенсивности приурочены к границам инженерно-геологических элементов (ИГЭ). Поэтому неотъемлемой частью разрабатываемой геоинформационной системы должен являться слой инженерно-геологического районирования территории [Zhu et al., 2001; Ordaz-Hernández et al., 2012; Vilorio et al., 2016; Failache, Zuquette, 2018; Razmyar, Eslami, 2018; Li et al., 2023]. При этом, учитывая возможность применения дробных значений сейсмической интенсивности, каждый ИГЭ может быть дифференцирован по сейсмическому признаку без более общей классификации по категориям.

Возникающая при этом задача соответствия цифровой модели реальным свойствам объектов решается на основе математического моделирования и сопоставлении с инструментальными данными непосредственно на данных участках. Источником таких данных могут являться сейсмические станции.

Соединение двух данных характеристик сейсмического фактора – макросейсмической интенсивности по повреждениям зданий по проявлению непосредственно и инструментальной меры сейсмической интенсивности представляет основную задачу данной работы. Определение соотношения между ними позволит производить оценки рисков и более точно производить оценку приращения сейсмической интенсивности, поскольку одним из наиболее обоснованных методов является инструментальный метод СМР, например, формулы способа слабых землетрясений, мощных источников, способа сейсмических жесткостей, основанные на определении приращений интенсивности непосредственно по записям колебаний и инженерно-геологическим данным (скоростям сейсмических волн и плотностям). При этом предполагается, что увеличение амплитуды колебаний в два раза соответствует приращению интенсивности на один балл. Данное положение в последнее время подвергается серьезной критике [Аптикаев, 2021].

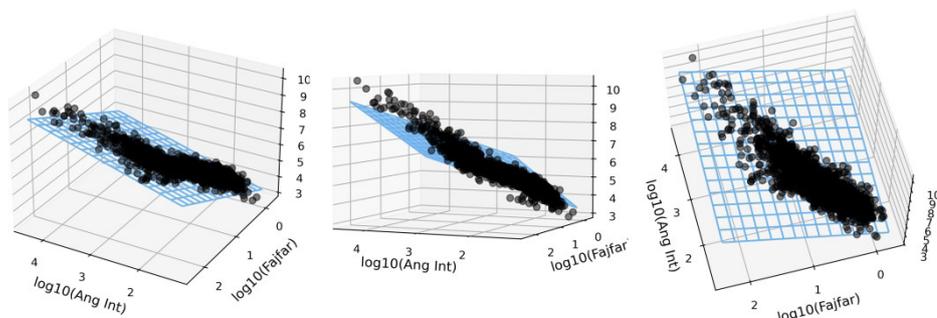
Очевидно, что не существует однозначного соответствия ускорений баллам сейсмической интенсивности. Поскольку, как это неоднократно отмечалось, на результирующую интенсивность влияют спектральный состав и продолжительность колебаний.

Для учета многофакторности процесса рассмотрены основные параметры сейсмических записей и различные инструментальные меры сейсмической интенсивности [Ang, 1990; Finn Liam et al., 1994; Fajfar, 1995; Shabestari, 2019; Masi et al., 2020], по сути, являющиеся их комбинациями [Фидарова и др., 2023]. Регрессионные модели строились методом опорных векторов на основе базы данных K-NET

(Япония) [National Research..., 2019; Заалишвили и др., 2013]. Расчеты выполнялись с использованием библиотеки sklearn. Было отобрано более 1000 записей, соответствующих интенсивности превышающей 6 баллов. Для оценки эффективности моделей с наиболее равномерным использованием имеющихся данных применялась процедура кроссвалидации (перекрестной проверки) [Hastie et al., 2009].

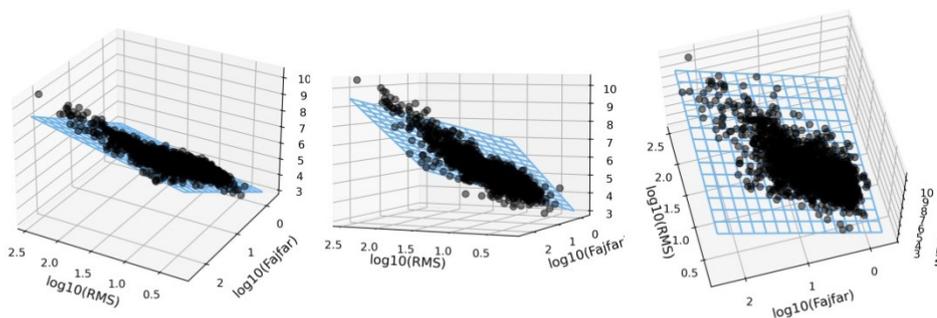
В модели с двумя параметрами лучший результат получен для комбинации меры Фаджфара и меры Анга, а также меры Фаджфара и среднеквадратического ускорения. Поскольку в меру Фаджфара входит пиковая скорость и продолжительность, по сути, это уточнение трехпараметрической модели, сочетающей в себе элементы меры Фаджфара и Анга (рис. 1). На рисунках приведены регрессионные выражения и соответствующие метрики: коэффициент детерминации R^2 и средние абсолютные отклонения MAE.

$$I = 0.82 \cdot \log_{10}(\text{Ang Int}) + 1.34 \cdot \log_{10}(\text{Fajfar}) + 2.60, R^2 = 0.89, MAE = 0.23$$



а)

$$I = 0.90 \cdot \log_{10}(\text{RMS}) + 1.72 \cdot \log_{10}(\text{Fajfar}) + 3.20, R^2 = 0.89, MAE = 0.23$$

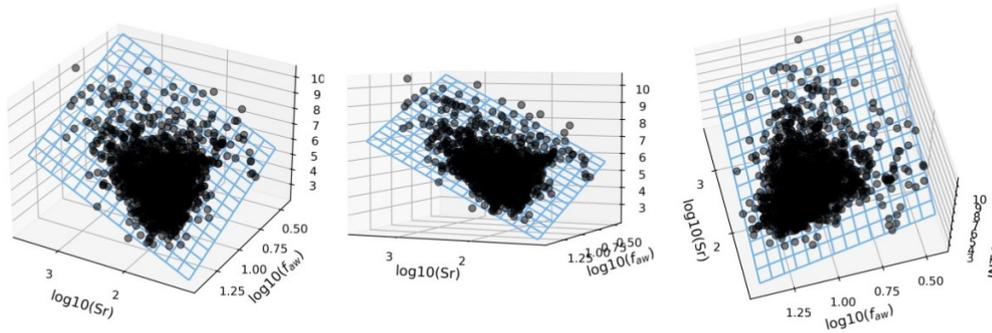


б)

Рис. 1. Регрессионные модели, основанные на мере Фаджфара-Анга /
Fig. 1. Regression models based on Fajfar-Ang measure

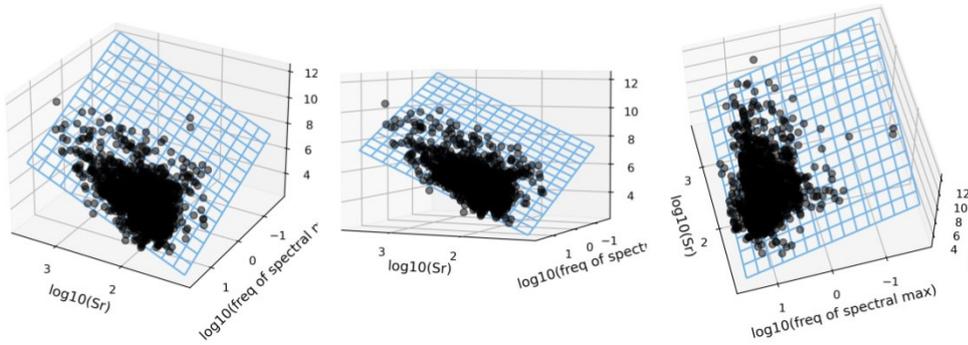
Для двух основных параметров лучший результат получен для площади спектра и средневзвешенной частоты ($R^2 = 0.88$, MAE = 0.23) – рис. 2а. Для сравнения комбинация площади реального спектра с частотой спектрального максимума дает хуже результат – рис. 2б.

$$I = 2.11 \cdot \log_{10}(Sr) - 3.54 \cdot \log_{10}(f_{aw}) + 4.68, \quad R^2 = 0.88, \quad MAE = 0.23$$



a)

$$I = 2.17 \cdot \log_{10}(Sr) - 1.58 \cdot \log_{10}(\text{freq of spectral max}) + 2.19, \quad R^2 = 0.77, \quad MAE = 0.31$$



б)

Рис. 2. Регрессионные модели, основанные на площади спектра /
Fig. 2. Regression models based on spectral area

Для сопоставления с соотношениями, приведенными в ШСИ-2017, рассмотрена также комбинация пикового горизонтального ускорения и пиковой скорости. Она также дает высокий коэффициент детерминации $R^2 = 0.85$ при $MAE = 0.27$ – рис. 3.

$$I = 0.59 \cdot \log_{10}(PHA) + 2.11 \cdot \log_{10}(PHV) + 3.41, \quad R^2 = 0.85, \quad MAE = 0.27$$

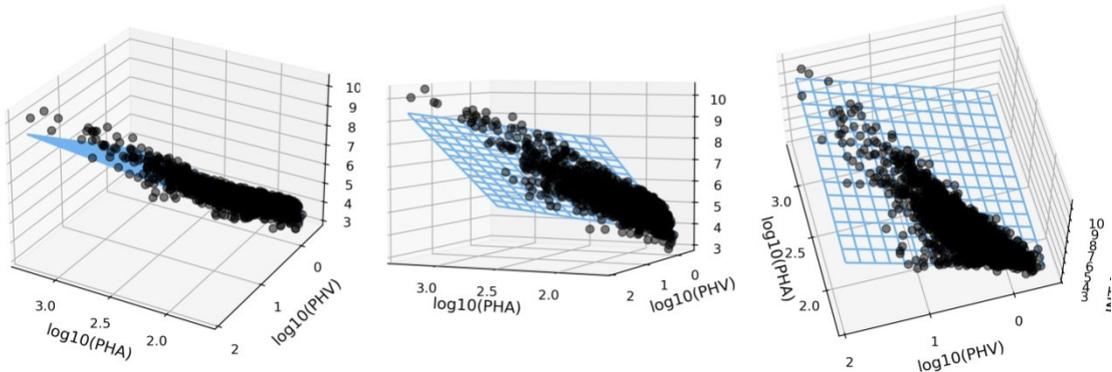


Рис. 3. Регрессионные модели, основанные на пиковой горизонтальной скорости (PHV) и пиковом горизонтальном ускорении (PHA) /

Fig. 3. Regression models based on peak horizontal velocity (PHV) and peak horizontal acceleration (PHA)

Для решения задачи исследования слоистости среды и параметров распределения на основе базы данных сейсморазведочных работ, проводимых ГФИ ВНИЦ РАН на территории г. Владикавказа, были построены сейсмические модели грунтовой толщи различных участков. В качестве входных данных использована симуляция сценарных землетрясений от различных зон ВОЗ территории на основе конечно-разломной модели (программа FINSIM). Моделирование акселерограмм каждого участка осуществлялось методом многократно отраженных волн.

Таким образом, в рамках разрабатываемой геоинформационно-вычислительной системы выполнена системная интеграция блоков регионального моделирования сейсмических воздействий на основе зон ВОЗ и реакции отдельных участков на данные воздействия. При этом моделировались ансамбли акселерограмм с варьированием характеристик разломов, и выполнялась статистическая обработка результатов с представлением пространственных данных в ГИС-технологиях.

В результате по критерию дисперсии введены поправки в распределение зон по сейсмическим свойствам, которые подтверждаются инструментальными данными (наличие просадочных грунтов). Рассчитаны поправки к значениям сейсмической интенсивности в форме доверительных интервалов.

Моделирование выполнялось на основе программы FINSIM [Beresnev, Atkinson, 1998] алгоритмов, разработанных в ГФИ ВНИЦ РАН, работа с пространственными данными осуществлялась в программах ARCGIS 9 и QGIS, обработка данных в программах MATLAB, Jupyter Notebook (библиотек Python scipy, numpy, sklearn). Используются данные базы данных «Владикавказ».

Результаты и обсуждение

Предложенные модели инструментальной меры сейсмической интенсивности должны обладать следующим важным свойством – быть применимы для расчета приращений сейсмической интенсивности. Полученные закономерности для сейсмической интенсивности, а также формулы, включенные в ШСИ-2017 [Аптикаев, Эртелева, 2016] и выражения, полученные для мощных источников (основанные на площади спектра, средневзвешенной частоте в сочетании с амплитудными параметрами) [Заалишвили, 1997] применены для тестового полигона – территории г. Владикавказа. При этом рассматривались как введенные ранее выражения, так и полученные в рамках данной работы новые регрессионные модели. Важно отметить, что в частности в формулах 6 и 9 в таблице 1 перед площадью спектра получен примерно одинаковый коэффициент равный двум, но в уточненной формуле 9 вводится поправка на средневзвешенную частоту.

Пример распределения приращений для наиболее характерных участков территории приведен на рис. 4 и в таблице 1. В целом, наблюдается закономерность увеличения разброса значений с ухудшением категории, но поскольку данный параметр связан также со слоистостью среды, в пределах одного и того же комплекса ИГЭ данный параметр будет различаться.

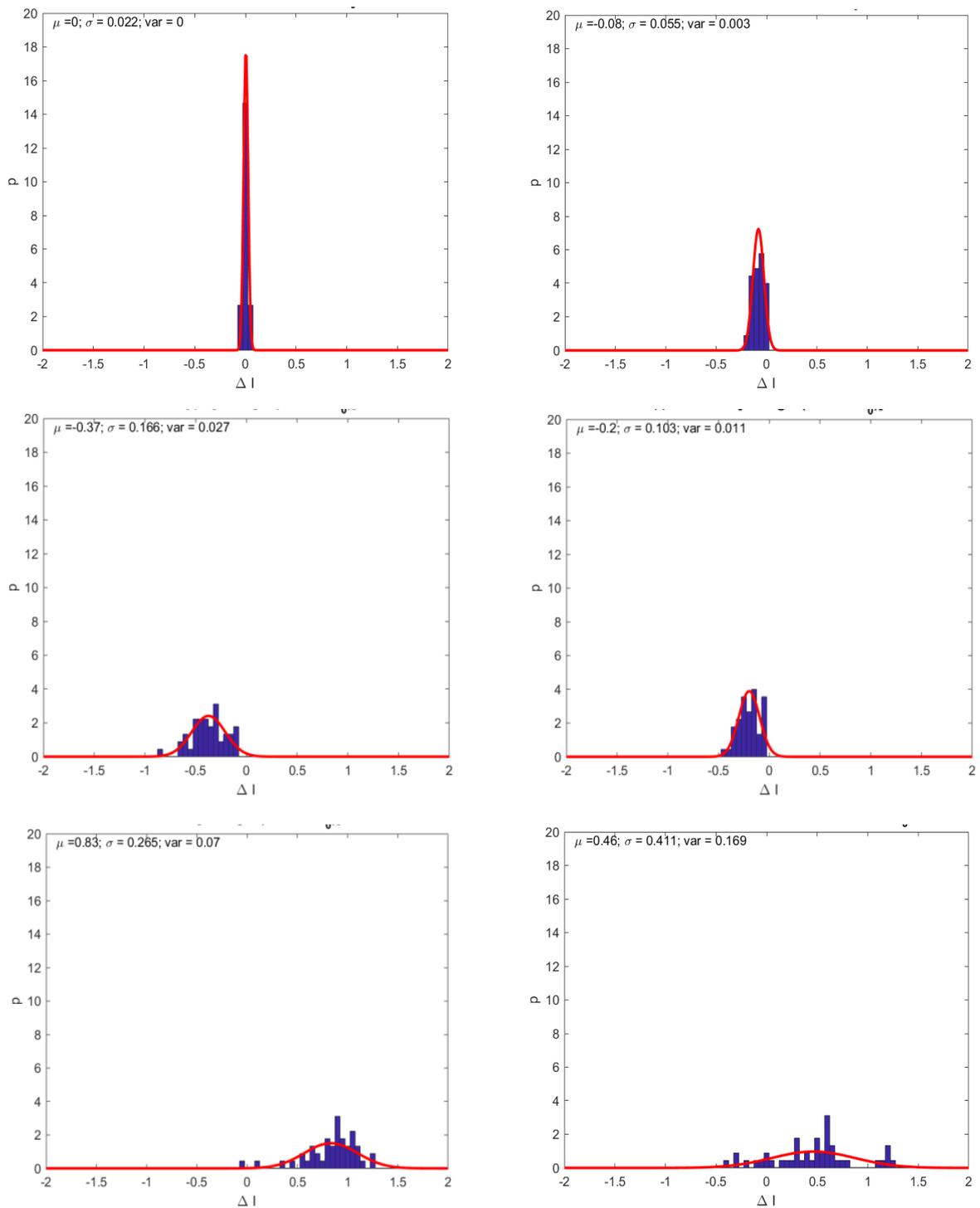


Рис. 4. Гистограммы распределения приращений сейсмической интенсивности для различных участков территории /

Fig. 4. Histograms of distribution of seismic intensity increments for different areas of the territory

Таблица 1 / Table 1

Расчет приращений сейсмической интенсивности ΔI (средние значения) и соответствующие среднеквадратические отклонения σ / Calculation of increments of seismic intensity ΔI (average values) and corresponding standard deviations σ

№ пп	Формула / Formula	Весна / Vesna		Дом печати / Dom pečati		Металлург / Metallurg		Тургеневская / Turgenevskaya		Дзусова / Dzusova		Кадырова Московское / Kadyrova Moskovskoe	
		ΔI	σ	ΔI	σ	ΔI	σ	ΔI	σ	ΔI	σ	ΔI	σ
1	$\Delta I = 3.3 \cdot \lg(\text{PHA}/\text{PHA}_0)$	0,47	0,29	-0,45	0,12	-0,91	0,19	0,06	0,06	-0,19	0,08	-0,50	0,54
2	$\Delta I = 3.3 \cdot \lg(\text{PHV}/\text{PHV}_0)$	0,83	0,26	-0,20	0,10	-0,37	0,17	0,00	0,02	-0,08	0,06	0,46	0,41
3	$\Delta I = 1.325 \cdot \lg(\text{PHV} \cdot \text{PHA} / (\text{PHV}_0 \cdot \text{PHA}_0))$	0,52	0,19	-0,26	0,06	-0,52	0,11	0,02	0,03	-0,11	0,04	-0,01	0,37
4	$\Delta I = 2.5 \cdot \lg(\text{PHA} / \text{PHA}_0) + 1.25 \cdot \log_{10}(\tau/\tau_0)$	0,38	0,21	-0,36	0,13	-0,72	0,15	0,04	0,08	-0,14	0,11	-0,20	0,30
5	$\Delta I = 3.0 \cdot \lg((\text{PHA} \cdot f_{aw}) / (\text{PHA}_0 \cdot f_{aw0}))$	0,11	0,25	-0,39	0,11	-1,06	0,17	0,14	0,06	-0,20	0,08	-0,92	0,41
6	$\Delta I = 2.0 \cdot \lg(\text{Sr}/\text{Sr}_0)$	0,21	0,06	-0,24	0,01	-0,57	0,03	0,06	0,01	-0,12	0,01	-0,47	0,13
7	$\Delta I = 0.82 \cdot \lg(\text{Ang}/\text{Ang}_0) + 1.34 \cdot \lg(\text{Fajfar}/\text{Fajfar}_0)$	0,65	0,33	-0,23	0,31	-0,51	0,53	-0,04	0,24	-0,28	0,44	0,13	0,47
8	$\Delta I = 0.90 \cdot \lg(\text{RMS}/\text{RMS}_0) + 1.72 \cdot \lg(\text{Fajfar}/\text{Fajfar}_0)$	0,66	0,27	-0,21	0,23	-0,46	0,39	-0,03	0,18	-0,23	0,32	0,19	0,41
9	$\Delta I = 2.11 \cdot \lg(\text{Sr}/\text{Sr}_0) - 3.54 \cdot \lg(f_{aw}/f_{aw0})$	0,60	0,10	-0,28	0,03	-0,33	0,06	-0,04	0,01	-0,09	0,01	0,06	0,26
10	$\Delta I = 0.59 \cdot \lg(\text{PHA}/\text{PHA}_0) + 2.11 \cdot \lg(\text{PHV}/\text{PHV}_0)$	0,62	0,20	-0,21	0,07	-0,40	0,12	0,01	0,02	-0,09	0,04	0,21	0,35

В связи с необходимостью оценки максимальных воздействий с определенной вероятностью непревышения, нами в методологию СМР в расчеты введен новый параметр «дисперсия разброса значений около среднего». Распределение среднеквадратических отклонений приращений сейсмической интенсивности по пиковым горизонтальным ускорениям и скоростям приведено на рис. 5. Как видно из таблицы 2, учет дисперсии в форме верхней границы доверительного интервала незначительно увеличивает приращение сейсмической интенсивности (порядка одной десятой балла), однако является важным критерием при районировании, позволяющим выделять наиболее опасные зоны (рис. 5) и в определенном сочетании с другими параметрами.

Таблица 2 / Table 2

Приращения сейсмической интенсивности для вероятностей непревышения 95% и 99% / Increments of seismic intensity for probabilities of non-exceedance of 95% and 99%

№ пп	Формула / Formula	Весна / Vesna		Дом печати / Dom pečati		Металлург / Metallurg		Тургеневская / Turgenevskaya		Дзусова / Dzusova		Кадырова Московское / Kadyrova Moskovskoe	
		95%	99%	95%	99%	95%	99%	95%	99%	95%	99%	95%	99%
1	$\Delta I = 3.3 \cdot \lg(\text{PHA}/\text{PHA}_0)$	0,54	0,58	-0,42	-0,41	-0,87	-0,85	0,07	0,08	-0,17	-0,16	-0,36	-0,30
2	$\Delta I = 3.3 \cdot \lg(\text{PHV}/\text{PHV}_0)$	0,90	0,93	-0,17	-0,16	-0,33	-0,31	0,01	0,01	-0,07	-0,06	0,57	0,61

3	$\Delta I = 1.325 \cdot \lg(\text{PHV} \cdot \text{PHA} / (\text{PHV}_0 \cdot \text{PHA}_0))$	0,57	0,59	-0,25	-0,24	-0,49	-0,48	0,03	0,03	-0,10	-0,09	0,08	0,12
4	$\Delta I = 2.5 \cdot \lg(\text{PHA} / \text{PHA}_0) + 1.25 \cdot \lg_{10}(\tau / \tau_0)$	0,43	0,46	-0,33	-0,31	-0,68	-0,66	0,06	0,07	-0,11	-0,10	-0,13	-0,09
5	$\Delta I = 3.0 \cdot \lg((\text{PHA} \cdot f_{\text{aw}}) / (\text{PHA}_0 \cdot f_{\text{aw}0}))$	0,17	0,20	-0,37	-0,35	-1,02	-1,00	0,15	0,16	-0,18	-0,17	-0,82	-0,78
6	$\Delta I = 2.0 \cdot \lg(\text{Sr} / \text{Sr}_0)$	0,23	0,23	-0,24	-0,23	-0,56	-0,56	0,06	0,06	-0,12	-0,12	-0,44	-0,42
7	$\Delta I = 0.82 \cdot \lg(\text{Ang} / \text{Ang}_0) + 1.34 \cdot \lg(\text{Fajfar} / \text{Fajfar}_0)$	0,74	0,77	-0,15	-0,12	-0,38	-0,32	0,02	0,05	-0,17	-0,13	0,25	0,30
8	$\Delta I = 0.90 \cdot \lg(\text{RMS} / \text{RMS}_0) + 1.72 \cdot \lg(\text{Fajfar} / \text{Fajfar}_0)$	0,73	0,76	-0,16	-0,13	-0,36	-0,32	0,02	0,04	-0,15	-0,11	0,29	0,34
9	$\Delta I = 2.11 \cdot \lg(\text{Sr} / \text{Sr}_0) - 3.54 \cdot \lg(f_{\text{aw}} / f_{\text{aw}0})$	0,62	0,63	-0,27	-0,27	-0,32	-0,31	-0,04	-0,04	-0,09	-0,08	0,13	0,16
10	$\Delta I = 0.59 \cdot \lg(\text{PHA} / \text{PHA}_0) + 2.11 \cdot \lg(\text{PHV} / \text{PHV}_0)$	0,67	0,69	-0,19	-0,18	-0,37	-0,36	0,02	0,02	-0,08	-0,07	0,29	0,33

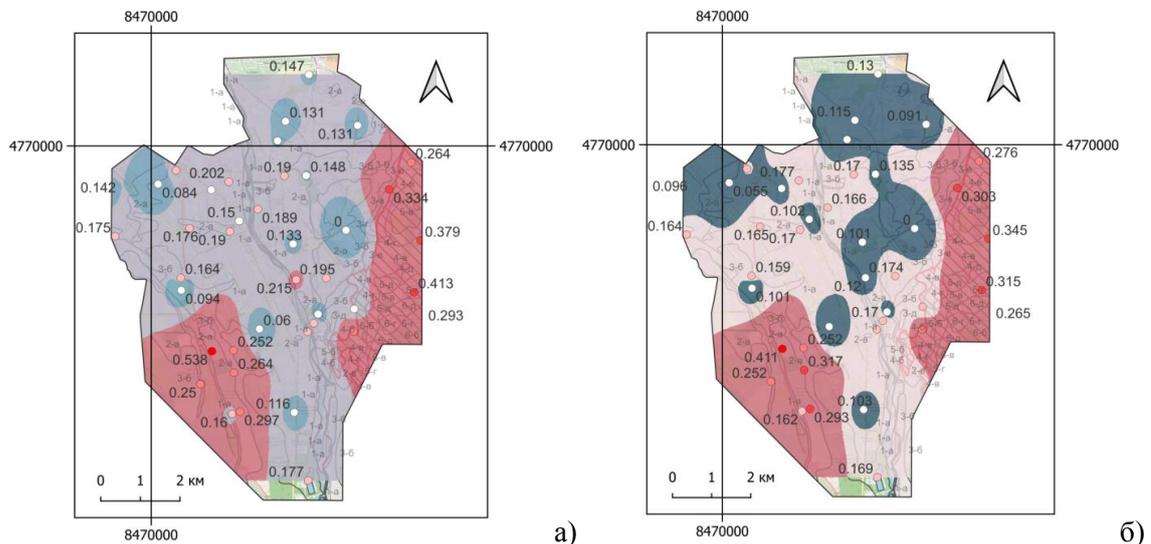


Рис. 5. Среднеквадратические отклонения приращений сейсмической интенсивности по пиковым горизонтальным ускорениям (а) и скоростям (б) /

Fig. 5. Standard deviations of seismic intensity increments based on peak horizontal accelerations (a) and velocities (b)

В результате выполнено районирование территории г. Владикавказа по комплексу критериев в рамках предложенных формул с учетом доверительных интервалов для вероятностей 5% и 1% непревышения указанных значений (таблица 2) и районирование в пределах каждой категории грунтов, исходя из уточненных данных сейсморазведки. Значительные изменения не отмечаются, учитывая округление результатов до десятых, однако в случае значений около 0,5 по максимальным ускорениям (участок «Весна») изменения могут меняться от 0,47 до 0,54 и обусловить округление приращения на один балл.

Для разбиения территории на подзоны использовалась диаграмма Вороного – деление на области, содержащие равноудаленные точки от данного участка, для которого выполнены работы по данным сейсморазведки. Процесс деления на зоны представлен на рис. 6: деление схемы инженерно-геологического районирования на

подобласти диаграммой Вороного (а) и дифференциация внутри каждой категории комплекса инженерно-геологических элементов (ИГЭ) (б). Если точка не попадает в категорию комплекса ИГЭ, то соответствующая зона на схеме не представлена, и в качестве подложки показана интерполяция данных между точками.

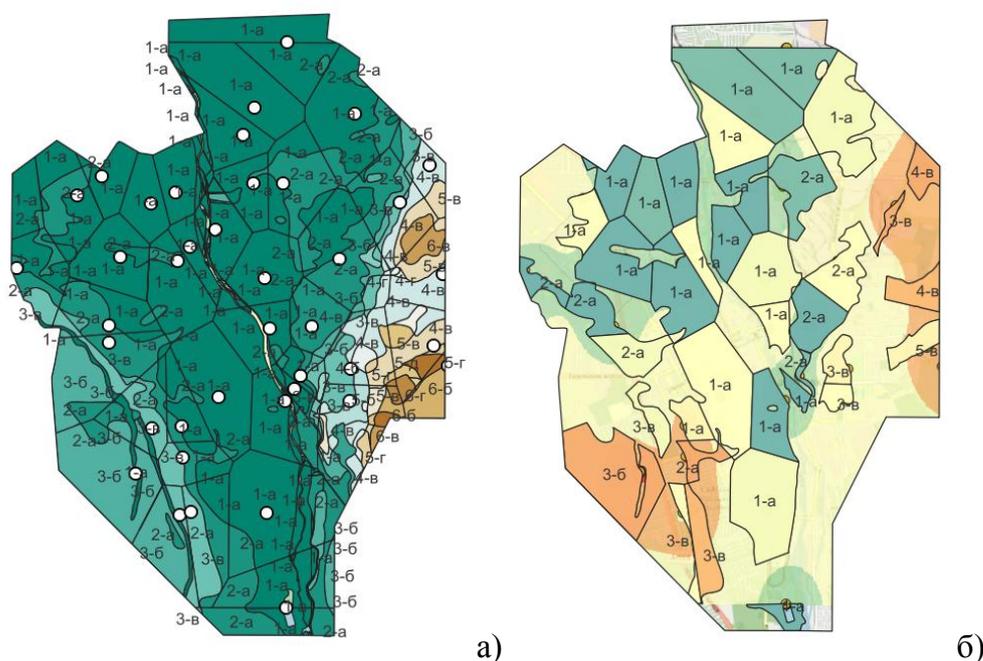


Рис. 6. Деление схемы инженерно-геологического районирования на подобласти диаграммой Вороного (а) и дифференциация внутри каждой категории комплекса ИГЭ (б) /

Fig. 6. Division of the engineering-geological zoning scheme into subregions using the Voronoi diagram (a) and differentiation within each category of the complex of engineering-geological elements (b)

По результатам выполненной оценки построена уточненная карта-схема СМР территории г. Владикавказа – рис. 7. Таким образом, на основе детальных исследований по критерию дисперсии разработана методика оценки состояния грунтовой толщи и на ее основе введены поправки в распределение зон по сейсмическим свойствам, подтверждающиеся инструментальными данными (наличие просадочных грунтов) и непосредственно обуславливающие распределение геоэкологической опасности, в свою очередь, формирующих различный геоэкологический риск.

Результаты проведенных геофизических исследований позволили ввести коррективы в границы распространения отдельных инженерно-геологических участков. Конкретно, на юго-западной части левобережья города по отдельным скважинам (скв. 438, 442, 474) в разрезе были зафиксированы непросадочные грунты (в интервале глубин 0,0–3,5 м), а ниже залегают просадочные суглинки (в интервале 3,5–7,0 м). По результатам геофизических исследований методом КМПВ (Участки «Гадиева 1» и «Гадиева 2») и микросейсм (спектральных H/V отношений) показатели по участкам 3б и 3в аналогичны (соизмеримы V_s , резонансные частоты при условии одинаковой мощности), что позволило отнести эти два участка, по наимудшим грунтовым условиям, к 9-балльной зоне сейсмичности. Таким же образом, на правом берегу р. Терек участки 3б, распространенные полосой западнее зоны залегания просадочных грунтов, были отнесены к 9-балльной зоне.

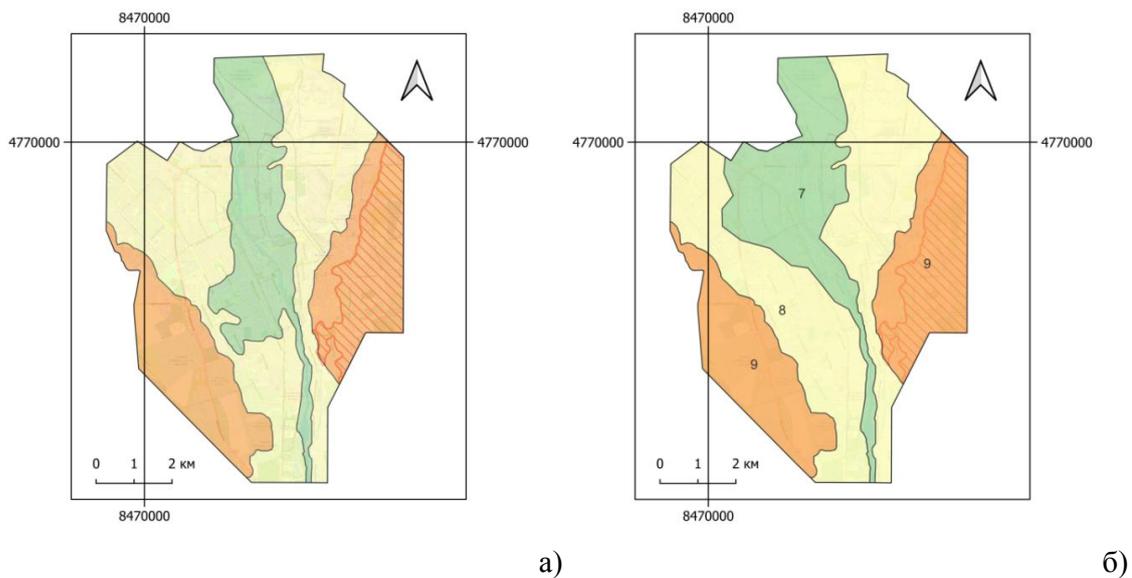


Рис. 7. Исходная (а) и уточненная (б) карты СМР территории г.Владикавказа /
Fig. 7. Initial (a) and updated (b) maps of seismic microzonation of the territory of Vladikavkaz

Выводы

1. В практику геоэкологических оценок состояния среды включены сейсмические методы инструментальных оценок состояния грунтовых условий. Массовое исследование и анализ, в частности, групповых записей микросейсмических колебаний или микросейсм позволяет выполнять геоэкологическое районирование территории по признакам параметров сейсмических колебаний, являющееся основой обнаружения и прогноза катастрофических природно-техногенных процессов. Способ регистрации слабых землетрясений не позволяет набрать статистически надежный набор данных в сжатые кратчайшие сроки. В работах Заалишвили и др., разработан способ дифференциации участков по признаку преобладающей частоты колебаний грунтовой толщи на исследуемой территории. Однако такое районирование предполагает привязку полученных частот к конкретным инженерно-геологическим условиям, для которых имеются данные полевых изысканий.

2. В российском действующем своде правил (СП), как и в зарубежных нормах (Eurocode 8 и др.), принята классификация грунтовых условий по средневзвешенной по мощности грунтовой толщи скорости поперечных волн в верхнем 30-метровом слое (V_{s30}). Однако при этом не учитывается влияние слоистости среды и, в особенности, контрастности слоев, приводящих к увеличению определенных частот колебаний. В силу различной ориентации плоскости разлома, первого подисточника и различного расстояния до моделируемых эпицентров зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ), приходящие сейсмические волны имеют различный спектральный состав и обуславливают значительную вариацию параметров колебаний и результирующей сейсмической интенсивности на поверхности грунтовой толщи. Параметром, описывающим данный эффект, является дисперсия, непосредственно характеризующая ширину распределения исследуемой величины или в случае конечной выборки величина среднеквадратического отклонения. Таким

образом, дисперсия (квадрат среднеквадратического отклонения) также является характеристикой геоэкологического состояния территории по инструментальным данным.

3. Для решения задачи исследования слоистости среды и установления параметров пространственного распределения на основе базы данных сейсморазведочных работ, проводимых ГФИ ВНИЦ РАН на территории г. Владикавказа, были построены сейсмические модели грунтовой толщи различных участков. В качестве входных данных использована симуляция сценарных землетрясений от различных зон ВОЗ территории на основе конечно-разломной модели (программа FINSIM). Моделирование акселерограмм каждого участка осуществлялось методом многократно отраженных волн (МОВ).

4. Наблюдается закономерность увеличения разброса значений с ухудшением геоэкологического состояния или сейсмической категории грунта, но поскольку данный параметр связан также со слоистостью среды, в пределах одного и того же комплекса ИГЭ данный параметр будет различаться.

5. В связи с необходимостью оценки максимальных воздействий с определенной вероятностью превышения, в методологию СМР введен новый параметр «дисперсия разброса значений около среднего».

6. В рамках разрабатываемой геоинформационно-вычислительной системы выполнена системная интеграция блоков регионального моделирования сейсмических воздействий на основе зон ВОЗ и реакции отдельных участков на данные воздействия. При этом моделировались ансамбли акселерограмм с варьированием характеристик разломов, и выполнялась статистическая обработка результатов с представлением пространственных данных в ГИС-технологиях, формирующих геоэкологический риск территории.

7. Разработана оригинальная методика оценки состояния грунтовой толщи по критерию дисперсии и на ее основе введены поправки в распределение зон по сейсмическим свойствам, подтверждающиеся инструментальными данными (наличие просадочных грунтов) и обуславливающие различный геоэкологический риск. При этом поправки к значениям сейсмической интенсивности рассчитывались в форме доверительных интервалов.

Литература

1. Аптикаев Ф.Ф., Эртелева О.О. Российская сейсмическая шкала нового поколения. // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2016. – Т. 43. № 2. – С. 43–52.
2. Аптикаев Ф.Ф. О вероятности превышения воздействий в строительных нормах. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. № 3. – С. 55–62. DOI: 10.46698/VNC.2021.11.83.005.
3. Заалишвили В.Б. Инструментальный метод сейсмического микрорайонирования. Владикавказ: ГФИ ВНИЦ РАН, – 1997. 76 с.
4. Заалишвили В.Б., Харебов К.С., Харебов А.К. Создание баз данных сильных движений на основе современных воззрений. // Геология и геофизика Юга России. – 2013. – № 3. – С. 39–44. DOI: 10.23671/VNC.2013.3.55537.
5. Фидарова М.И., Заалишвили В.Б., Мельков Д.А. Связь величины макросейсмической интенсивности с различными показателями инструментальных записей колебаний грунтовой толщи. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 1 – С. 59–75. DOI: 10.46698/VNC.2023.17.83.005.

6. Чотчаев Х.О., Бурдзиева О.Г., Заалишвили В.Б. Зонирование высокогорных территорий по геоэкологическим нагрузкам, обусловленным геодинамическими и климатическими воздействиями. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2021. – Т. 11. № 1. – С. 81–94. DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007.
7. Ang A.H.-S. Reliability bases for seismic safety assessment and design. // In: *Proceedings 4th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Palm Springs, California. – 1990. Vol. 1. – pp. 29–45.
8. Beresnev I.A., Atkinson G.M. FINSIM – a FORTRAN program for simulating stochastic acceleration time histories from finite faults. // *Seismological Research Letters*. – 1998. – Vol. 69. – pp. 27–32.
9. Failache M.F., Zuquette L.V. Geological and geotechnical land zoning for potential Hortonian overland flow in a basin in southern Brazil. // *Engineering Geology*. – 2018. – Vol. 246. – pp. 107–122. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.09.032.
10. Fajfar P. Elastic and Inelastic Design Spectra. // In: *Proceedings 10-th European Conference on Earthquake Engineering*. Vienna. – 1995. – Vol. 2. – pp. 1169–1178.
11. Finn Liam W.D., Iai S., Matsunavga Y. Effect of Site Conditions of Ground Motions. // In: *Proceedings 10-th European Conference on Earthquake Engineering*. Vienna. Balkema. – 1994. – Vol. 2.
12. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. *The Elements of Statistical Learning*. Issue XXII. New York. Springer, – 2009. 745 p. DOI: 10.1007/978-0-387-84858-7.
13. Laurenzano G., Garbin M., Parolai S., Barnaba C., Romanelli M., Froner L. High-resolution local seismic zonation by cluster and correlation analysis. // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2023. – Vol. 173. 108122. DOI: 10.1016/j.soildyn.2023.108122.
14. Li Y., Qi S., Zheng B., Yao X., Guo S., Zou Y., Lu X., Tang F., Guo X., Waqar M.F., et al. Multi-Scale Engineering Geological Zonation for Linear Projects in Mountainous Regions: A Case Study of National Highway 318 Chengdu-Shigatse Section. // *Remote Sensing*. – 2023. – Vol. 15. 4619. DOI: 10.3390/rs15184619.
15. Masi A., Chiauzzi L., Nicodemo G., Manfredi V. Correlations between macroseismic intensity estimations and ground motion measures of seismic events. // *Bulletin of Earthquake Engineering*. – 2020. – Vol. 18. – pp. 1899–1932. DOI: 10.1007/s10518-019-00782-2.
16. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience. NIED K-NET, KiK-net. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience. – 2019. DOI: 10.17598/NIED.0004.
17. Ordaz-Hernández A., Chuy Rodríguez T., Hernández S.J., Garcia Pelaez J. Geological-geotechnical division applied to urban seismic zonation. San Cristobal town, western Cuba. // *Cuaternario y Geomorfología*. – 2012. – Vol. 26. – pp. 89–104.
18. Okabe A.B., Boots B., Sugihara K., Chiu S.N. *Spatial tessellations concepts and applications of Voronoi diagrams*. // Chichester: John Wiley and Sons. – 2000. – pp. 671.
19. Razmyar A., Eslami A. Evaluating the Geotechnical and Geophysical Characteristics of Expanding Districts in Tehran Using Field Experiments. // *Civil Engineering Journal (C.E.J.)*. – 2018. – Vol. 4. No. 2. – pp. 363–377. DOI: 10.28991/cej-030997.
20. Shabestari K.T., Yamazaki F.A. Proposal of instrumental seismic intensity scale compatible with MMI evaluated from three-component acceleration records. // *Earthquake Spectra*. – 2019. – Vol. 17. Issue 14. – pp. 711–723. DOI: 10.1193/1.1425814.
21. Vilorio J.A., Vilorio-Botello A., Pineda M.C., Valera A. Digital modelling of landscape and soil in a mountainous region: A neuro-fuzzy approach. // *Geomorphology*. – 2016. – Vol. 253. – pp. 199–207. DOI: 10.1016/J.GEOMORPH.2015.10.007.
22. Yodgorov Sh.I. Geoinformational basis of estimation of the modern status of geocological factor of seismic risk in the territory of Bukhara. // *International Journal of Geology, Earth and Environmental Sciences*. – 2018. – Vol. 8. Issue 2. – pp. 36–43.

23. Zhu A., Hudson B., Burt J., Lubich K., Simonson D. Soil mapping using GIS, expert knowledge, and fuzzy logic. // Soil Science Society of America Journal. – 2001. – Vol. 65. – pp. 1463–1472.

References

1. Aptikaev F.F., Erteleva O.O. Russian seismic intensity scale of new generation. Seismic Instruments. 2016. Vol. 43. No. 2. pp. 43–52. (in Russ.)
2. Aptikaev F.F. An exceedance probability of the influence in the building code. Geology and Geophysics of Russian South. 2021. Vol. 11. No. 3. pp. 55–62. DOI: 10.46698/VNC.2021.11.83.005. (in Russ.)
3. Zaalishvili V.B. Instrumental method of seismic microzonation. Vladikavkaz. GPI VSC RAS. 1997. 76 p. (in Russ.)
4. Zaalishvili V.B., Kharebov C.S., Kharebov A.C. Strong motion database development based on contemporary ideology. Geology and Geophysics of Russian South. 2013. No. 3. pp. 39–44. DOI: 10.23671/VNC.2013.3.55537. (in Russ.)
5. Fidarova M.I., Zaalishvili V.B., Melkov D.A. Correlation between the values of macroseismic intensity and various indicators of instrumental records of vibrations in the soil stratum. Geology and Geophysics of Russian South. 2023. Vol. 13. No. 1. pp. 59–75. DOI: 10.46698/VNC.2023.17.83.005. (in Russ.)
6. Chotchaev Kh.O., Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B. Zoning of high mountainous areas by geocological loads caused by geodynamic and climatic influences. Geology and Geophysics of Russian South. 2021. Vol. 11. No. 1. pp. 81–94. DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007. (in Russ.)
7. Ang A.H.-S. Reliability bases for seismic safety assessment and design. In: Proceedings 4th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Palm Springs, California. 1990. Vol. 1. pp. 29–45.
8. Beresnev I.A., Atkinson G.M. FINSIM – a FORTRAN program for simulating stochastic acceleration time histories from finite faults. Seismological Research Letters. 1998. Vol. 69. pp. 27–32.
9. Failache M.F., Zuquette L.V. Geological and geotechnical land zoning for potential Hortonian overland flow in a basin in southern Brazil. Engineering Geology. 2018. Vol. 246. pp. 107–122. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.09.032
10. Fajfar P. Elastic and Inelastic Design Spectra. In: Proceedings 10-th European Conference on Earthquake Engineering. Vienna. 1995. Vol. 2. pp. 1169–1178.
11. Finn Liam W.D., Iai S., Matsunavga Y. Effect of Site Conditions of Ground Motions. In: Proceedings 10-th European Conference on Earthquake Engineering. Vienna. Balkema. 1994. Vol. 2.
12. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning. Issue XXII. New York. Springer. 2009. 745 p. DOI: 10.1007/978-0-387-84858-7.
13. Laurenzano G., Garbin M., Parolai S., Barnaba C., Romanelli M., Froner L. High-resolution local seismic zonation by cluster and correlation analysis. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2023. Vol. 173. 108122. DOI: 10.1016/j.soildyn.2023.108122.
14. Li Y., Qi S., Zheng B., Yao X., Guo S., Zou Y., Lu X., Tang F., Guo X., Waqar M.F., et al. Multi-Scale Engineering Geological Zonation for Linear Projects in Mountainous Regions: A Case Study of National Highway 318 Chengdu-Shigatse Section. Remote Sensing. 2023. Vol. 15. 4619. DOI: 10.3390/rs15184619.
15. Masi A., Chiauzzi L., Nicodemo G., Manfredi V. Correlations between macroseismic intensity estimations and ground motion measures of seismic events. Bulletin of Earthquake Engineering. 2020. Vol. 18. pp. 1899–1932. DOI: 10.1007/s10518-019-00782-2.
16. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience. NIED K-NET, KiK-net. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience. 2019. DOI: 10.17598/NIED.0004.

17. Ordaz-Hernández A., Chuy Rodríguez T., Hernández S.J., Garcia Pelaez J. Geological-geotechnical division applied to urban seismic zonation. San Cristobal town, western Cuba. *Cuaternario y Geomorfologia*. 2012. Vol. 26. pp. 89–104.
18. Okabe A.B., Boots B., Sugihara K., Chiu S.N. *Spatial tessellations concepts and applications of Voronoi diagrams*. Chichester: John Wiley and Sons. 2000. pp. 671.
19. Razmyar A., Eslami A. Evaluating the Geotechnical and Geophysical Characteristics of Expanding Districts in Tehran Using Field Experiments. *Civil Engineering Journal (C.E.J)*. 2018. Vol. 4. No. 2. pp. 363–377. DOI: 10.28991/cej-030997.
20. Shabestari K.T., Yamazaki F. A Proposal of instrumental seismic intensity scale compatible with MMI evaluated from three-component acceleration records. *Earthquake Spectra*. 2019. Vol. 17. Issue 14. pp. 711–723. DOI: 10.1193/1.1425814.
21. Viloría J.A., Viloría-Botello A., Pineda M.C., Valera A. Digital modelling of landscape and soil in a mountainous region: A neuro-fuzzy approach. *Geomorphology*. 2016. Vol. 253. pp. 199–207. DOI: 10.1016/J.GEOMORPH.2015.10.007.
22. Yodgorov Sh.I. Geoinformational basis of estimation of the modern status of geocological factor of seismic risk in the territory of Bukhara. *International Journal of Geology, Earth and Environmental Sciences*. 2018. Vol. 8. Issue 2. pp. 36–43.
23. Zhu A., Hudson B., Burt J., Lubich K., Simonson D. Soil mapping using GIS, expert knowledge, and fuzzy logic. *Soil Science Society of America Journal*. 2001. Vol. 65. pp. 1463–1472.