НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 550.34
DOI 10.46698/VNC.2024.92.28.001

Инструментальная мера сейсмической интенсивности как основа метода сейсмического микрорайонирования

Владислав Борисович Заалишвили
Геофизический институт – филиал ФГБУН ФНЦ «Владикавказский научный центр Российской академии наук», научный руководитель, доктор физико-математических наук, cgi_ras@mail.ru

Дмитрий Андреевич Мельков
ГФИ ВНЦ РАН, кандидат технических наук, cgi_ras@mail.ru

Мадина Ивановна Фидарова
ГФИ ВНЦ РАН, научный сотрудник отдела геофизики, инженерной сейсмологии и геоинформатики, cgi_ras@mail.ru

Георгий Владимирович Шманатов
ГФИ ВНЦ РАН, младший научный сотрудник, аспирант, cgi_ras@mail.ru

Аннотация. *Методология оценки рисков должна основываться на интегральном взаимодействии двух факторов: воздействия и реакции объектов. Нами впервые сформулирована задача разработки инструментальной меры интенсивности в форме нахождения скалярной величины (или набора величин) по трехкомпонентной сейсмической записи в виде векторной величины, изменяющейся во времени, которая может быть решена на основе обширного фактического материала и современных методов работы с данными. Экспериментальную основу исследования составляет комплекс сейсмологических, геолого-геофизических, макросейсмических, инженерно-строительных и других данных из разных районов мира. Математическое моделирование выполнялось на основе модели конечного разлома – программы FINSIM (Beresnev, 1998); реакции грунтовой толщи методом отраженных волн на основе алгоритмов, разработанных в ГФИ ВНЦ РАН. Материалы обрабатывались при помощи методов теории вероятностей и математической статистики – применялись корреляционный и регрессионный анализ (метод опорных векторов), метод главных компонент, модели «случайный лес». Работа с пространственными данными осуществлялась в программах ARCGIS 9 и QGIS, обработка данных в программах MATLAB, Jupyter Notebook (библиотеки scipy, numpy, sklearn). Впервые выполнена всесторонняя оценка различных параметров сейсмических записей, подходящих для разработки меры «инструментальной интенсивности», с помощью современных методов машинного обучения – по данным расчета коэффициента корреляции Пирсона, F-теста, модели «случайный лес» и взаимной совместной информации. Установлено, что повышение точности достигается совместным использованием интенсивности Фаджфара с максимальным значением амплитудного спектра Фурье, что определило в качестве наиболее надежных мер интенсивности модифицированной меры Фаджфара-Анга, комбинации пиковой скорости/ускорения и площади спектра (меры Заалишвили). На основе статистической обработки данных предложено использовать дисперсию сейсмической интенсивности как одну из характеристик грунтовых условий (дисперсности и слоистости среды).*

Ключевые слова: *макросейсмическая интенсивность, сейсмическая интенсивность, инструментальная мера, базы данных, машинное обучение*

Для цитирования: *Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Фидарова М.И., Шманатов Г.В. Инструментальная мера сейсмической интенсивности как основа метода сейсмического микрорайонирования // Вестник Владикавказского научного центра РАН. 2024. Т. 24. № 4. С. 29–41. DOI 10.46698/VNC.2024.92.28.001*

Instrumental measure of seismic intensity as the basis of the seismic microdistricting method

Vladislav B. Zaalishvili
Geophysical Institute - the Affiliate of Vladikavkaz Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Scientific supervisor, Dr.Sc., cgi_ras@mail.ru

Dmitry A. Melkov
GPI VSC RAS, Leading Researcher, Ph.D., cgi_ras@mail.ru

Madina I. Fidarova
GPI VSC RAS, Junior Research, cgi_ras@mail.ru

Georgy V. Shmanatov
GPI VSC RAS, Junior Research, postgraduate student, cgi_ras@mail.ru

Abstract. *For the first time, a comprehensive assessment of various parameters of seismic recordings suitable for the development of an "instrumental intensity" measure was performed using modern machine learning methods – based on the calculation of the Pearson correlation coefficient, the F-test, the random forest model and mutual joint information. It was found that an increase in accuracy is achieved by combining the Fajfar intensity with the maximum value of the Fourier amplitude spectrum, which determined the modified Fajfar-Anga measure, a combination of peak velocity/acceleration and spectral area (Zaalishvili measures) as the most reliable intensity measures. Based on statistical data processing, it is proposed to use the dispersion of seismic intensity as one of the characteristics of soil conditions (dispersion and stratification of the medium).*
Keywords: *macroseismic intensity, seismic intensity, instrumental measure, databases, machine learning*
For citation: *Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Fidarova M.I., Shmanatov G.V. Instrumental measure of seismic intensity as the basis of the seismic microdistricting method // Bulletin of Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2024. Vol.24. No. 4. P. 29–41.*
DOI 10.46698/VNC.2024.92.28.001

ВВЕДЕНИЕ

В горных районах находится значительное количество промышленных и гражданских зданий, гидротехнических сооружений и объектов транспортной инфраструктуры, создающих различные виды антропогенного воздействия и антропогенного воздействия на геологическую среду. Они потенциально способствуют развитию процессов и явлений, требующих создания защитных мер. Эффективность их использования и защита от опасных процессов во многом зависит от характера инженерно-геологических условий и степени их изученности. Таким образом, для урбанизированных горных территорий проблема оценки и снижения сейсмического риска с целью разработки мер по снижению ущерба и управлению им является актуальной.

Концепция анализа факторов сейсмического риска использует возможности геоинформационных систем, комбинируя соответствующие информационные слои. Современные геоинформационные технологии позволяют производить системную оценку состояния каждого фактора риска. Основой такой оценки является, конечно же, оценка сейсмической опасности. Именно единицы измерения опасности и соотношения между ними являются предметом данной работы, цель которой выбор наиболее оптимальных характеристик и разработка методологии вероятностной оценки получаемых инженерных и макросейсмических мер интенсивности, каждая из которых наилучшим образом подходит для различных геоэкологических задач. Так для оценки рисков целесообразно использовать макросейсмическую интенсивность в баллах, поэтому 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. Наиболее близкой к непрерывной шкале является шкала MSK [7].

МЕТОДЫ. МЕРА ИНТЕНСИВНОСТИ ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Интенсивность является непосредственной характеристикой прямо связываемой с рисками. Главный принцип, положенный в основу макросейсмической шкалы MSK – статистические данные процентного соотношения повреждений различной степени для зданий различной категории, расположенных на территории, подвернувшейся сейсмическому воздействию. Таким образом, данная характеристика является пространственной – требуется рассчитать количество зданий различного типа и процентное соотношение повреждения различной степени среди различных типов зданий. Таким образом, требуется определять характеристики на определенных площадях, то есть данная оценка не является точечной. В таком определении сейсмической интенсивности задача определения границ зон будет зависеть от анализируемых площадей, а при отсутствии объектов-индикаторов (зданий) в данных будут присутствовать пропуски. Кроме того, распределение застройки исторически может быть различным по типу и количеству, поэтому для статистически обоснованных оценок требуется варьировать анализируемые площади. Ясно, что такая оценка может применяться для достаточно больших территорий. Кроме того интенсивность не может быть непрерывной, в чем и заключается определение интенсивностей в форме баллов. Иными словами интенсивность не может иметь дробное значение, хотя и может быть интерполирована между зонами различной интенсивности. При этом каждая из зон должна иметь некий центр которому приписывается характеристика, полученная в целом для зоны, что приводит к достаточно большим погрешностям сопоставимым с размерами анализируемых зон.

С другой стороны использование сейсмических приборов позволяет 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 непревышения. Таким образом, требуется оценить тип и параметры распределения анализируемых случайных величин.

Каждая точечная оценка может рассматривать-

ся для определенного радиуса, в зависимости от плотности таких оценок. Или могут использоваться диаграммы Вороного, определяющие наибольшую близость к данной точке. 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. При этом учитывая возможность применения дробных значений сейсмической интенсивности, каждый ИГЭ может быть дифференцирован по сейсмическому признаку без более общей классификации по категориям.

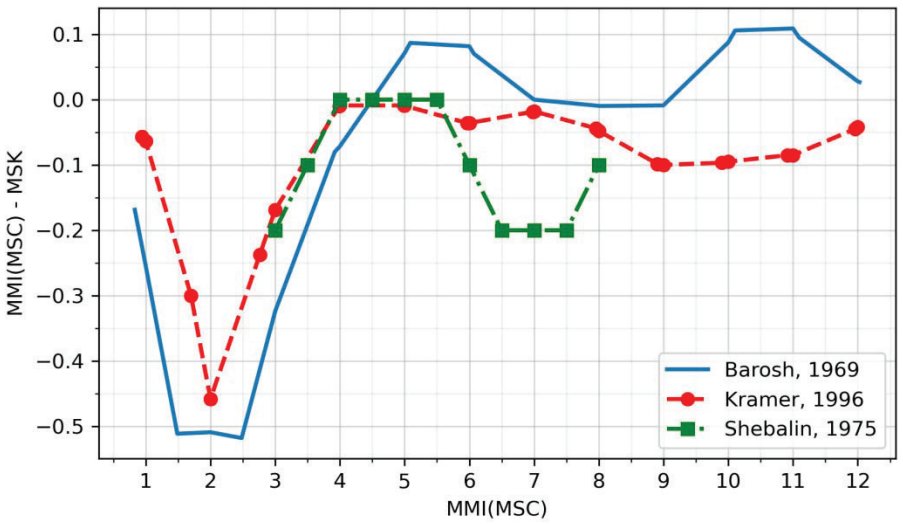


Рис. 1. **Соотношение между шкалами MMI и MSK по данным (Barosh, 1969; Kramer, 1996) и «равномерность» шкалы MCS (MMI) по материалам землетрясений Македонии (Шебалин, 1975)**

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 соотношений между ними позволит производить оценки рисков и более точно производить оценку приращения сейсмической интенсивности. Это обусловлено те, что одним из наиболее обоснованных методов является инструментальный метод СМР, например, формулы способа слабых землетрясений, мощных источников, способа сейсмических жестокостей 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 2 раза соответствует приращению интенсивности на один балл. Данное положение в последнее время подвергается серьезной критике. Предполагается, что меньшим интенсивностям могут соответствовать более высокие ускорения. При этом приводятся примеры отдельных записей с пиковыми значениями. Это является логичным желанием увеличить обеспеченность устойчивости проектируемой застройки. Однако, если при детальном районировании территорий использовать региональные модели, основанные на ускорениях (которые являются более обоснованными), пересчет ускорений в интенсивности в данном случае приведет к уменьшению интенсивности, выраженной в баллах. Данная проблема решается: 1) уточнением регрессионных моделей и, главное – 2) оценкой статистических характеристик получаемых величин и использование оценок в форме верхней границы доверительных интервалов, что в обоих случаях использования закономерностей «инженерный параметр – балл сейсмической интенсивности» и «балл сейсмической интенсивности – инженерный параметр» даст обоснованный «запас прочности».

Сопоставление соотношений между шкалами семейства Меркалли (MMI) и Медведева (MSK), полученными различными авторами [9; 11] с данными Н.В. Шебалина по распределению изосейст землетрясений Македонии [8], позволяет сделать вывод, что сейсмическая шкала MSK является наиболее равномерной (во всяком случае, в диапазоне от 3 до 5,5 баллов). Другими словами, она является шкалой «интервалов» (*рис. 1*). Возможно, это послужило одним из факторов развития инструментального метода сейсмического микрорайонирования, поскольку позволяет использовать интенсивность как величину, а не категориальный признак.

Таким образом, шкала MSK является наиболее подходящей основой для разработки инструментальной меры сейсмической интенсивности. Полученные соотношения между шкалами использованы для обработки базы данных сети K-NET.

На основе указанного подхода выполнен расчет целого ряда инструментальных параметров (максимальных скоростей, смещений и ускорений, среднеквадратической скорости преобладающего

периода, интенсивности Ариаса (кумулятивный квадрат ускорений), кумулятивной абсолютной скорости, интенсивности Анга, интенсивности Хаузнера, индекса полной входной энергии, и мер интенсивности Заалишвили – площади реального спектра колебаний, площади нормализованного спектра колебаний, средневзвешенной частоты колебаний, и создан соответствующий набор данных [4].

Далее, была выполнена оценка различных параметров сейсмических записей подходящих для разработки меры «инструментальной интенсивности» по данным расчета коэффициента корреляции Пирсона, F-теста, важности признаков модели «случайный лес» и взаимной совместной информации (*рис. 2–3*). Наиболее информативными признаками являются пиковая горизонтальная скорость (PHV), кумулятивный квадрат ускорений – интенсивность Ариаса, максимальное значение амплитудного спектра Фурье, интенсивнсоть Анга и мера Фаджфара [2; 3; 5]. Для расчета регрессионных соотношений использовался метод опорных векторов (support vector), называемый ранее алгоритмом «обобщенного портрета». Данный метод был разработан советскими математиками В.Н. Вапником и А.Я. Червоненкисом [1974] и с тех пор приобрел широкую популярность [12].

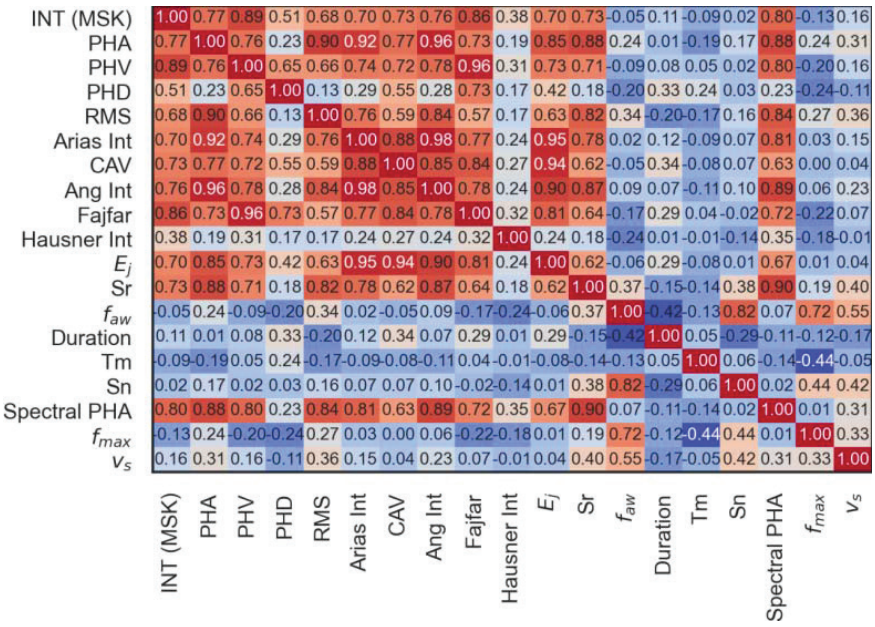


Рис. 2. **Тепловая карта корреляции параметров анализируемого набора данных**

В основе метода опорных векторов для задач регрессии или регрессии опорных векторов (SVR) лежит поиск гиперплоскости, при которой риск в многомерном пространстве будет минимальным. По сравнению с традиционной регрессионной моделью SVR оценивает коэффициенты путем минимизации квадратичных потерь. Данный метод обладает целым рядом преимуществ по сравнению с методом наименьших квадратов: более устойчив к выбросам в данных, более гибок в своей способности моделировать нелинейные данные, имеет лучшие возможности обобщения, поскольку он использует методы регуляризации, чтобы избежать переобучения. Расчеты выполнялись с использованием библиотеки sklearn.

Для оценки эффективности моделей с наиболее равномерным использованием имеющихся данных применялась процедура кроссвалидации (перекрестной проверки) [10].

Расчеты выполнялись для моделей с одним параметром, и различными комбинациями двух и трех параметров набора данных [7]. В модели с двумя параметрами лучший результат получен для комбинации меры Фаджфара и меры Анга и меры Фаджфара и среднеквадратического ускорения (*рис. 4а, б*).

$$I = 0.82 \cdot \log10(\text{Ang Int}) + 1.34 \cdot \log10(\text{Fajfar}) + 2.60, \quad (1)$$

$$I = 0.90 \cdot \log10(\text{RMS}) + 1.72 \cdot \log10(\text{Fajfar}) + 3.20, \quad (2)$$

Поскольку в меру Фаджфара входит пиковая скорость и продолжительность, по сути, это уточнение трехпараметрической модели, сочетающей в себе элементы меры Фаджфара и Анга:

$$I_{FA1} = RMS^{1.23} PGV^{1.34} t_d^{0.745} \quad (3)$$

или, поскольку нас интересует соотношение между параметрами, соответствующие показатели степени можно представить в виде: 1.65; 1.8 или 0.83; 0.90; 0.5.

И соответствующее выражение для второй модели примет вид и показатели степени можно представить в виде: 2.09; 4,0; 1,0 или 1.04; 2.0; 0.5, т.е. выражение примет вид:

$$I_{FA2} = RMS \cdot PGV^2 \cdot t_d^{1/2} \quad (4)$$

Для двух основных параметров лучший результат получен для меры площади спектра и средневзвешенной частоты (R2 = 0.88, MAE = 0.23) – рис. 4 в·

$$I = 2.11 \cdot \log10(\text{Sr}) - 3.54 \cdot \log10(f_{aw}) + 4.68, \quad (5)$$

Следующим по значимости является выражение, полученное для комбинации пикового горизонтального ускорения и пиковой скорости – *рис. 4г:*

$$I = 0.59 \cdot \log10(PHA) + 2.11 \cdot \log10(PHV) + 3.41, \quad (6)$$

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, и полученные Заалишвили для мощных источников (площади спектра, средневзвешенная частота в сочетании с амплитудными параметрами) применены для тестового полигона – территории г. Владикавказа [7]. Инструментальная мера сейсмической интенсивности может быть непосредственно использована в сейсмическом микрорайонировании, как в расчетных, так и инструментальных способах. В работе использованы данные постоянно действующей сети сейсмических наблюдений на территории г. Владикавказа (способ слабых землетрясений) и расчетный метод, основанный на использовании способа МОВ (многократно отраженных волн).

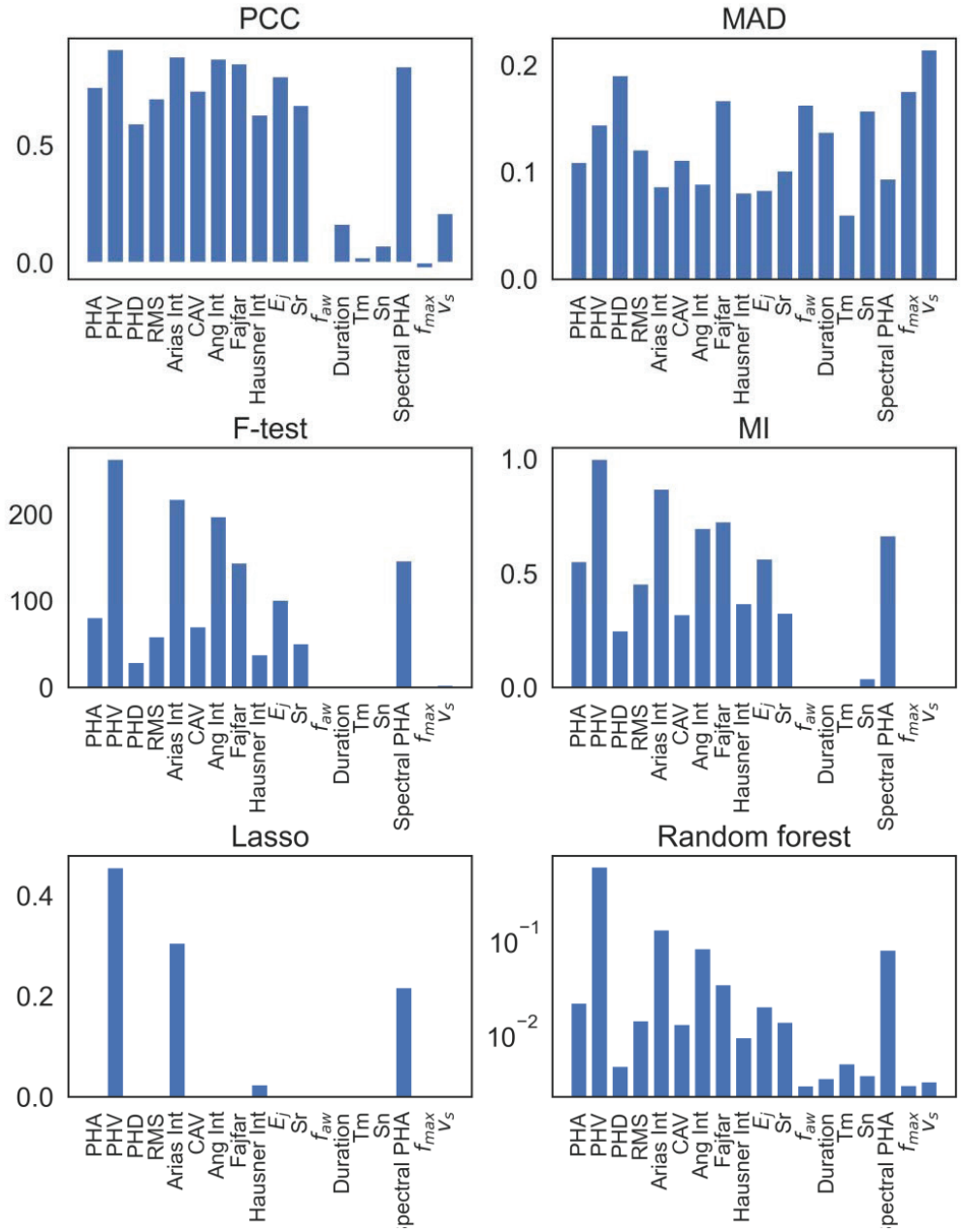
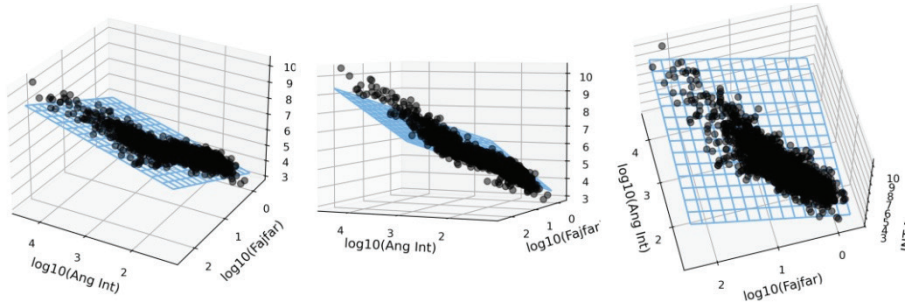


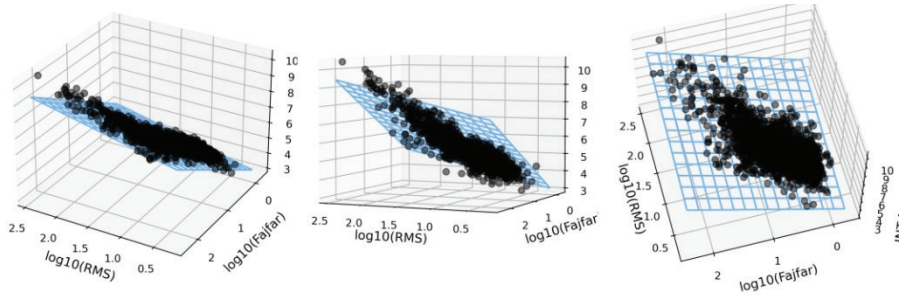
Рис. 3. **Отбор признаков:**
коэффициент корреляции Пирсона (PCC) (а), среднеквадратическое отклонение MAD (б), F-тест (в), взаимная совместная информация MI (г), важность признаков модели LASSO (д), важность признаков модели Random forest «случайный лес» (е)

$I = 0.82 \cdot \log10(\text{Ang Int}) + 1.34 \cdot \log10(\text{Fajfar}) + 2.60,\ R^2 = 0.89,\ MAE = 0.23$



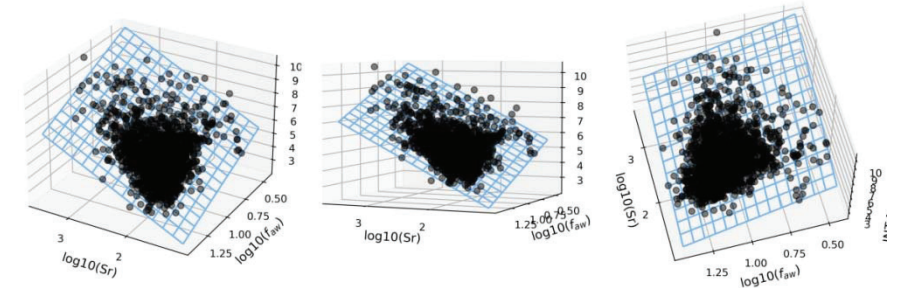
а)

$I = 0.90 \cdot \log10(\text{RMS}) + 1.72 \cdot \log10(\text{Fajfar}) + 3.20,\ R^2 = 0.89,\ MAE = 0.23$



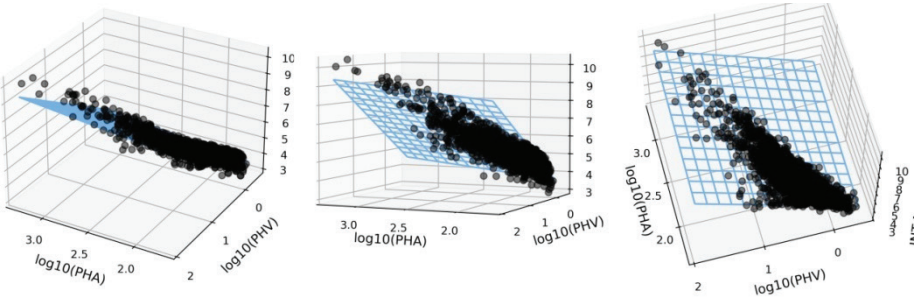
б)

$I = 2.11 \cdot \log10(\text{Sr}) - 3.54 \cdot \log10(f_{aw}) + 4.68,\ R^2 = 0.88,\ MAE = 0.23$



в)

$I = 0.59 \cdot \log10(\text{PHA}) + 2.11 \cdot \log10(\text{PHV}) + 3.41,\ R^2 = 0.85,\ MAE = 0.27$



г)

Рис. 4. **Регрессионные модели для двух параметров: комбинация меры Анга и Фаджфара (а), среднеквадратического ускорения и меры Фаджфара (б); меры площади спектра и средневзвешенной частоты (в), пикового горизонтального ускорения и пиковой горизонтальной скорости (г)**

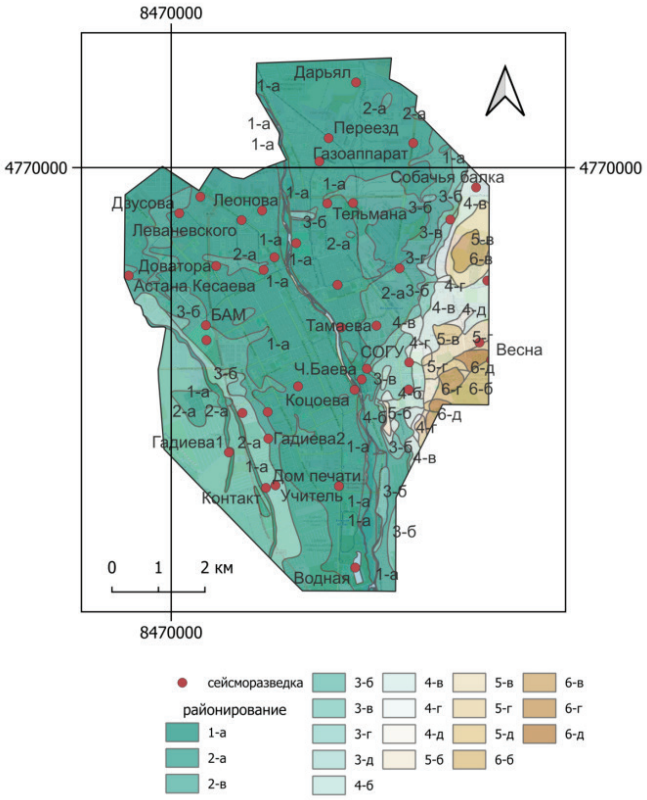


Рис. 5. **Информационный слой инженерно-геологических условий территории в ГИС геоэкологического районирования г. Владикавказа и участки сейсморазведочных работ**

Возвращаясь к вопросу формирования комплексов инженерно-геологических элементов (ИГЭ) территории, существует задача соответствия получаемых данных районирования реальным свойствам объектов. Созданная в рамках сейсмического микрорайонирования территории г. Владикавказа база данных сейсморазведочных работ в рамках данной работы была дополнена данными, полученными при микрорайонировании отдельных площадок на территории города (*рис. 5*). Сейсмический метод исследования является инженерным методом установления строения грунтов, и одновременно способом получения данных о сейсмических свойствах среды, необходимых для моделирования. При этом категория грунтов верхней части толщи может измениться в силу перемещения масс грунтов либо искусственного их уплотнения. Подобные изыскания выявляют изменения природной среды до техногенного вмешательства на уровне геоэкологических процессов и оценок воздействия на окружающую среду и методология эта вполне обоснована. Отсюда интерполяция данных по территории при достаточной плотности точек измерений, в целом, будет соответствовать конкретной геоэкологической обстановке. Уточнение же конкретных условий площадок входит в задачу инженерных изысканий для строительства.

В этой связи следует отметить важный аспект, объясняющий расхождения карт-схем СМР и нашего геоэкологического зонирования. Различие заключается в мере ответственности схем, используемых при планировании и принятии решений. Так, зона проявления локальных грунтов второй ка-

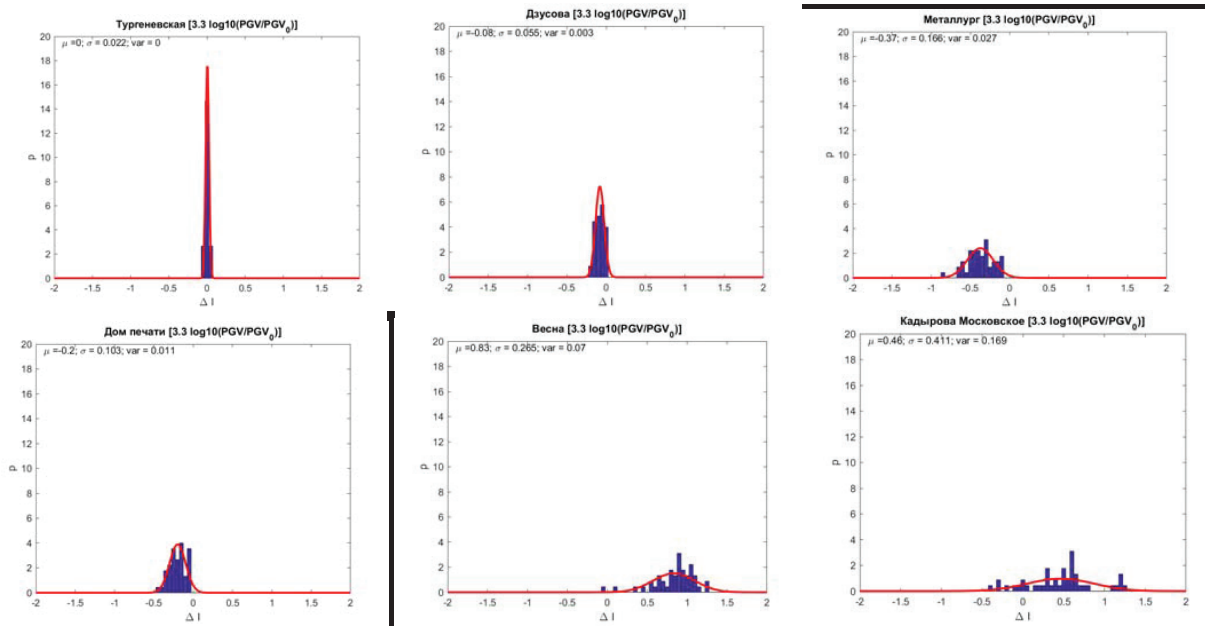


Рис. 6. **Гистограммы распределения приращений сейсмической интенсивности для различных участков территории**

ВЕСТНИК ВЛАДИКАВКАЗСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА
ТОМ 24 № 4 2024

Таблица 1

Расчет приращений сейсмической интенсивности ΔI (средние значения) и соответствующие среднеквадратические отклонения σ

№ пп	Формула	Весна		Дом печати		Металлург		Тургенев-ская		Дзусова		Кадырова Московское	
		ΔI	σ	ΔI	σ	ΔI	σ	ΔI	σ	ΔI	σ	ΔI	σ
1.	$\Delta I = 3.3 \cdot \lg(PHA/PHA_0)$	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.	$\Delta I = 3.3 \cdot \lg(PHV/PHV_0)$	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.	$\Delta I=1.325 \cdot \lg(PHV \cdot PHA/(PHV_0 \cdot PHA_0))$	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.	$\Delta I = 2.5 \cdot \lg(PHA/PHA_0)+1.25 \log10(\tau/\tau_0)$	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.	$\Delta I = 3.0 \cdot \lg((PHA \cdot f_{aw})/(PHA_0 \cdot f_{aw0}))$	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.	$\Delta I = 2.0 \cdot \lg (Sr/Sr_0)$	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.	$\Delta I= 0.82 \cdot \lg(Ang/Ang_0) +1.34 \cdot \lg(Fajfar/Fajfar_0)$	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.	$\Delta I= 0.90 \cdot \lg(RMS/RMS_0) +1.72 \cdot \lg(Fajfar/Fajfar_0)$	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.	$\Delta I= 2.11 \cdot \lg(Sr/Sr_0) - 3.54 \cdot \lg(faw/faw_0)$	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.	$\Delta I= 0.59 \cdot \lg(PHA/PHA_0) +2.11 \cdot \lg(PHV/PHV_0)$	0,62	0,20	-0,21	0,07	-0,40	0,12	0,01	0,02	-0,09	0,04	0,21	0,35

Таблица 2

Приращения сейсмической интенсивности на городских участках для вероятностей непревышения 95 % и 99 %

№ пп	Формула	Весна		Дом печати		Металлург		Тургенев-ская		Дзусова		Кадырова Московское	
		95%	99%	95%	99%	95%	99%	95%	99%	95%	99%	95%	99%
1.	$\Delta I = 3.3 \cdot \lg(PHA/PHA_0)$	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.	$\Delta I = 3.3 \cdot \lg(PHV/PHV_0)$	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.	$\Delta I=1.325 \cdot \lg(PHV \cdot PHA/(PHV_0 \cdot PHA_0))$	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.	$\Delta I = 2.5 \cdot \lg(PHA/PHA_0)+1.25 \log10(\tau/\tau_0)$	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.	$\Delta I = 3.0 \cdot \lg((PHA \cdot f_{aw})/(PHA_0 \cdot f_{aw0}))$	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.	$\Delta I = 2.0 \cdot \lg (Sr/Sr_0)$	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.	$\Delta I= 0.82 \cdot \lg(Ang/Ang_0) +1.34 \cdot \lg(Fajfar/Fajfar_0)$	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.	$\Delta I= 0.90 \cdot \lg(RMS/RMS_0) +1.72 \cdot \lg(Fajfar/Fajfar_0)$	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.	$\Delta I= 2.11 \cdot \lg(Sr/Sr_0) - 3.54 \cdot \lg(faw/faw_0)$	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.	$\Delta I= 0.59 \cdot \lg(PHA/PHA_0) +2.11 \cdot \lg(PHV/PHV_0)$	0,67	0,69	-0,19	-0,18	-0,37	-0,36	0,02	0,02	-0,08	-0,07	0,29	0,33

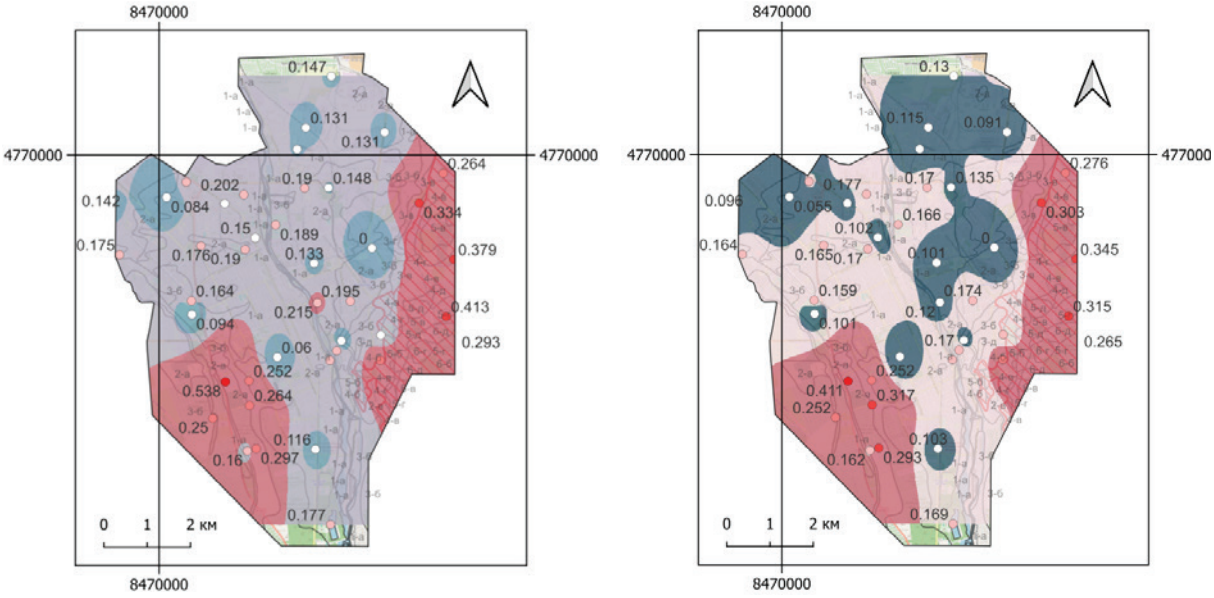


Рис. 7. **Среднеквадратические отклонения приращений сейсмической интенсивности по пиковым горизонтальным ускорениям (а) и скоростям (б)**

тегории на площади первой категории отнесена на карте-схеме СМР ко второй категории в силу большого распространения подобных участков, чтобы исключить строительство на данном участке объектов заниженной сейсмостойкости (в силу преобладания в данных районах частного сектора и самостоятельной застройки). В то же время при проведении изысканий для строительства сейсмичность площадки будет уточнена в соответствии с результатами изысканий, как это указано в Пояснительной записке к карте СМР г. Владикавказа (Отчет …., 2013).

В качестве нового критерия оценки приращений сейсмической интенсивности использована дисперсия разброса значений около среднего (в *табл. 1* приведены примеры расчетов для участков, представленных на *рис. 7*) [7]. На *рис. 6* показаны гистограммы и соответствующие плотности вероятности, в предположении, что распределение является нормальным.

В целом наблюдается закономерность увеличения разброса значений с ухудшением категории, но

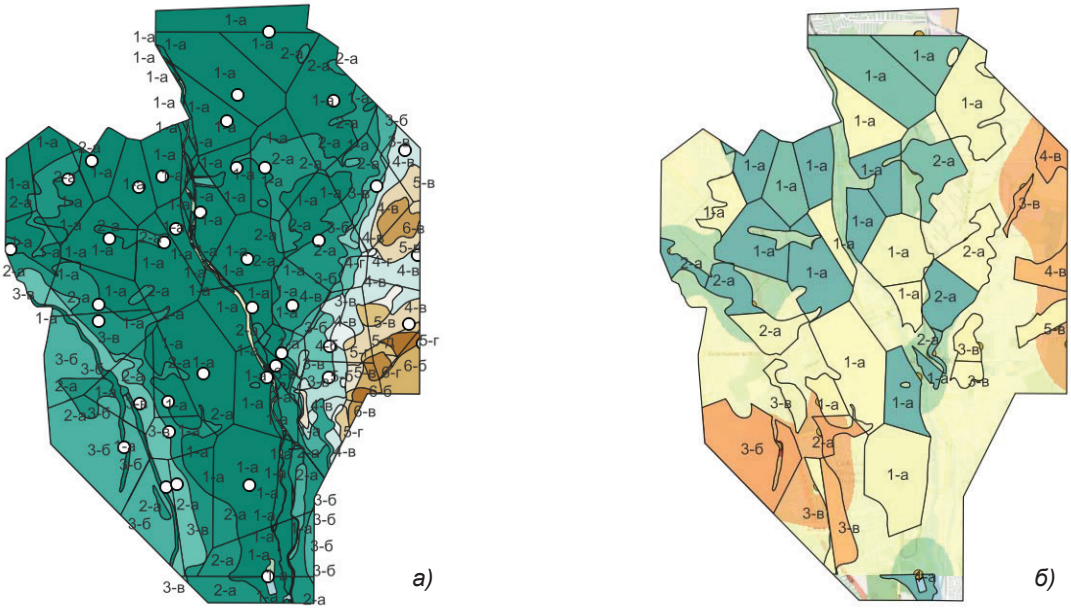


Рис. 9. **Деление схемы инженерно-геологического районирования на подобласти диаграммой Вороного (а) и дифференциация внутри каждой категории комплекса ИГЭ (б)**

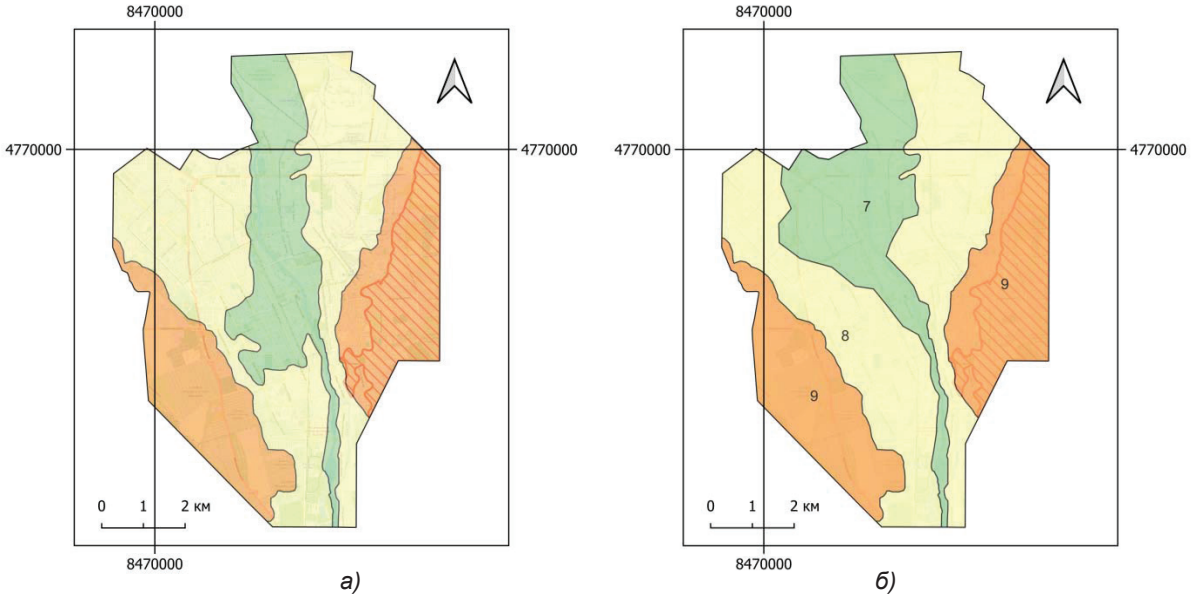


***Рис. 10*. Исходная (а) и уточненная (б) карты СМР территории г. Владикавказа**

поскольку данный параметр связан также со слоистостью среды, в пределах одного и того же комплекса ИГЭ данный параметр будет различаться.

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. 7* [7].

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 разбивки 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. 9*: деление схемы инженерно-геологического районирования на подобласти диаграммой Вороного (а) и дифференциация внутри каждой категории комплекса 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.

По результатам выполненной оценки была построена уточненная карта-схема СМР территории г. Владикавказа – *рис. 9*.

Анализ данных показывает различие в двух областях – *рис. 10*: в северо-западной части территории часть восьмибалльной зоны отмечена как семибалльная (обозначена зеленым цветом), и часть семибалльной территории в центральной части попадает в восьмибалльную зону (обозначена желтым цветом). При этом поправки к значениям сейсмической интенсивности рассчитывались в форме доверительных интервалов

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.

ВЫВОДЫ

1. В практику геоэкологических исследований введены сейсмические методы инструментальной оценки 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 сроки. В работах В.Б. Заалишвили и др. разрабо-

тан 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 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 (Vs30). Однако при этом не учитывается влияние слоистости среды и, в особенности, контрастности слоев, приводящих к увеличению определенных частот колебаний. В связи с различной ориентацией плоскости разлома и разном удалении от 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. Установлено, что 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) непосредственно является характеристикой геоэкологического состояния территории по инструментальным данным.

3. 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 инженерно-геологических элементов (ИГЭ) данный параметр будет различаться. 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). В связи с необходимостью оценки максимальных воздействий с определенной вероятностью непревышения, в методологию СМР введен новый параметр «дисперсия разброса значений около среднего».

4. 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, формирующих геоэкологический риск территории, в ГИС-технологиях,.

5. 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. Вапник В.Н., Червоненкис А.Я. Теория распознавания образов (статистические проблемы обучения/Издательство «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, – М., 1974. 416 с.

2. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Фидарова М.И., Харебов К.С. Анализ параметров для разработки инструментальной меры сейсмической интенсивности / // Коллективная монография по материалам XII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием "Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа (ГЕОКАВКАЗ 2022)" / Том XIII. Москва: ИИЕТ РАН, 2022а. С. 255–260.

3. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Фидарова М.И., Харебов К.С. Корреляция различных характеристик сейсмических записей с макросейсмической интенсивностью // Коллективная монография по материалам VIII Международной конференции "Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии". Научный редактор В.Б. Заалишвили. – Владикавказ: ГФИ ВНЦ РАН, 2022б. С. 33–43.

4. Заалишвили В.Б., Фидарова (Читишвили) М.И., Мельков Д.А., Кануков А.С. К вопросу выбора параметра сейсмического воздействия, характеризующего энергетический потенциал грунтового движения // Коллективная монография: Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии. Под редакцией А.В. Николаева, В.Б. Заалишвили. – Владикавказ: ГФИ ВНЦ РАН, 2019а. С. 267–273.

5. Заалишвили В.Б., Фидарова М.И., 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.

6. Статистические характеристики расчета приращений сейсмической интенсивности при сейсмическом микрорайонировании / Заалишвили В.Б., Камболов Д.А., Мельков Д.А., Фидарова М.И. // Устойчивое развитие горных территорий. 2024а. Т.16. № 1 (59). С. 345–357.

7. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Фидарова М.И., Шманатов Г.В. Геоэкологические аспекты формирования интенсивности землетрясения на основе изучения инструментальных данных // Геология и геофизика Юга России. 2024б. Т. 14. № 2. С. 45–60.

8. Шебалин Н.В. Об оценке сейсмической интенсивности //Сейсмическая шкала и методы оценки сейсмической интенсивности. – М.: Наука, 1975.

9. Barosh, P.J. Use of seismic intensity data to predict the effects of earthquakes and underground nuclear explosions in various

geologic settings. Geo. Sur. Bull., 1969, 1279. 93 p.
10. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning // Springer, 2009. DOI: 10.1007/978-0-387-84858-7
11. Kramer, S.L. Geotechnical Earthquake Engineering, 1st ed.; Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, USA, 1996; pp. 65–84.
12. Smola Alex J., Schölkopf Bernhard A Tutorial on Support Vector Regression" – Statistics and Computing archive Volume 14 Issue 3, August 2004, p. 199–222.

REFERENCES

1. Vapnik V.N., Chervonenkis A.Ya. Teoriya raspoznavaniya obrazov (statisticheskie problemy obucheniya/Izdatel'stvo «Nauka», Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoj literatury, – M., 1974. 416 str.
2. Zaalishvili V.B., Mel'kov D.A., Fidarova M.I., Harebov K.S. Analiz parametrov dlya razrabotki instrumental'noj mery sejsmicheskoj intensivnosti / // Kollektivnaya monografiya po materialam XII Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem \"Sovremennye problemy geologii, geofiziki i geoekologii Severnogo Kavkaza (GEOKAVKAZ 2022)\" / Tom XIII. Moskva: IIET RAN, 2022a. S. 255–260.
3. Zaalishvili V.B., Mel'kov D.A., Fidarova M.I., Harebov K.S. Korrelyaciya razlichnyh harakteristik sejsmicheskih zapisej s makrosejsmicheskoj intensivnost'yu // Kollektivnaya monografiya po materialam VIII Mezhdunarodnoj konferencii \"Opasnye prirodnye i tekhnogennye processy v gornyh regionah: modeli, sistemy, tekhnologii\". Nauchnyj redaktor V.B. Zaalishvili. – Vladikavkaz: GFI VNC RAN, 2022b. S. 33–43.
4. Zaalishvili V.B., Fidarova (Chitishvili) M.I., Mel'kov D.A., Kanukov A.S. K voprosu vybora parametra sejsmicheskogo vozdejstviya, harakterizuyushchego energeticheskij potencial gruntovogo dvizheniya // Kollektivnaya monografiya: Opasnye prirodnye i tekhnogennye processy v gornyh regionah: modeli, sistemy, tekhnologii. Pod redakciej A.V. Nikolaeva, V.B. Zaalishvili. – Vladikavkaz: GFI VNC RAN, 2019a. S. 267–273.
5. Zaalishvili V.B., Fidarova M.I., Mel'kov D.A. Svyaz' velichiny makrosejsmicheskoj intensivnosti s razlichnymi pokazatelyami instrumental'nyh zapisej kolebanij gruntovoj tolshchi // Geologiya i geofizika Yuga Rossii. 2023. T. 13. № 1. S. 59 –75.
6. Statisticheskie harakteristiki rascheta prirashchenij sejsmicheskoj intensivnosti pri sejsmicheskom mikrorajonirovanii / Zaalishvili V.B., Kambolov D.A., Mel'kov D.A., Fidarova M.I. // Ustojchivoe razvitie gornyh territorij. 2024a. T.16. № 1 (59). S. 345–357.
7. Zaalishvili V.B., Mel'kov D.A., Fidarova M.I., Shmanatov G.V. Geoekologicheskie aspekty formirovaniya intensivnosti zemletryaseniya na osnove izucheniya instrumental'nyh dannyh // Geologiya i geofizika Yuga Rossii. 2024b. T. 14. № 2. S. 45–60.
8. Shebalin N.V. Ob ocenke sejsmicheskoj intensivnosti //Sejsmicheskaya shkala i metody ocenki sejsmicheskoj intensivnosti. – M.: Nauka, 1975.
9. Barosh, P.J. Use of seismic intensity data to predict the effects of earthquakes and underground nuclear explosions in various geologic settings. Geo. Sur. Bull., 1969, 1279. 93 p.
10. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning // Springer, 2009. DOI: 10.1007/978-0-387-84858-7
11. Kramer, S.L. Geotechnical Earthquake Engineering, 1st ed.; Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, USA, 1996; pp. 65–84.
12. Smola Alex J., Schölkopf Bernhard A Tutorial on Support Vector Regression" – Statistics and Computing archive Volume 14 Issue 3, August 2004, p. 199–222.