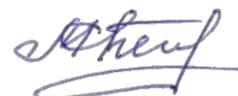


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
НАУКИ ФЕДЕРАЛЬНОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА «ВЛАДИКАВКАЗСКИЙ
НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК» (ВНЦ РАН)
ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ – ФИЛИАЛ ВНЦ РАН (ГФИ ВНЦ РАН)

На правах рукописи



Фидарова Мадина Ивановна

ОЦЕНКА ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ,
ФОРМИРУЕМЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ,
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИНТЕНСИВНОСТИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ
(НА ПРИМЕРЕ Г. ВЛАДИКАВКАЗ)

Специальность 1.6.21. Геоэкология

Диссертация на соискание
ученой степени кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:
Заалишвили Владислав Борисович
доктор физико-математических наук,
профессор

Владикавказ - 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ. 14	
1.1. Структура и основные характеристики сейсмических шкал.....	18
1.2. Основа сейсмической шкалы	20
1.3. Современные сейсмические шкалы различных стран мира и перспективы их развития.....	22
1.4. Основные факторы, определяющие повреждаемость застройки на основе результатов инженерного макросейсмического обследования.....	28
1.4.1. Основные факторы, формирующие уязвимость различных типов зданий и сооружений на сейсмически опасной территории.....	29
1.4.2. Зависимость степени повреждений застройки от уровня сейсмического воздействия.....	31
1.5. Количественная мера повреждаемости физической системы	32
1.6. Энергетические характеристики сейсмического воздействия.....	36
1.7. Энергетический потенциал грунтового движения.....	37
ВЫВОДЫ	43
ГЛАВА 2. СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ РАЗЛИЧНЫМИ СЕЙСМИЧЕСКИМИ ШКАЛАМИ. РАВНОМЕРНОСТЬ ШКАЛ.....	45
2.1. Соотношения шкалы Японского метеорологического агентства (JMA) с другими сейсмическими шкалами.....	45
2.2. Способы пересчета сейсмической интенсивности	57
2.3. Равномерность шкал. Обоснование использования дробных значений сейсмической интенсивности	60
ВЫВОДЫ	63

ГЛАВА 3. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЗАПИСЕЙ КОЛЕБАНИЙ ГРУНТОВОЙ ТОЛЩИ	64
3.1. Макросейсмическая интенсивность и показатели инструментальных записей.....	64
3.2. Корреляция между величиной макросейсмической интенсивности и показателями инструментальных записей Гаубанского землетрясения 2000 г. и Тбилисского землетрясения 2002 г.	71
3.2.1. Макросейсмические и инструментальные данные проявления землетрясений различной интенсивности на территории г. Тбилиси	71
3.2.2. Параметры сейсмических записей	81
3.3. Отбор параметров для разработки инструментальной меры сейсмической интенсивности по данным сети K-net.....	92
3.3.1. База данных и параметры движения грунта.....	92
3.3.2. Метод. Построение и отбор признаков.....	93
3.3.3. Результаты отбора параметров для разработки инструментальной меры сейсмической интенсивности	97
ВЫВОДЫ	103
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ МЕРЫ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ	105
4.1. Метод опорных векторов.....	105
4.2. Нормализация данных.....	110
4.3. Регрессионный анализ.....	112
ВЫВОДЫ	131
ГЛАВА 5. ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНОВА СЕЙСМИЧЕСКОГО РИСКА НА ПРИМЕРЕ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ТЕРРИТОРИИ ГОРОДА ВЛАДИКАВКАЗА	132
5.1. Задачи зонирования территорий по сейсмическому фактору ...	132

5.2. Информационный слой инженерно-геологических условий территории в ГИС геоэкологического районирования территории г. Владикавказа.....	140
5.3. Определение скоростей сейсмических волн в типичных грунтах территории г. Владикавказа по данным сейсморазведочных исследований.....	141
5.4. Методы расчета приращений сейсмической интенсивности для слабых землетрясений, взрывных источников и по соотношениям ШСИ-2017.....	151
5.5. Данные сети сейсмических наблюдений на территории г. Владикавказа.....	157
5.6. Построение расчетных моделей по инструментальным данным	163
5.7. Определение приращений сейсмической интенсивности с помощью способа сейсмических жесткостей.....	165
5.8. Определение приращений интенсивности с помощью способа МОВ	170
5.9. Различия полученных результатов с данными карты СМР. Дисперсия как характеристика грунтовых условий.....	186
5.10. К вопросу соответствия карты инженерно-геологического районирования по результатам геофизических исследований на территории г. Владикавказа. Выделение зон с различной сейсмичностью	194
5.11. Практические рекомендации по сейсмическому микрорайонированию на основе инструментальной меры сейсмической интенсивности и учета геоэкологических процессов	202
ВЫВОДЫ	203
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	205
ЛИТЕРАТУРА	208

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ УЧАСТКОВ ТЕРРИТОРИИ Г.ВЛАДИКАВКАЗА.....	230
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 РАСЧЕТНЫЕ СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УЧАСТКОВ ТЕРРИТОРИИ Г. ВЛАДИКАВКАЗА.....	252
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СЕЙСМИЧЕСКОМУ МИКРОРАЙОНИРОВАНИЮ НА ОСНОВЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ МЕРЫ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ И УЧЕТА ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ (РЕАКЦИИ РАЗЛИЧНЫХ ОБЪЕКТОВ И ИНЖЕНЕРНО- ГЕОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ).....	274

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. 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 природную среду. Интенсификация урбанизации, образование крупных городов и городских агломераций, увеличение объемов промышленного производства, а также рост населения связаны с интенсивным использованием ограниченных земельных, водных и минеральных ресурсов. Эффективность их использования и защита от опасных геоэкологических процессов во многом зависит от характера инженерно-геологических условий и степени их изученности. Анализ факторов геоэкологического риска позволяет на основе комбинирования информационных слоев с данными о пространственном распределении опасности, техногенной нагрузке и уязвимости застройки оценивать ожидаемые геоэкологические риски. В таких условиях, исследования состава, строения, свойств, процессов, физических и геохимических полей геосфер Земли объединяются геоэкологическими исследованиями. В 2021 году в ГФИ ВНЦ РАН был разработан подход, при котором на основе экспертных оценок, для каждого исследуемого участка, характеризующегося собственным уровнем геоэкологического риска, выделялся ряд стандартных факторов, формирующих интегральный геоэкологический риск [Заалишвили, Чотчаев, 2022]. Для урбанизированных горных территорий проблема оценки и снижения геоэкологического риска с целью разработки мер по управлению и снижению ущерба является актуальной.

Наиболее точной характеристикой сейсмических воздействий является сейсмическая интенсивность, поскольку она напрямую связана с повреждаемостью строительных объектов. Необходимо отметить, что

действующая шкала ГОСТ Р 57546-2017 однозначно связывает баллы шкалы сейсмической интенсивности со степенями повреждений различных типов зданий. При этом оценки интенсивности однозначно связаны с параметрами состояния собственно грунтов. В этой связи оценка интенсивности в целочисленных величинах, несомненно, характеризуется высокой погрешностью. Это предполагает разработку методологии использования дробных значений интенсивности в баллах. В то же время, повреждаемость объектов определяется не только параметрами сейсмических или динамических воздействий, но и геологическим или геоэкологическим состоянием исследуемой территории.

Факторами, определяющими интегральный геоэкологический риск территорий, являются: природные – геолого-тектонические, техногенные, экологические и социально-экономические процессы, состояние которых определяет потенциал ущерба и его проявленную величину. 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 опасности различного вида и зависящих от решаемой геоэкологической задачи. Так, для оценки геоэкологического риска целесообразно использовать макросейсмическую интенсивность в баллах, когда 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 воздействий.

Цель диссертационной работы – разработка научно-методической основы оценки вклада геодинамических, в том числе, сейсмических воздействий в геоэкологические риски урбанизированных горных территорий (на примере г. Владикавказ) на основе инструментальной меры интенсивности землетрясений.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- создание баз данных сильных грунтовых движений для целей машинного обучения;
- установление соотношений между сейсмическими шкалами для унификации данных;
- статистическая обработка набора данных: записей сильных движений на участках с различными эпицентрными расстояниями, грунтовыми условиями и значениями магнитуд землетрясений;
- исследование различных характеристик динамического или сейсмического воздействия на природную среду и техногенные объекты для выбора параметра или группы параметров, наилучшим образом описывающих инструментальные данные;
- анализ различных характеристик и разработка методологии вероятностной оценки получаемых инженерных и макросейсмических мер интенсивности;
- развитие методики оценки геоэкологических рисков в зависимости от уровня динамических, в том числе, сейсмических воздействий на примере сейсмического микрорайонирования территории г. Владикавказ.

Объект исследования – колебания грунтовой толщи в различных инженерно-геологических условиях территории г. Владикавказ при геодинамических воздействиях, в том числе, землетрясениях.

Предмет исследования – анализ влияния параметров, определяющих формирование интенсивности динамического и сейсмического воздействия, на геоэкологические риски природно-техногенных геосистем (на примере сейсмического микрорайонирования территории г. Владикавказ).

Основные положения, выносимые на защиту

1. Установлено, что шкала MSK, современной версией которой является действующий стандарт ШСИ-2017, характеризуется высокой равномерностью разметки, что определяет физическую обоснованность закономерностей, получаемых на ее основе, и обуславливает выбор шкалы в качестве основы для разработки инструментальной меры интенсивности («обучение с учителем»).

2. Выявлено, что неоднородность среды определяет разброс значений около математического ожидания параметров, описывающих динамический эффект, и является дополнительной характеристикой грунтового комплекса, т.к. даже при одних и тех же величинах средней скорости поперечной волны в толще V_{s30} , участки могут относиться к разным сейсмическим категориям.

3. Установлено, что оценка параметров, формирующих интенсивность, может быть выполнена с учетом различной вероятности превышения приведенных значений на основе доверительных интервалов в дробных значениях ожидаемой интенсивности, определяющей геоэкологическое состояние территории.

4. Разработана научно-методическая основа геоэкологического районирования территории, основанная на эмпирических регрессионных соотношениях и оценках статистических характеристик получаемых величин, позволяющая непосредственно учитывать факторы и закономерности развития опасных природно-техногенных процессов и оценку геоэкологического риска.

Научная новизна

1. Впервые выполнена всесторонняя оценка различных параметров динамических и 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, представляющей непосредственную основу для оценок геоэкологического риска.

2. Сопоставление макросейсмической интенсивности и инструментальных показателей записей динамических и сейсмических событий впервые выполнено с помощью базы данных сильных движений K-Net (Япония), а также записей и результатов обследования отдельных районов на территории Кавказа.

3. Установлены основные параметры, определяющие формирование интенсивности динамического и сейсмического воздействия. Повышение точности достигается совместным использованием интенсивности Фаджфара с максимальным значением амплитудного спектра Фурье, что определило использование в качестве наиболее надежных мер интенсивности модифицированной меры Фаджфара-Анга, а также комбинации пиковой скорости/ускорения и меры Заалишвили – площади спектра колебаний, тесно связанных с геоэкологическим состоянием горно-породного массива.

4. Разработаны методические основы оценки состояния грунтовой толщи по критерию дисперсии, подтверждающиеся инструментальными данными, когда вводимые поправки, обуславливающие различный геоэкологический риск, рассчитываются в форме доверительных интервалов. На основе инструментальной меры интенсивности разработана методика геоэкологического районирования территории с учетом геоэкологических эффектов в задачах сейсмического микрорайонирования.

Достоверность научных положений, выводов и результатов обеспечивается представительностью и надежностью исходных данных,

полученных в ходе долговременных наблюдений, сопоставимостью результатов исследований и практики, использованием современных методов исследований.

Теоретическая значимость результатов состоит в решении научной задачи оценки геоэкологических рисков, формируемых геодинамическими воздействиями, на основе инструментальной меры интенсивности землетрясений, имеющей значение для развития геолого-минералогической отрасли знаний.

Практическая значимость работы заключается в использовании ее результатов в качестве основы для оценки сейсмических рисков территорий, сценариев влияния сейсмических факторов на геоэкологические процессы.

Фактический материал и методы исследования. Экспериментальную основу исследования составляет комплекс сейсмологических, геолого-геофизических, макросейсмических, инженерно-строительных и других данных из разных районов мира: базы данных ГФИ ВНИЦ, база данных K-NET (Япония), материалы инженерно-геологических изысканий на территории г. Владикавказа при сейсмическом микрорайонировании города и отдельных объектов, проведенных ГФИ ВНИЦ РАН в разные годы. Исходные материалы обрабатывались при помощи методов теории вероятностей и математической статистики – применялись корреляционный и регрессионный анализ (метод опорных векторов), метод главных компонент, модели «случайный лес». Математическое моделирование выполнялось на основе конечно-разломной модели в Программе FINSIM (Beresnev, 1998); реакции грунтовой толщи методом отраженных волн на основе алгоритмов, разработанных в ГФИ ВНИЦ РАН, работа с пространственными данными осуществлялась в программах ARCGIS 9 и QGIS, обработка данных – в программах MATLAB, JupyterNotebook (библиотеки scipy, numpy, sklearn).

Апробация результатов. Основные результаты исследования представлены на международных, российских и региональных

конференциях: VII Международная конференция «Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии», г. Владикавказ, 30 сентября–2 октября 2019 г.; IX Международная научно-практическая конференция «Молодые ученые в решении актуальных проблем науки», г. Владикавказ, 12–14 декабря 2019 г.; X Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа», г. Грозный, 14–16 октября 2020 г.; XI Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа»; VIII Международная конференция «Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии», г. Владикавказ, 20–22 сентября 2022 г.; XIII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа», г. Владикавказ, 4–8 октября 2023 г.; научно-практическая конференция с международным участием «Актуальные вопросы инженерной сейсмологии, безопасности территорий и зданий, экспертиза и оценка рисков» памяти Ю.А. Бержинского, г. Иркутск, 5–7 декабря 2023 г.; II Евразийский инновационный форум «Актуальные проблемы застройки и безопасности крупных городов», Казахстан, г. Алматы, 13–14 июня 2024 г.; на семинарах ГФИ ВЦ РАН, 2019–2024 гг.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 23 печатные работы, в том числе, в изданиях из списка Web of Science и/или Scopus – 10 и в изданиях, рекомендованных ВАК – 7.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 1.6.21.

Геоэкология:

1. Изучение состава, строения, свойств, процессов, физических и геохимических полей геосфер Земли как среды обитания человека и других организмов.

9. Динамика, механизмы, факторы и закономерности развития опасных природных, природно-техногенных и техногенных процессов, оценка их активности, опасности и риска проявления. Разработка методов и технологий оперативного обнаружения и прогноза возникновения катастрофических природно-техногенных процессов, последствия их проявления и превентивные мероприятия по их снижению, инженерная защита территорий, зданий и сооружений.

16. Моделирование геоэкологических процессов и последствий хозяйственной деятельности для природных комплексов и их отдельных компонентов. Современные методы геоэкологического картирования, ГИС-технологии и информационные системы в геоэкологии.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, трех приложений, в том числе, 65 рисунков, 22 таблиц, списка литературы из 171 наименования. Общий объем работы составляет 308 страниц.

Благодарности.

Диссертация была выполнена в рамках Гранта РФФИ 19-35-90127 «Исследование связи макросейсмической интенсивности землетрясений с показателями инструментальных записей колебаний грунтовой толщи».

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю д.ф.-м.н., профессору В.Б. Заалишвили за научное руководство, выбор темы исследования, создание условий для работы и постоянную человеческую поддержку. Автор глубоко благодарен д.г.-м.н., профессору С.Г. Параде за ценные советы и рекомендации. Автор благодарен к.т.н., доценту Д.А. Мелькову за плодотворные годы совместной работы. Автор признателен к.т.н., доценту К.С. Харебову, к.г.н. О.Г. Бурдзиевой, к.т.н., доценту А.С. Канукову, И.Г. Архиреевой и другим коллегам за помощь на всех этапах работы над диссертацией.

ГЛАВА 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

С 30-х годов прошлого века в качестве показателя воздействия на здания и сооружения используется величина ускорения движения основания. Предполагалось, что использование ускорения в качестве показателя сейсмического воздействия по сравнению с другими способами позволяет более точно оценить интенсивность землетрясений.

В Строительных Нормах многих стран при оценке опасности используют параметр горизонтальных ускорений. Практика последних лет показывает, что величина динамического коэффициента усиления не всегда коррелирует с ускорениями грунтов.

Инструментальные записи, полученные в последние годы, показывают, что величина динамического коэффициента усиления часто не зависит от пиковых ускорений грунта. Анализ данных о сильных землетрясениях в Японии и США показал, что смещения и скорости колебаний частиц на рыхлых, дисперсных грунтах, как правило, превышают соответствующие показатели на плотных, скальных грунтах. С другой стороны, нередко ускорения больше на скальных.

Разрушительный потенциал ускорений при различном уровне воздействия не всегда адекватен. При ускорениях 0.4g (в Японии) наблюдались очень незначительные повреждения, тогда как при ускорениях 1.8g (землетрясение в Нортридже, США) повреждения были относительно малы. В то же время при ускорениях 0.1–0.2g разрушения были значительными (Япония, 1964; Мексика, 1985 и др.). При землетрясениях определенной магнитуды и эпицентрального расстояния ускорения, как правило, распределены по нормальному закону.

Иногда при расчетах зданий и сооружений на устойчивость используют параметр скорости колебания грунтов, что позволяет учесть кинетическую энергию процесса. Следует отметить, что и величина скорости не характеризуется высокой надежностью в качестве показателя потенциала

“повреждаемости”. Следует отметить, что не особенно, надежна и т.н. “интенсивность Ариаса”, которая установлена на основе анализа 250 записей сильных грунтовых движений. И здесь совпадение результатов представляет большую удачу [Reiter, 1991]. Список можно продолжить. С другой стороны, здания, запроектированные и построенные с учетом расчетных требований, т.е. на основе использования величин ускорений, как правило, являются вполне сейсмостойкими (Нефтегорское землетрясение, 1995 и т.д.). В то же время, очень часто, поврежденные или тем более разрушенные в результате землетрясения здания, априори, связывают с результатами низкого качества строительства. При этом, часто не обращают внимания на другие не менее важные факторы, которые определяют интегральный эффект сейсмического воздействия (тип здания, грунтовые условия, эпицентральное расстояние, спектральный состав приходящего воздействия, длительность процесса, резонансные явления и т.д.). Другими словами, при анализе последствий сильных и разрушительных землетрясений необходимо учитывать многофакторность влияния процесса землетрясения на застройку. Становится неясным, что определяет сейсмостойкость сооружения или какой параметр воздействия определяет его сейсмический эффект и является наиболее важным для адекватной оценки сейсмостойкости. Проблема сводится, таким образом, к выбору физически обоснованного параметра (или параметров) сейсмического воздействия, который может быть успешно использован проектировщиками и специалистами в области сейсмостойкого строительства для расчетов зданий и сооружений.

Важным показателем процесса повреждения или разрушения является способность здания, сооружения или любой физической системы поглощать приходящую энергию. Именно невозможность поглощения энергии системой или ее отдельными элементами приводит к ее повреждению. Это, в свою очередь, приводит к увеличению способности поглощения прибывающей энергии и предохраняет от дальнейшего повреждения. В случае превышения определенного уровня во время поглощения энергии, т.е. “накопления”

энергоёмкости, процесс повреждения продолжается. После очередного повреждения в зависимости от физического состояния система останется поврежденной или может быть разрушена.

Таким образом, энергоёмкость строительной конструкции или ее отдельных элементов является важнейшим параметром оценки ее реакции и сейсмостойкости на определенное сейсмическое воздействие. Установление параметра или параметров сейсмического воздействия должно быть протестировано на начальном этапе исследований поведением при соответствующих нагрузках в виде энергоёмкости строительных конструкций и их элементов. Это, на наш взгляд, наиболее полно определяет цели данного исследования и соответствующие пути решения научно-исследовательских задач.

Нередко, полученные инструментально записи колебаний грунтов, не содержат детальных сведений о грунтовых условиях. Особенно это касается данных США. Например, термин «аллювий», распространенный в США, недостаточно объясняет конкретный тип грунта и его физико-механические свойства. Только в последние годы положение стало меняться. Появились более детальные описания грунтов, весьма редко сопутствующие инструментальным записям. С другой стороны, именно здесь разработаны компьютерные программы расчетной (SHAKE и т.д.) оценки сейсмической опасности грунтов. Традиционно большей детальностью характеризуются данные Японии. В б. СССР такие же весьма детальные геологические данные, к сожалению, характеризовались почти полным отсутствием инструментальных записей землетрясений. С другой стороны, именно здесь, впервые были получены качественные инструментальные записи вертикальных грунтовых движений, достигающих ускорения 1.4g.

В промышленно развитых странах создаются банки записей сильных землетрясений. Но создание таких банков ограничено пределами отдельных учреждений или организаций, а число таких записей, как правило, недостаточно. Использовать для целей сейсмически безопасного

строительства данные банков нельзя без преобразования информации специальными методами. В то же время наличие таких банков позволит решать многие важные проблемы инженерной сейсмологии и значительно повысить обоснованность рекомендаций по направлению сейсмической опасности грунтов.

В работе рассмотрены особенности сильных грунтовых движений. Накопленные базы данных сильных движений грунтов преобразованы в банки записей колебаний грунтов с магнитудой 2.8 ... 8.1 при интенсивности проявления землетрясений в пределах 3...11 баллов. Анализ данных предоставляет возможность установить закономерные связи между параметрами движения грунтов. В качестве параметров рассматривались кумулятивная абсолютная скорость, индекс интенсивности Анга, мера Фаджфара, интенсивность Хаузнера, индекс полной входной энергии, “повреждаемость” объекта, мера Заалишвили в виде площади спектра колебаний грунтов и т.д. [Заалишвили и др., 2019а; 2022б; 2022а].

В результате исследования установлена различная ценность указанных показателей, а также особенности их взаимосвязей. В процессе исследований неожиданно выявились значительные недостатки существующих баз данных. Данные сильных грунтовых движений в качестве исходной информации, имеющие большую ценность для сейсмологии, весьма сложно непосредственно использовать для целей инженерной сейсмологии и сейсмостойкого строительства. В результате исследования сформировалась концепция и принципы формирования банков данных о землетрясениях, но многие вопросы по-прежнему требуют изучения [Основы ..., 2006].

Исследование оказалось также неожиданно трудоемким и характеризовалось большими временными затратами. Многие в исследованиях осталось неосуществленным из-за технических трудностей, решение которых было связано с возможностями получения интересующих исходных данных из мировых Центров баз данных. Не совсем полно были использованы возможности многофакторного анализа. Это некоторым

образом сузило возможности решения прямой задачи исследования. В то же время решение непосредственных задач исследования на основе недостаточных по качеству исходных данных видимо не было бы корректным и носило бы исключительно формальный характер, что могло привести к ошибочным заключениям. С другой стороны, поставленные задачи в большей степени своей были отчетливо очерчены и решены в работе.

Концепции формирования исходных данных и формализации параметров процессов получили детализацию, в частности, методология использования данных сильных грунтовых движений. Впервые была предпринята попытка создания банка инструментальных записей сильных землетрясений и анализа корреляции грунтовых движений с интенсивностью землетрясений при учете грунтовых условий.

Следующий этап исследования должен, несомненно, характеризоваться большей детальностью проработки баз данных на основе привлечения новых данных различных международных Центров. Кроме того, в дальнейших исследованиях могут быть применены современные технологии представления и анализа данных (полноценный многофакторный анализ, ГИС и т.д.). Проведенный поиск и завязавшиеся научные контакты позволили наметить необходимые шаги и практические мероприятия по решению в дальнейшем поставленных задач.

1.1. Структура и основные характеристики сейсмических шкал

Понятие сейсмическая интенсивность традиционно используется, как величина, описывающая нанесенный землетрясением ущерб. Строительные нормы и правила основаны на значениях интенсивности, присвоенных данному сейсмическому региону, а карты сейсмической опасности часто строятся в рамках шкалы интенсивности Меркалли (MM) или интенсивности Медведева-Шпонхауэра-Карника (MSK).

В то же время для оценки потерь используются модели распределения интенсивности будущих разрушительных землетрясений. С увеличением плотности сейсмической сети становится возможным быстро создавать карты интенсивности после землетрясения для общественного пользования (так называемая карта Shakemap).

Макросейсмические уравнения определяют макросейсмическую интенсивность на основе магнитуды и расстояния до землетрясения. Устанавливалась корреляция интенсивности воздействия с движениями грунта для оценки опасности на основе параметров движения грунта. Можно утверждать, что сейсмическая интенсивность определяется амплитудой, продолжительностью и частотой колебаний грунта [Sokolov, 2013].

Макросейсмическая интенсивность (MSI) представляет собой меру ущерба от землетрясения и важна при оценке сейсмической опасности, расходов на проектирование и потерь. Рекомендации по модернизации конструкций после сильных колебаний грунта содержат ряд шкал: интенсивности Меркалли; Меркалли-Канкани-Зибберг; Медведева-Шпонхауэра-Карника; Европейская и Китайская шкалы макросейсмической интенсивности, шкала интенсивности Японского метеорологического агентства.

Наиболее употребительны модифицированная шкала интенсивности Меркалли (MMI), Европейская макросейсмическая шкала (EMS), шкала интенсивности Японского метеорологического агентства (JMA) и Китайская шкала макросейсмической интенсивности (CMSIS). Подобно шкале MMI, CMSIS имеет двенадцать уровней, но значения пикового ускорения грунта (PGA) и пиковой скорости грунта (PGV) отличаются от значений шкалы MMI, потому что MSI имеет региональную зависимость сейсмических характеристик, что приводит к различным макросейсмическим уравнениям прогнозирования движения грунта.

Исследования макросейсмической интенсивности в первую очередь основаны на оценках структурных повреждений, которые имеют большой

разброс и случайность из-за субъективных суждений исследователей-сейсмологов и экспертов-строителей.

Среди инженерных параметров движения грунта для установления взаимосвязи с MSI используются ускорение грунта и скорость движения грунта. PGA является основополагающим в сейсмическом зонировании параметром движения грунта и сейсмическом проектировании сооружений. Параметр PGV точнее показывает повреждения от землетрясения в более гибких конструкциях, и модели линейной регрессии генерируются на основе PGV [Tao et al., 2020].

1.2. Основа сейсмической шкалы

Для оценки и сравнения землетрясений используется шкала магнитуд и шкала интенсивности. Шкала магнитуд — это логарифмическая шкала, которая измеряет энергию землетрясения. Она обозначается символом M и варьируется от 0 до 9,1. Землетрясения с большей магнитудой высвобождают больше энергии и могут вызвать более сильные сотрясения.

Шкала интенсивности, с другой стороны, измеряет силу сотрясений на поверхности Земли. Она используется для описания того, как землетрясение ощущается на поверхности и варьируется от I до X. Интенсивность зависит от магнитуды, глубины очага и расстояния от эпицентра.

Обе шкалы используются для оценки землетрясений, но они не заменяют друг друга. Магнитуда более точно отражает энергию землетрясения, в то время как интенсивность показывает, как сильно землетрясение ощущается на поверхности.

Шкала магнитуд используется для классификации землетрясений в зависимости от величины магнитуды, которая представляет собой относительную энергетическую характеристику землетрясения. Существует несколько типов магнитуд: локальная магнитуда (ML), магнитуда,

измеряемая по поверхностным волнам (M_s), магнитуда по объемным волнам (m_b) и моментная магнитуда (M_w).

Наиболее распространенной шкалой для измерения силы землетрясений является шкала Рихтера. Она основана на величине магнитуды землетрясения, которая отражает количество энергии, высвобождаемой при землетрясении. Увеличение магнитуды на одну единицу соответствует 32-кратному увеличению энергии землетрясения. Землетрясения с магнитудой около 2 очень трудно обнаружить, тогда как землетрясения с магнитудой 7 могут вызывать серьезные разрушения на больших территориях. Однако следует отметить, что магнитуда не всегда точно отражает интенсивность землетрясения, так как она зависит от многих факторов, включая глубину очага землетрясения и тип грунта. Масштаб повреждения зданий и сооружений, а также возможные человеческие жертвы более точно учитывает шкала интенсивности.

Интенсивность землетрясения – это показатель, который описывает, насколько сильно землетрясение может повлиять на поверхность земли, здания и сооружения, а также на людей и животных. Шкала Рихтера измеряет количество энергии, выделяемой при землетрясении, в то время как шкала Меркалли оценивает интенсивность сотрясений и связанные с ними повреждения.

Шкала MSK-64, разработанная в 1964 году, является одной из наиболее распространенных шкал в мире для оценки интенсивности землетрясений. Она широко используется в России и других странах СНГ. Однако с 1996 года в Европейском союзе начали использовать более современную шкалу EMS. MSK-64 также лежит в основе стандартов строительства в сейсмически активных зонах.

1.3. Современные сейсмические шкалы различных стран мира и перспективы их развития

Интенсивность землетрясений оценивается по величине причинно связанных с ними разрушений сооружений или деформаций земной поверхности.

Обычно для этой оценки применяется шкала интенсивности Меркалли, которая содержит 12 уровней, от I до XII. Каждый уровень соответствует определенному уровню разрушений и воздействию землетрясения на окружающую среду.

1. I (не ощущается): землетрясение редко ощущается людьми.
2. II (слабое): ощущается людьми в покое, особенно на верхних этажах зданий.
3. III (слабое): ощущается, но разрушения вызывает редко.
4. IV (легкое): ощущается людьми, но разрушения незначительны.
5. V (умеренное): вызывает значительные разрушения на небольшой площади.
6. VI (сильное): вызывает разрушения на большом расстоянии от эпицентра.
7. VII (Очень сильное): землетрясение вызывает серьезные разрушения в обширных областях.
8. VIII (Разрушительное): землетрясение приводит к разрушениям на значительных расстояниях вокруг эпицентра.
9. IX (Очень разрушительное): разрушения распространяются на больших территориях, возможны тяжелые потери.
10. X (Избирательное): почти полное разрушение, тяжелые потери.
11. XI (Катастрофическое): полное разрушение многих зданий, значительные потери.
12. XII (Исключительное): полное разрушение, практически полное уничтожение.

Эта шкала помогает оценить воздействие землетрясения на окружающую среду и принять меры для снижения рисков и повреждений.

В России и ряде стран интенсивность землетрясений оценивают по 12-балльной шкале MSK (Медведева-Шпонхойера-Карника), разработанной Медведевым, Шпонхойером и Карником.

1. I степень (нет): землетрясение не ощущается.
2. II степень (очень слабое): ощущается только некоторыми людьми в покое.
3. III степень (слабое): ощущается некоторыми людьми внутри помещений, но редко на открытом воздухе.
4. IV степень (легкое): ощущается многими людьми внутри помещений, некоторые могут пробудиться.
5. V степень (умеренное): ощущается почти всеми, некоторые могут испытывать страх.
6. VI степень (сильное): ощущается всеми, могут повреждаться некоторые слабые строения.
7. VII степень (очень сильное): наносит значительные ущербы слабым строениям, могут повреждаться средней крепости строения.
8. VIII степень (разрушительное): разрушаются слабые здания, повреждаются средние.
9. IX степень (очень разрушительное): средние здания разрушаются, могут повреждаться крепкие.
10. X степень (избирательное): значительные разрушения крепких зданий, возможны тяжелые потери.
11. XI степень (катастрофическое): полное разрушение многих зданий, существенные потери.
12. XII степень (исключительное): полное разрушение, практически полное уничтожение.

Эта шкала также представляет систематизированный способ оценки воздействия землетрясений на окружающую среду.

Чарльз Рихтер, как уже отмечалось выше, в 1935 г. разработал числовую шкалу определения магнитуды землетрясения, где каждая последующая цифра соответствует увеличению на порядок высвобождаемой при землетрясении энергии.

Ущерб зданиям наносится при землетрясениях с магнитудой более 5. Сильные землетрясения начинаются с цифры 7, а сильнейшие – более 8.

Шкала является одной из самых широко используемых и известных для измерения магнитуды землетрясений, поскольку представляет числовую оценку силы землетрясения, позволяя сравнивать разные события в зависимости от их масштаба и энергетического воздействия.

В среднем повторяемость или частота землетрясений в течение года на Земле составляет:

- с магнитудой 8 и выше – 1;
- с магнитудой 7,0–7,9 10;
- с магнитудой 6,0–6,9 100;
- с магнитудой 5,0–5,9 1000.

Магнитуда сильнейшего Чилийского землетрясения в 1960 г. достигала 9,5. Это событие имело далеко идущие последствия для всего региона.

Эти статистические данные подчеркивают важность мониторинга и изучения землетрясений для предотвращения и смягчения их негативных последствий [Блюм и др., 2015].

Семибалльная шкала сейсмической интенсивности JMA, применявшаяся в 1949–1996 гг., была разработана на основе дифференциации силы сотрясения грунта и уровня повреждения зданий. Наибольшая интенсивность 7 означает, что разрушается более 30–50% деревянных каркасных домов. После землетрясения в Кобе в 1995 г. появилась шкала интенсивности, позволяющая быстро оценить силу движения грунта и причиненный ущерб. Современная японская система

измерения интенсивности землетрясения близка к традиционной шкале интенсивности JMA (Таблица 1.1).

Таблица 1.1. – Связь между традиционной шкалой JMA и инструментальной интенсивностью JMA

JMA intensity scale	Instrumental intensity (JMA_I) ranges
2	$2.0 \leq I < 2.5$
3	$2.5 \leq I < 3.5$
4	$3.5 \leq I < 4.5$
5-	$4.5 \leq I < 5.0$
5+	$5.0 \leq I < 5.5$
6-	$5.5 \leq I < 6.0$
6+	$6.0 \leq I < 6.5$
7	$6.5 \leq I$

Интенсивность оценивается с использованием трехкомпонентных записей ускорения грунта после применения полосового фильтра, как показано на рисунке 1.1. Частотные характеристики этого полосового фильтра подчеркивают ощутимую силу относительно высокочастотных сотрясений Земли с частотой около 0,5 Гц. Отсечка высокочастотных сигналов частотой около 10 свидетельствует о том, что высокочастотное ускорение в этом диапазоне частоты игнорируется.

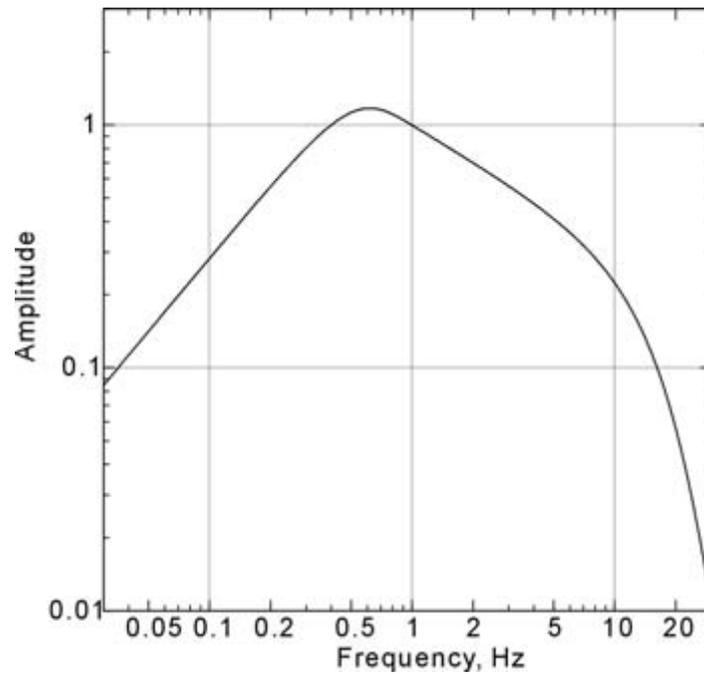


Рисунок 1.1. Кривая отклика полосового фильтра, использованного для оценки инструментальной интенсивности ЖМА

Процедура оценки инструментальной интенсивности ЖМА следующая. Преобразование Фурье применяется для каждой из трехкомпонентных временных диаграмм ускорения. Затем в частотной области применяется полосовой фильтр. После преобразования в диаграмму квадратный корень из векторной композиции используется для расчета кумулятивной продолжительности τ , как функции амплитуды ускорения (Рисунок 1.2). Суммарная продолжительность – это время, превышающее значение векторного ускорения. При исследовании максимальной амплитуды a_0 она должна удовлетворять кумулятивной продолжительности более 0,3 с, и пиковые сигналы длительностью менее 0,3 с, исключаются. Интенсивность определяется решением уравнения:

$$ЖМА_I = 2 \log(a_0) + 0.94$$

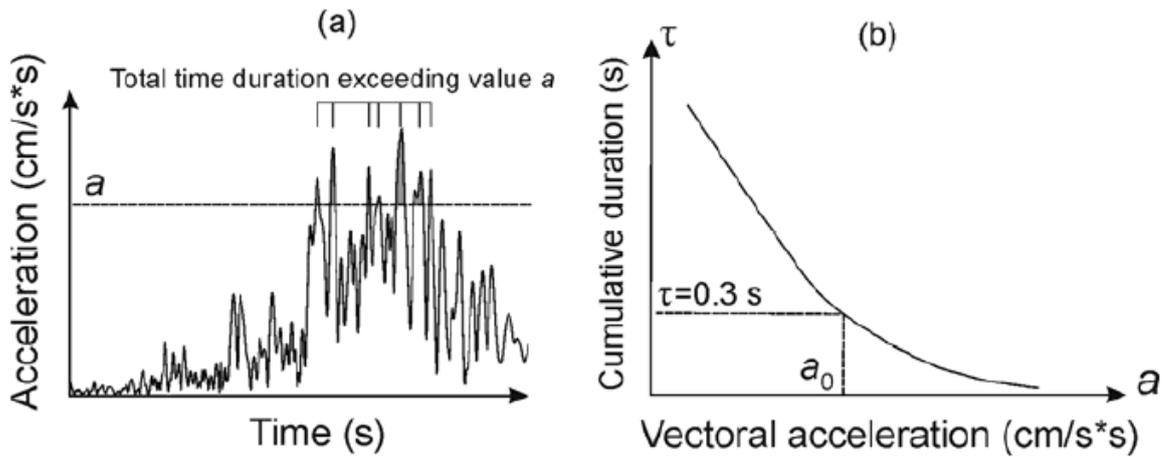


Рисунок 1.2. Оценка инструментальной интенсивности: а – расчет кумулятивной продолжительности τ по векторному составу акселерограммы; б – оценка значения a_0 .

К достоинствам методики относится быстрота расчета распределения интенсивности JMA на основе зарегистрированных движений грунта и использование в системах раннего оповещения (EEW). Сейсмическая интенсивность «5Lower» по шкале JMA соответствует VII–VIII по шкале Меркалли.

Для некоторых пользователей (железнодорожные и лифтовые компании, обрабатывающая промышленность и т.п.) EEW информирует о гипоцентральных параметрах, ожидаемой сейсмической интенсивности и времени прибытия S-волны для участков земной поверхности, где ожидается сейсмическая интенсивность более 4 баллов по шкале JMA.

Предупреждения обновляются, если сейсмическая интенсивность превышает «5Lower» в районах, где расчетная интенсивность в ранних предупреждениях была менее 4. Ожидаемая интенсивность JMA оценивается также по ранней части P-волны.

Из недостатков следует отметить ограниченность применения (состояние японских каркасных жилищ) и тесную зависимость от частотного состава колебаний грунта. Исследования Соколова и Фурумуры [Sokolov, Furumura, 2008] свидетельствуют, что JMA завышают интенсивность землетрясения, когда сотрясение грунта содержит сигналы с частотами более

10 Гц. Методика определяет очень малые значения JMA_I даже для больших PGV [Sokolov, 2013].

1.4. Основные факторы, определяющие повреждаемость застройки на основе результатов инженерного макросейсмического обследования

Инженерное макросейсмическое обследование оценивает влияние сейсмических сил на застройку. Основные факторы, определяющие повреждаемость застройки в результате такого обследования, включают:

1. Геологические и инженерно-геологические условия:

- Грунтовые характеристики: Тип и свойства грунтов влияют на передачу сейсмических волн и могут усиливать или ослаблять воздействие на строения.
- Уровень грунтовых вод: Поднятие уровня грунтовых вод может привести к снижению несущей способности грунта и увеличению риска повреждений.

2. Характеристики строения:

- Материалы конструкции: Прочность и устойчивость материалов, используемых в строительстве, влияют на способность зданий сопротивляться сейсмическим нагрузкам.
- Архитектурный дизайн: Конструкции с несимметричной формой или неоднородной массой могут быть более подвержены деформациям при сейсмических воздействиях.

3. Тип и интенсивность сейсмических нагрузок:

- Зона сейсмической активности: Регионы с высокой сейсмической активностью более подвержены землетрясениям, что требует более строгих стандартов проектирования.
- Частота и продолжительность сейсмических волн: Некоторые структуры могут быть более уязвимы для определенных частот сейсмических колебаний.

4. Техническое состояние строений:

- Степень износа и обслуживание: Здания, находящиеся в плохом техническом состоянии или имеющие дефекты в конструкции, могут быть более подвержены повреждениям при землетрясениях.

5. Стандарты проектирования и строительства:

- Профессиональные стандарты: Соблюдение строительных кодов и стандартов сейсмической безопасности существенно для минимизации риска повреждений.

6. Системы управления рисками:

- Системы предотвращения повреждений: Использование технологий и методов, направленных на снижение сейсмического риска, таких как базовые изоляторы или амортизаторы.

Все эти факторы взаимодействуют, и комплексный анализ позволяет инженерам оценить уровень сейсмической устойчивости застройки и разработать меры по ее улучшению.

1.4.1. Основные факторы, формирующие уязвимость различных типов зданий и сооружений на сейсмически опасной территории

Уязвимость различных типов зданий и сооружений на сейсмически опасной территории зависит от нескольких ключевых факторов:

1. Тип и конструкция здания:

- Материалы строительства: Различные материалы обладают разной устойчивостью к сейсмическим воздействиям. Например, железобетонные конструкции могут лучше справляться с землетрясениями, чем деревянные.

2. Геометрия и форма здания:

- Архитектурные особенности: Несимметричные или неоднородные формы могут привести к концентрации сил и

деформаций в определенных частях здания, что увеличивает риск повреждений.

3. Фундамент и основания:

- Качество грунта: Качество и тип грунта под фундаментом влияют на способность здания поглощать и распределять сейсмические силы.

4. Год постройки и техническое состояние:

- Строительные стандарты: Здания, построенные до введения строгих сейсмических стандартов, могут быть менее устойчивыми.
- Обслуживание и ремонт: Регулярное обслуживание и обновление могут улучшить устойчивость зданий к сейсмическим воздействиям.

5. Высота и количество этажей:

- Эффект многократных этажей: Высокие и многоэтажные здания более подвержены эффекту многократных этажей, который может вызвать усиление колебаний.

6. Системы жизнеобеспечения и коммуникаций:

- Электроснабжение и водоснабжение: Надежные системы энергоснабжения и водоснабжения могут уменьшить риск дополнительных повреждений после землетрясения.

7. Профессиональное проектирование и строительство:

- Строительные стандарты: Соблюдение строгих сейсмических стандартов и нормативов при проектировании и строительстве может существенно уменьшить уязвимость зданий.

8. Инфраструктура окружающей территории:

- Транспортная инфраструктура: Способность быстро эвакуировать людей и предоставить помощь после землетрясения также важна для общей устойчивости региона.

Учитывая эти факторы, инженеры разрабатывают строительные проекты и технологии, направленные на минимизацию уязвимости зданий на сейсмически опасных территориях.

1.4.2. Зависимость степени повреждений застройки от уровня сейсмического воздействия

Степень повреждений застройки зависит от ряда факторов, включая качество строительства, тип и состояние материалов, от уровня сейсмического воздействия, а также расстояния от эпицентра землетрясения.

При низком уровне сейсмического воздействия (магнитуда до 4.0–4.5) повреждения обычно ограничиваются небольшими трещинами в стенах и штукатурке, а также легкими колебаниями предметов. В этом случае здания и сооружения остаются относительно неповрежденными.

Средний уровень сейсмического воздействия (магнитуда 5.0–6.0) может вызвать более серьезные повреждения, такие как трещины в несущих конструкциях, обрушение штукатурки, повреждение кровли и окон. В некоторых случаях могут возникать проблемы с устойчивостью зданий и сооружений.

Сильное сейсмическое воздействие (магнитуда свыше 6.5) может привести к серьезным повреждениям или разрушению зданий и сооружений, включая обрушения, разломы конструкций и даже полное уничтожение. В таких случаях требуется проведение восстановительных работ или полная замена объектов недвижимости.

Важно отметить, что степень повреждений также зависит от расстояния от эпицентра землетрясения, поскольку сила толчков уменьшается с увеличением эпицентрального расстояния. Кроме того, на степень повреждений влияют грунтовые условия и геологические характеристики местности.

Сейсмические воздействия могут привести к накоплению повреждений в зданиях, особенно если они не спроектированы для длительных колебаний.

Различные частоты сейсмических волн могут вызывать различные типы деформаций в зданиях. Некоторые конструкции могут быть более уязвимы для определенных частот.

Регионы с высокой сейсмической активностью более подвержены сильным сейсмическим воздействиям, что может привести к более серьезным повреждениям.

В различных грунтовых условиях, в том числе, различных залеганиях геологических формаций, сейсмические волны могут вести себя по-разному, что влияет на их разрушающее воздействие на здания и сооружения.

Основной вывод заключается в том, что более сильные и длительные сейсмические воздействия обычно приводят к более серьезным повреждениям застройки. Однако точная степень повреждений зависит от сочетания перечисленных факторов и устойчивости конкретных зданий к сейсмическим воздействиям.

1.5. Количественная мера повреждаемости физической системы

Движение грунта вследствие землетрясения имеет сложный характер и количественно описывается несколькими параметрами. Наиболее важными характеристиками являются амплитуда, частотный состав и продолжительность.

Некоторые параметры движения грунта, такие как PGA и PGV, дают информацию об амплитуде, в то время как другие параметры, такие, как интенсивность спектра ускорений и интенсивность Ариаса, отражают указанные выше две или три характеристики. В общей сложности 16 параметров движения грунта используются для характеристики зарегистрированного движения грунта в исследовании зависимости. Единичные амплитудные параметры включают PGA и PGV. Пиковое смещение грунта (PGD) не учитывается из-за его чувствительности к

длиннопериодным помехам, а различные варианты поправки на фон и фильтрации ускорения могут давать совершенно разные смещения.

Часть параметров характеризует центральную или преобладающую частоту колебаний, на которой спектральная плотность мощности наиболее концентрирована, и отношение v_{max}/a_{max} , относится к периоду, наиболее значительного движения грунта.

Длительность – разность времени между первым и последним смещениями на заданном уровне амплитуды, с учетом абсолютного уровня в 5 гал и относительного уровня в 5% от PGA. Значимая продолжительность – интервал времени, в течение которого накапливается доля общей интенсивности Ариаса в интервале между порогами 5% и 95%. Параметры движения грунта включают в себя производные ускорения: среднеквадратическое ускорение, абсолютную скорость, интенсивность Ариаса, характеристическую интенсивность, пиковое ускорение JMA и индекс разрушения. Подлежит учету также интенсивность, включающая в себя интенсивность: спектра ускорений, спектра скоростей и Хаузнера.

Среднеквадратичное ускорение (a_{RMS}) описывается выражением:

$$a_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T_s} \int_{t_1}^{t_2} [a(t)]^2 dt} \quad (1.1)$$

где T_s — продолжительность;

t_1 и t_2 — начальный и конечный моменты времени, соответственно.

Кумулятивная абсолютная скорость (CAV) предложена Исследовательским институтом электроэнергетики США для фиксации начала структурного повреждения:

$$CAV = \int_{t_1}^{t_2} |a(t)| dt \quad (1.2)$$

Интенсивность Ариаса (AI) характеризует потенциальный ущерб атомным электростанциям:

$$AI = \frac{\pi}{2g} \int_{t_1}^{t_2} [a(t)]^2 dt \quad (1.3)$$

Интенсивность (I_c) определяет величину повреждения, обусловленного максимальной деформацией и диссипативной гистерезисной энергией:

$$I_c = a_{\text{RMS}}^{1.5} T_s^{0.5} \quad (1.4)$$

Эквивалентное пиковое ускорение JMA при расчете сейсмической интенсивности JMA представляет собой значение векторной композиции трех составляющих полосовых ускорений, каждое из которых фиксируется составным фильтром из амплитудного фильтра и фильтров верхних и нижних частот. Поскольку шкала сейсмической интенсивности JMA от 0 до VII отличается от MSI в Китае I–XII, движение грунта характеризуется не сейсмической интенсивностью, а эквивалентным пиковым ускорением JMA:

$$A_{0.3} = a_0 | \tau(a_0) \geq 0.3 \quad (1.5)$$

где a_0 — вектор составного ускорения;

$\tau(a_0)$ — длительность ускорения, превышающая a_0 .

Индекс разрушения (DI) Nakamura применяется для оценки потенциального ущерба от движения грунта:

$$DI = \max(\lg(|a(t)v(t)|)) \quad (1.6)$$

Интенсивность спектра ускорения (ASI) предлагается для анализа влияния движения грунта на конструкции с коротким периодом колебаний:

$$ASI = \int_{0.1}^{0.5} S_a(\xi = 0.05, T) dT \quad (1.7)$$

где $S_a(\xi = 0,05, T)$ — отклик на ускорение при коэффициенте демпфирования $\xi = 0,05$.

Интенсивность спектра скоростей (VSI) можно использовать для оценки повреждения грунта для большинства конструкций, периоды которых составляют 0,1...2,5 с:

$$VSI = \int_{0.1}^{2.5} PSV(\xi = 0.05, T) dT \quad (1.8)$$

где $PSV(\xi = 0,05, T)$ – спектр отклика с коэффициентом затухания $\xi = 0,05$.

Интенсивность Хаузнера (HI) отличается от интенсивности спектра скорости тем, что коэффициент демпфирования равен 0,2, поскольку при повреждении конструкции увеличивается:

$$HI = \frac{1}{2.4} \int_{0.1}^{2.5} PSV(\xi = 0.2, T) dT \quad (1.9)$$

Для расчета эквивалентного пикового ускорения JMA используются три компонента ускорения, в то время как для разрушающего индекса используется только одно компонентное ускорение вверх-вниз (UD). Для определения остальных параметров движения грунта используют ускорения обеих горизонтальных составляющих.

Собственная частота колебаний среднеэтажных и высотных зданий находится в пределах 0,1...2,0 Гц, а малоэтажных – 5,0...10,0 Гц. Ускорение фильтруется фильтром Баттерворта с полосой пропускания 0,1–10,0 Гц.

Перечень 16 параметров движения грунта из 125 записей движения грунта показан в таблице S1 [Tao et al., 2020]. Графики зависимости рассеяния MSI от параметра движения грунта показаны там же на рис. 2, а соответствующие абсолютные значения коэффициентов корреляции Пирсона – рис. 3. ASI, $A_{0.3}$, I_c , PGA, DI, HI, PGV, VSI, AI, a_{RMS} и CAV имеют более высокую корреляцию с MSI, в то время, как параметры длительности $T_{db,5}$, T_{ds} , $T_{db,5\%}$ и центральной частоты (CF) и v_{max}/a_{max} линейной корреляции не имеют [Tao et al., 2020].

1.6. Энергетические характеристики сейсмического воздействия

К энергетическим характеристикам сейсмического воздействия относится большое количество характеристик, через которые можно оценить энергию сейсмического воздействия. Анализом этих характеристик начали активно заниматься последние 30 лет с развитием энергетической теории сейсмостойкости.

Классическое уравнение сейсмических колебаний одномассной системы имеет следующий вид:

$$m\ddot{y} + Q(y, \dot{y}) + Cy = -m\ddot{y}_0 \quad (1.10)$$

где m – масса системы; C – жесткость системы; y – смещение массы относительно основания; y_0 – смещение основания; Q – неупругая составляющая реакции.

При умножении обеих частей уравнения на $dy = \dot{y}dt$ и интегрировании по времени от $t = 0$ до $t = \tau$ получается уравнение энергетического баланса:

$$m \int_0^\tau \ddot{y}\dot{y}dt + \int_0^\tau Q(y, \dot{y})\dot{y}dt + \int_0^\tau Cy\dot{y}dt = -m \int_0^\tau \ddot{y}_0 \dot{y}dt \quad (1.11)$$

Первое слагаемое описывает работу сил движения, второе – работу сил пластического деформирования Апл, третье – работу упругих деформаций, а правая часть – работу сил инерции движения. Расчеты показывают, что первое и третье слагаемые в этом равенстве относительно невелики. Поэтому, если работа сил инерции превзойдет работу монотонного разрушения, то возможно обрушение несущих конструкций.

Изложенный подход явился основанием исследований по оценке интеграла в правой части вышеуказанного уравнения. С этой целью использовались различные характеристики сейсмических воздействий, получивших название энергетических. Из энергетических характеристик можно выделить:

- интенсивность по Ариасу, I_A :

$$I_A = \frac{2\pi}{g} I_{A,1}^* I_{A,2}^* = \int \ddot{y}^2 dt; \quad (1.12)$$

- абсолютная кумулятивная скорость, CAV:

$$CAV = \int |\ddot{y}| dt \quad (1.13)$$

- плотность сейсмической энергии, SED:

$$SED = \int \dot{y}^2 dt; \quad (1.14)$$

- показатель повреждаемости Арайя:

$$I_{Araya} = \frac{I'_A}{v_0^2}, \quad (1.15)$$

где v_0 – количество нулевых пересечений за единицу времени в акселерограмме:

- ускорение, a ;
- показатель Парка-Анга (Park-Ang damage index):

$$I_c = a_{rms}^{1.5} \cdot \sqrt{t_d}. \quad (1.16)$$

К числу энергетических показателей можно отнести и продолжительность сейсмического воздействия t .

1.7. Энергетический потенциал грунтового движения

Собственно результирующее грунтовое движение по энергетическому потенциалу делится, в некоторой степени, условно на 2 группы: слабое движение от удаленного или слабого землетрясения и сильное движение от близкого или сильного землетрясения. Для оценки сейсмической опасности необходимо оперировать параметрами сильного грунтового движения [Попова, 1977; Idriss, Seed, 1968; Seed et al., 1988]. Для этого в отсутствие сильного землетрясения необходимо получать записи в ближней зоне землетрясения [Castellany, Petrini, 1973], т.к. пики ускорения с расстоянием сильно затухают [Fukushima, Tanaka, 1990].

Анализ данных таблицы 1.2 показывает, что близкое соседство с эпицентром, повышением значений ускорения не характеризуется [Акі, 1967].

Таблица 1.2. – Ускорение грунтов в ближней зоне землетрясения [Акі, 1967].]

№№, п/п	Землетрясение	Время события, год	Интенсивность, I, балл	Расстояние от эпицентра, r, миля	Максимальное ускорение, a[g]
1	Эль-Центр	1940	XI	4	0.33
2	Плотина Гувера	1948	VI	4	0.12
3	Холлистер	1951	VI	3	0.04
4	Хавтори	1952		5	0.03
5	Артвин	1953	V	1	0.06
6	Сузин Бэй	1955	VII	5	0.12
7	Плотина Хебгена	1958	IV	1	0.04
8	Холлистер	1960	VI	4	0.07
9	Лонг Бич	1961	IV	1	0.03
10	Мост Вилера	1963	VI	5	0.06

Ряд авторов, вообще, отрицает статистические различия между сильными и слабыми землетрясениями [Tocher, 1958; Tocher, Vakun, 1973]. На двух различных участках (Анкона) были получены записи землетрясений с магнитудой 3,4...4,5 и с максимальными ускорениями 0,2... 0,6 g. Традиционно считали, что применение ускорений представляет собой оптимальный вариант характеристики опасности землетрясений, поскольку позволяет определять силу воздействия. Использовались горизонтальные значения, хотя вертикальные ускорения так же значительны [Ohtahi, Kobayashi, 1990].

Впервые весьма высокие значения вертикальных ускорений до 1,3–1,4g были зарегистрированы в п. Газли (б. СССР, 1976). До этого было получено высокое горизонтальное ускорение в США 1,15–1,25 g (1971 г.).

Связь вариаций максимумов ускорений с разрушительным потенциалом характеризуется примером. При Мексиканском землетрясении 1985 г. с М 8.1 максимальное ускорение составило 0,17 g. Через 4 месяца в Огайо (США) произошло землетрясение с незначительными повреждениями. Грунтовое движение при этом в основании АЭС г. Перри в 17 км от эпицентра составило 0,18 g без повреждений и ощущений. Записи в Мехико-Сити свидетельствуют о длиннопериодном движении продолжительностью более 2 минут. В Перри зафиксирована короткопериодная запись в течение 1 с.

Эти факты говорят о том, что в качестве разрушительного потенциала можно вполне обоснованно использовать значение длительности движения грунта [Аптикаев, 1975; Заалишвили, 2000; Barnhar et al., 1979; Kiremidjian, Shah, 1980], увеличение которой при равных ускорениях повышает сейсмическую опасность.

Некоторые исследователи отмечают [Kiremidjian, Shah, 1980] независимость динамических коэффициентов усиления от ускорений грунта, основываясь на том, что хотя смещение и скорости частиц на рыхлых грунтах больше, чем на скальных, ускорения их совпадают.

Разрушительный потенциал ускорения на различных уровнях не одинаков [Fukushima, Tanaka, 1990], например, при ускорении 0.44 g наблюдались лишь слабые повреждения [Evernden et al., 1973; Omote, Yoshimura, 1973; Trifunac, 1973].

В последнее время увеличилось число использования в расчетах скорости колебаний грунтов, т.к. ее применение позволяет непосредственно оценивать кинетическую энергию, поглощаемую исследуемым объектом, причем приоритетную роль в повреждении зданий при низких частотах (ниже 2 Гц) играет ускорение.

Границу разделения слабых и сильных движений однозначно установить все еще не удастся. Если судить по шкале ММ, то с пятидесятих годов прошлого века величина пиков ускорений возросла в 5 раз [Поляков, 1978] и достигла для 7...9 баллов 0,1...0,55 g, соответственно. Анализ роли превышающих силу тяжести ускорений дает основание считать применение указанного параметра в сейсмостойком строительстве нецелесообразным.

Следует отметить, что хотя пиковые значения ускорений имеют важное значение для целей сейсмостойкого строительства, более реальным представляется применение некоторого эффективного его значения.

Для участка Пакойма эффективное ускорение было оценено в 0,75 g. Хаузнер [Ньюмарк, Розенблют, 1980] пришел к выводу, что максимальное ускорение грунта составляет 0,5 g. Теоретическими расчетами Амбрасейсом было определено, что возможны землетрясения с ускорением до 2 g.

Вообще, инженеры при обследовании эпицентральной зоны сильного землетрясения, как правило, приходили к выводу, что там должны быть высокие ускорения. До того, как появились первые записи ускорений сильных движений, по перемещениям предметов и др. способами устанавливались соответствующие ускорения (Таблица 1.3.).

Таблица 1.3. – Высокие значения грунтовых ускорений [Ambraseys, 1973]

№№ п/п	Землетрясение	Время события, год	Максимальное ускорение, a[g]
1	Неаполь	1857	0,3
2	Ахаия	1862	0,37
3	Мино-Авари	1891	0,43
4	Ассам	1897	0,42
5	Сан-Франциско	1906	0,2
6	Мессина	1908	0,2
7	Танго	1927	0,47

8	Огасима	1934	0,73
9	Нанкан	1946	0,47
10	Итачи	1949	0,95

При землетрясении в Ассаме (1897) ускорение превышало 0.42 g (табл. 1.3) и достигало 1.5 g [Ньюмарк, Розенблют, 1980]. Через 20 лет расчеты Амбрасейса подтвердились [Фремд, Штейнберг, 1973]. В Иране (1990) зарегистрированы пики ускорений 0,5 g, а в эпицентре 0.7 g [Moinfar, Naderzadeh, 1994]. Во время Хоккайдоского землетрясения (1993 г.), при магнитуде M 7.8 ускорение составило 0.4–0.9 g, а при афтершоке при магнитуде M 6.5 зарегистрировано ускорение 1.6 g, и при этом, вторая горизонтальная составляющая ускорения оказалась в 4 раза меньше – 0.4 g [Kudo, 1995].

Регистрация ускорения при Нортриджском землетрясении (1994) со значением 1.8 g подтвердила вывод об отсутствии резкой внешней границы шкалы ускорений [Finn Liam et al., 1994].

Практика свидетельствует, что при оценке сейсмической опасности определить силу воздействия одним, зависящим от магнитуды и эпицентрального расстояния, значением ускорения, нельзя. Так, повреждения зданий на участке с максимально высоким ускорением 1.6 g были незначительными [Kudo, 1995], что объяснено линейностью движения грунта.

При одинаковой магнитуде и расстоянии от эпицентра ускорения распределяются по нормальному логарифмическому закону. Непостоянство ускорения сильно влияет на значение вероятности превышения прогнозируемым ускорением заданного порога [Bender, 1984]. Следует отметить, что с точки зрения строительной инженерии особый интерес представляют частотные колебания грунтов в основаниях зданий [Поляков, 1978].

Как уже отмечалось выше, многие специалисты считают скорость более надежным показателем повреждаемости. К сожалению, ни один из параметров грунтового движения, даже скорость, не стала таким показателем. Различные измерения, основанные на комбинации параметров, характеризовались переменным успехом.

Как уже отмечалось выше, системным анализом 250 инструментальных записей установлено, что большая корреляция между началом повреждения и движением грунта устанавливается с помощью интенсивности Ариаса [Arias, 1970] или с помощью кумулятивной абсолютной скорости. Совпадение результатов определений происходит редко [Reiter, 1991], поэтому повреждение можно считать комплексной функцией амплитуды, частоты и продолжительности. В этих условиях правомерно использование параметра ранее введенного в практику сейсмического микрорайонирования. Таким параметром является площадь "реального" спектра [Заалишвили, 1995; Полтавцев и др., 1998].

]. Параметр доказал свою эффективность при использовании способа виброспектров на участках с различными инженерно-геологическими условиями и известной интенсивностью [Заалишвили, 1986; Исследование полей ..., 1989] сильных землетрясений.

ВЫВОДЫ

1. На основе анализа данных о землетрясениях установлена универсальность феномена влияния площадей нормализованного и реального спектров колебаний на интенсивность или энергию воздействия. Изменение их значений не зависит от типа мощности используемого источника. Определение показателей поглощения и нелинейности отличается простотой и точностью, что позволяет использовать данные существующих литературных источников и применять статистические апробированные результаты в практических целях [Заалишвили, 2000].

2. В результате анализа отмечено превышение частоты колебаний рыхлых (дисперсных) грунтов относительно скальных и сближение соответствующих площадей их реальных спектров. Установлено, что такое явление, как "перекачка" энергии в ВЧ область спектра обусловлена нелинейностью поведения упруго-вязкого грунта при сильных динамических воздействиях, а тенденция к уменьшению площади спектра колебаний связана с пределами поглощения энергии рыхлыми грунтами, приводящими к неупругим деформациям.

3. При интенсивных динамических нагрузках, наблюдаемые, т.н. аномалии в виде низкочастотности скальных и высокочастотности рыхлых (дисперсных) грунтов, а также превышения площади реальных спектров колебаний скальных грунтов над рыхлыми, объяснены с позиций нелинейно-упругого и нелинейно-неупругого деформирования.

4. При сильных динамических нагрузках площадь реальных спектров рыхлых грунтов имеет тенденцию к уменьшению, объясняемую ограниченностью возможности соответствующей физической системы поглотить увеличивающуюся энергию.

5. Приведены различные показатели грунта, связанные или могущие быть связанными с проявлением интенсивности землетрясения.

Возможность их использования должна быть проверена на практике. Сопоставление результатов с реальным макросейсмическим полем позволит выбрать наиболее надежный показатель или меру интенсивности.

ГЛАВА 2. СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ РАЗЛИЧНЫМИ СЕЙСМИЧЕСКИМИ ШКАЛАМИ. РАВНОМЕРНОСТЬ ШКАЛ

Адекватная оценка проявления тех или иных сильных землетрясений представляет собой одну из главных задач инженерной сейсмологии. В то же время, несмотря на имеющиеся достижения в этой области, отдельные аспекты указанной задачи все еще остаются неясными. Использование мировых баз данных сильных движений, содержащих инструментальные записи землетрясений, включает унификацию не только данных о землетрясениях, таких как магнитуда, но и макросейсмический эффект или проявленный сейсмический эффект, соответствующий записи, на той или иной конкретной площадке. Одними из самых всеобъемлющих баз данных являются японские базы данных K-NET и KiK-net.

2.1. Соотношения шкалы Японского метеорологического агентства (JMA) с другими сейсмическими шкалами

Определение сейсмических воздействий является актуальной задачей инженерной сейсмологии. Поскольку значения баллов непосредственно не используются в инженерных расчетах, требуются процедуры представления воздействий, соответствующих различным сейсмическим зонам. Пересчет баллов в ускорения по шкале MSK-64, используемой в СП 14.13330.2018, может приводить к заниженным значениям. Кроме того, при этом необходимо учитывать дополнительные факторы, такие как преобладающий период и длительность воздействия [Аптикаев, 2021]. Таким образом, даже построение карт в единицах ускорений не гарантирует точности оценки сейсмического эффекта, поскольку интенсивность является комплексной величиной. С одной стороны, есть запрос проектировщиков иметь четкие параметры сейсмических воздействий для расчетов зданий и сооружений, а с другой стороны, увязка этих параметров с макросейсмическими данными приводит к необходимости разработки инструментальной меры

сейсмической интенсивности, удовлетворяющей требованиям всех сторон процесса и отражающей происходящие физические процессы, причем, на основе современных инструментальных данных [Заалишвили и др., 2019б].

Необходимость пересчета сейсмической интенсивности JMA возникла в связи с разработкой инструментальной меры сейсмической интенсивности на основе записей баз данных сильных движений [Фидарова и др., 2023]. В Геофизическом институте ВНИЦ РАН еще в 2003 году по инициативе В.Б. Заалишвили была создана база данных сильных движений, включающая данные практически со всего мира (США, Япония, Тайвань, Греция, Армения, Грузия) [Заалишвили и др., 2002, 2013]. Для анализа собранного материала в процессе выполнения данной работы были отобраны записи землетрясений, зарегистрированных системой инструментальных наблюдений K-NET, созданной за один год, сразу после разрушительного землетрясения в Кобе (Япония, 1995) [Kinoshita, 2003; National Research ..., 2019]. База данных ГФИ ВНИЦ РАН, сформированная по записям данных сильных движений K-NET и другим записям сильных землетрясений, содержит более 80 000 записей на 1000 станций, расположенных на участках с различными грунтовыми условиями. Здесь интенсивность проявления по сейсмической шкале MSK меняется от 5 баллов и выше, начиная с мая 1996 г. по декабрь 2013 г. Кроме того, в базе данных содержатся записи землетрясений с малыми эпицентрными расстояниями от 0 до 3 км.

Различия в сейсмических шкалах, очевидно, связаны с различиями в типах застройки, культурными и историческими различиями, в целом, проявляющимися в различиях предметов быта, особенности движения которых, должны проявляться при сопоставлении описаний слабых воздействий. Также следует ожидать, что японская шкала JMA (шкала японского метеорологического агентства) имеет больше отличий по сравнению с остальными шкалами. Опираясь на работу [Musson et al., 2009] мы рассматривали шкалы семейства MSK, MMI и EMS как близкие. При этом известно, что между ними, тем не менее, имеются различия, главным

образом, в силу их большей или меньшей степени неравномерности в сравнении с инструментальными параметрами [Шебалин, 1975а; Аптикаев, Шебалин, 1988]. Так сейсмическая шкала JMA оказалась неравномерной и в настоящее время модернизируется: диапазоны соответствующие 5 и 6 баллам поделены пополам [Аптикаев, Эртелева, 2016]. Поэтому в первом приближении шкалы MMI (MCS), MSK можно принять равномерными, хотя их внутренняя неравномерность может достигать 0,2–0,3 балла [Аптикаев, Шебалин, 1988].

При этом сам анализ соотношений сейсмических шкал позволяет установить различные аспекты проявления макросейсмического эффекта с целью разработки более общей, равномерной и объективной шкалы. Также важен японский опыт разработки инструментальной шкалы JMA [Yamazaki et al., 1998], которая и представлена в современных японских базах данных сильных движений. Формальное применение процедуры расчета данной инструментальной интенсивности для землетрясений Калифорнии выполнено в работе [Shabestari, Yamazaki, 2001].

Пересчет интенсивности JMA в MSK (MMI). Итак, в уже отмеченной базе данных сильных движений приводится максимальная интенсивность в величинах японской шкалы. Для практического применения требуется пересчет в используемую шкалу MSK (и, соответственно, ШСИ-17).

Первое соотношение, которое могло быть получено для пересчета интенсивностей приводится в работе [Hirono, Sato, 1971] и основывается на связи интенсивности MMI с ускорением, опубликованной Гутенбергом и Рихтером в 1942 году [Gutenberg, Richter, 1942; Richter, 1958; Рихтер, 1963]:

$$\lg a = \frac{I_{MMI}}{3} - \frac{1}{2} \quad (2.1)$$

и интенсивности JMA с ускорением, полученной Кавасуми [Kawasumi, 1943]:

$$a = 0,8 \cdot 10^{(I_{JMA} - 0,5)/2}, \quad (2.2)$$

где ускорения a выражены в $\text{см}/\text{с}^2$.

Тогда соотношение между интенсивностью MMI и JMA, будет иметь следующий вид:

$$I_{MMI} = 1,5I_{JMA} + 0,5 \quad (2.3)$$

Данное выражение можно встретить в некоторых работах, в частности, в работе Э.Е. Хачияна [Хачиян, 2008].

Работой, в которой дается сопоставление сейсмических шкал MMI и JMA, а также первой сейсмической шкалы С.В. Медведева, известной, как сейсмическая шкала ГЕОФИАН, является отчет, выполненный по заказу Комиссии по атомной энергии США [Barosh, 1969]. Сопоставление было выполнено согласно описаниям шкал (Рисунок 2.1).

Позже, в работе японских исследователей [Hirono, Sato, 1971] было выполнено сопоставление оценок интенсивностей землетрясений, выполненных по обеим шкалам JMA и MMI. В 1964 году Межправительственное совещание ЮНЕСКО по сейсмологии и сейсмостойкости (Париж, 1964 г.) признало важность разработки единой международной шкалы интенсивности и рекомендовало временное применение сейсмической шкалы MSK 1964 г. К тому времени в Японии сейсмическая шкала JMA использовалась уже более 70 лет.

В 1967 году в Японии был начат проект, направленный на сравнительное наблюдение интенсивностей с помощью обеих сейсмических шкал, по данным 106 метеостанций Японского метеорологического агентства, которые были распределены по всем японским островам. Описание шкалы MSK-64 было переведено на японский язык, что позволило производить непосредственно оценку по каждой шкале. Для населения были созданы опросные листы. Необходимо отметить, что по странному стечению обстоятельств значимые колебания, традиционно активно ощущавшиеся на станциях, в 1967–1968 гг. не наблюдались. Но в последующие два года

наблюдались исключительно только сильные землетрясения ($M > 6.0$). Интенсивность MSK, по результатам обработки данных каждой опросной анкеты, определялась по 10 сильным землетрясениям, включая землетрясение Tokachi от 1968 года [Hirono, Sato, 1971].

В результате анализа были получены следующие выражения [Hirono, Sato, 1971]:

$$I_{MSK} = 1,5I_{JMA} + 1,5 \quad (2.4)$$

– для интенсивностей MSK от 3 до 5 баллов;

$$I_{MSK} = 1,5I_{JMA} + 0,75 \quad (2.5)$$

– для интенсивностей MSK от 5 до 8 баллов.

В работе [Wong, Trifunac, 1979] было выполнено сравнение оценок MMI и JMA со значениями максимальных ускорений, полученных идентичными акселерографами SMAC, и для диапазона интенсивностей MM от 4 до 8 баллов была получена следующая формула:

$$I_{MM} = 2,0I_{JMA} - 2,2 \quad (2.6)$$

Сопоставление с работой [Barosh, 1969], приведенное в оригинальной публикации, приведено на рисунке 2.2.

UNITED STATES Modified Mercalli (Wood and Newmann, 1931)	RUSSIA GEOFIAN (Medvedev, 1953)	JAPAN Japanese (Kawasumi, 1951)
I	I	0
II	II	I
III	III	
IV	IV	II
V	V	III
VI	VI	IV
VII	VII	V
VIII	VIII	
IX	IX	VI
X	X	
XI	XI	VII
XII	XII	

Рисунок 2.1. Соотношение между шкалами MMI, GEIOFIAN и JMA, приведенное в работе [Barosh, 1969]

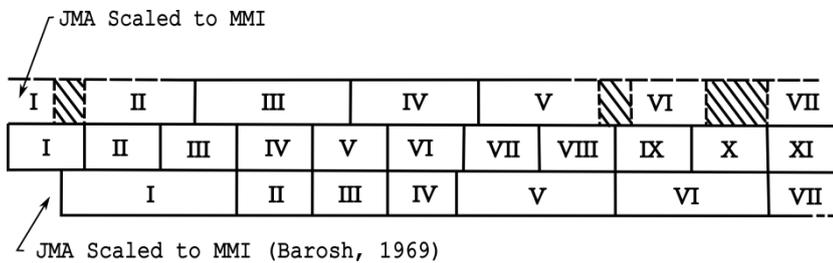


Рисунок 2.2. Сопоставление шкал MMI и JMA приведенное в работе [Wong, Trifunac, 1979]

Для пересчета в базе данных перевод в шкалу MSK был произведен по [Kramer, 1996], где было приведено (Рисунок 2.3) соответствие разных шкал по данным [Richter, 1958; Murphy, O'Brien, 1977].

MMI	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
RF	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X		
JMA	I		II	III	IV	V	VI	VII				
MSK	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII

Рисунок 2.3. Соответствие шкал измерения интенсивности сейсмического воздействия [Kramer, 1996]

В соответствии с работой [Kramer, 1996] перевод данных, определенных по шкале японского метеорологического общества (JMA), в шкалу MSK производился с использованием следующих коэффициентов – таблица 2.1. Данное соотношение использовалось при формировании базы данных Геофизического института [Заалишвили и др., 2002, 2013].

Таблица 2.1. – Коэффициенты перевода из шкалы JMA в MSK

JMA	MSK	Выражение перевода Conversion expression
0 – 0,2	0,5 – 1	$JMA * 2,5 + 0,5$
0,2 – 0,4	1 – 2	$JMA * 5 + 0,0$
0,4 – 1	2 – 3	$1.67 * JMA + 1,33$
1 – 4	3 – 6	$1.0 * JMA + 2,0$
4 – 7	6 – 12	$2.0 * JMA - 2,0$

В работе [Shabestari, Yamazaki, 2001] выполнено сравнение данных об интенсивности MMI записей землетрясений Калифорнии с

инструментальной шкалой JMA, и в результате анализа было получено выражение с достаточно высоким коэффициентом детерминации ($R^2 = 0,7$). При этом следует иметь в виду что оно получено для средних значений инструментальной интенсивности, соответствующих целым значениям MMI:

$$I_{MMI} = 1,95I_{JMA} - 2,91 \quad (2.7)$$

Соколовым и Фурумурой было получено соотношение между шкалами MMI и JMA на основе анализа 598 записей ускорений девяти землетрясений Японии с магнитудой от 6.3 до 8.0, полученных в 1999–2007 гг. [Sokolov, Furumura, 2008]:

$$I_{MMI} = 1,743I_{JMA} - 0,584 \quad (2.8)$$

В работе [Musson et al., 2009] рассмотрено соотношение основных современных шкал с EMS-98, в том числе, и современная версия шкалы JMA 1996 года. Отмечены отличительные особенности шкалы JMA. При интенсивности 3 шкалы JMA с одной стороны «большинство людей, находящихся в помещении, ощущают землетрясение, некоторые из находящихся вне помещений ощущают землетрясение, большинство из тех, кто спит, просыпаются», что соответствует 5 EMS («ощущается большинством людей в помещениях, вне помещений только немногими, многие спящие люди пробуждаются, некоторые испуганы»), но при этом интенсивность 3 является также порогом, при котором начинается реакция легких предметов – «посуда на полках иногда издает какой-то звук» (дословный перевод), что соответствует интенсивности 4 EMS – «окна и двери скрипят, дребезжит посуда», а иногда и 3 EMS – «находящиеся в покое в помещении люди ощущают раскачивание или легкое дрожание». В шкале MSK «дребезжание окон, стекол шкафов, посуды» наблюдается при 4 баллах (включающих также такие эффекты, как «легкий скрип полов и стен; заметно легкое колебание жидкости в открытых сосудах»). Шкала JMA необычна тем, что имеет нулевую степень – землетрясение не ощущается, в

большинстве шкал это соответствует интенсивности равной единице. В версии 1996 года количество степеней было увеличено с семи до девяти путем деления интенсивности 5 на две категории «5L» и «5U», и аналогично для интенсивности 6. В настоящее время шкала JMA используется путем преобразования инструментальных параметров движения грунта в значения псевдоинтенсивности [Yamazaki et al., 1998]; поэтому неизвестно, соответствует ли указанное значение интенсивности землетрясения описанию эффектов для этой степени наблюдаемого масштаба или нет.

По результатам анализа различных шкал в работе [Musson et al., 2009] приводится соотношение различных сейсмических интенсивностей с EMS-98 – таблица 2.2. Большинство шкал имеют максимальную степень, которая в той или иной форме определяется как «все разрушено». Смысл этого неоднозначен и зависит от состояния застройки, поэтому полное разрушение может произойти при меньших значениях интенсивности. В таких случаях шкалы интенсивности насыщаются при значении около 9 EMS. Это особая проблема со шкалой Росси-Форея (RF), в которой присутствует скачкообразное изменение повреждений от умеренного при 9 RF до полного разрушения при 10 RF. Дополнительные признаки, не связанные с повреждениями зданий, например, крупномасштабные изменения ландшафта, проявляются только при максимальных воздействиях и не позволяют определить степень интенсивности при сопоставлении шкал. Так, согласно таблице 2.2 в большинстве случаев высшая степень старых шкал не определена с точки зрения EMS (но может предполагаться высокой). Вопрос не является критическим, поскольку эти высшие степени разрушений редки, если вообще когда-либо, используются на практике [Musson et al., 2009].

Таблица 2.2. – Рекомендации по переходу с пяти основных шкал на EMS-98, приведенные в работе [Musson et al., 2009]

R	EMS- F 98	MC S	EMS-98	MMI 56	EMS-98	MS K	EMS- 98	JMA- 96	EMS- 98
								0	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	2 or 3
2	2	2	2	2	2	2	2	2	4
3	3	3	3	3	3	3	3	3	4 or 5
4	4	4	4	4	4	4	4	4	5
5	5	5	5	5	5	5	5	5L	6
6	5	6	6	6	6	6	6	5U	7
7	6	7	7	7	7	7	7	6L	8
8	7 or 8	8	8	8	8	8	8	6U	9 or 10
9	9	9	9	9	9	9	9	7	11
10	- ^a	10	10	10	10	10	10		
		11	11	11	- ^a	11	11		
		12	- ^a	12	- ^a	12	- ^a		

-^a интенсивность определяется на основе признаков, которые не отражают силу воздействия или достигают насыщения

Для определения соотношений по схематичным (Рисунок 2.3) и табличным (Таблица 2.2) данным нами рассматривались границы баллов каждой шкалы как промежуточное значение ± 0.5 соответствующего целого балла. Этот метод был применен для данных, приведенных в [Barosh, 1969; Kramer, 1996; Musson et al., 2009]. В последнем случае, для уточненной шкалы JMA-96, значениям 5L и 5U приписывались значения 5.25 и 5.75, предполагая равномерность шкалы в пределах каждого балла и аналогично для 6L и 6U.

На рисунке 2.4 приведено сопоставление всех рассмотренных зависимостей интенсивности MSK от JMA.

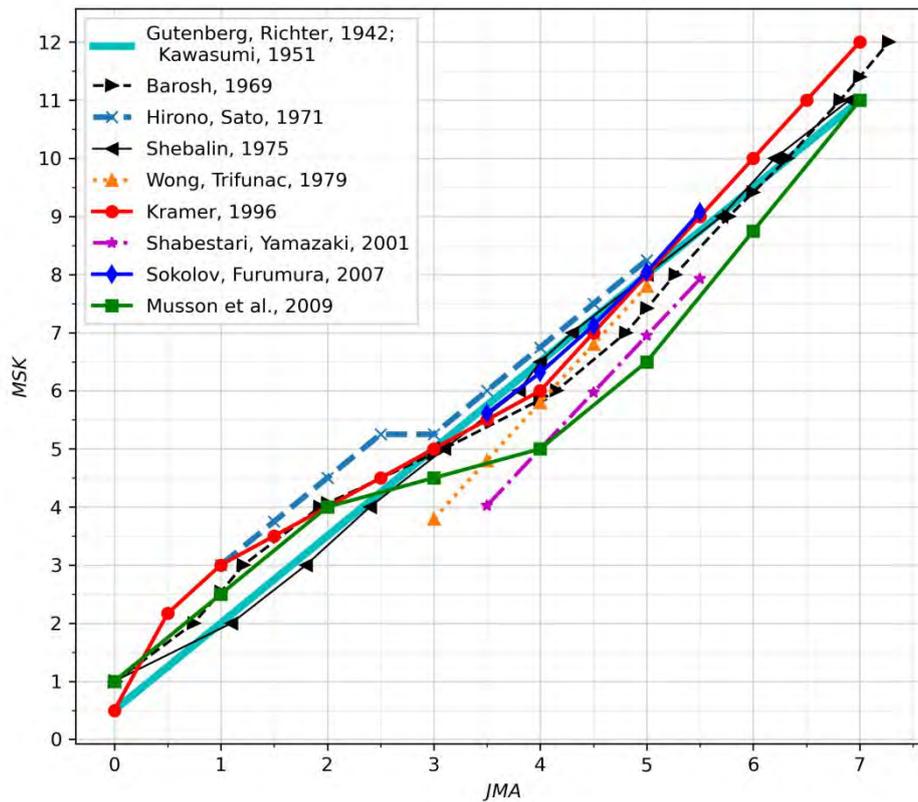


Рисунок 2.4. Пересчет интенсивности JMA в MSK по различным источникам

Соответствие шкал MMI и MSK согласно таблице 2.3 позволяет использовать приведенные выше зависимости, полученные для MMI, непосредственно для оценки интенсивности по шкале MSK. Необходимо отметить, что для строк 2, 4, 9 нами были впервые получены выражения, по приведенной методике, для перевода данных из одних шкал в другие [Заалишвили и др., 2024a]. В строке 6 приведено выражение, полученное ранее [Заалишвили и др., 2002]. Выражения для перевода, приведенные в строках 1,3,5,7,8 таблицы 2.3, получены соответствующими авторами. В связи с тем, что с практической точки зрения нам необходимы исключительно сильные движения (использование базы данных K-NET для задания сейсмических воздействий), все соотношения приведены для интенсивности более 6 MSK.

Таблица 2.3. – Соотношения между шкалами MSK (MMI, EMS) и JMA для сильных землетрясений ($MSK \geq 6$)

	Источник /Source	Соотношение интенсивности JMA с MSK (MMI) ≥ 6 / Relation of JMA with MSK, (MMI) ≥ 6	Использованные методы /used methods
1.	Gutenberg, Richter, 1942; Kawasumi, 1951	$I_{MM} = 1,5I_{JMA} + 0,5$	Через выражения для PGA, полученные для каждой шкалы Through expressions for PGA obtained for each scale
2.	Barosh, 1969	$I_{MM} = 1,95I_{JMA} - 2,24$ (interpolation, [Заалишвили и др., 2024a])	Сопоставление описаний шкал Comparison of scale descriptions
3.	Hirono, Sato, 1971	$I_{MSK} = 1,5I_{JMA} + 0,75$	Одновременная оценка проявления землетрясения двумя шкалами Simultaneous assessment of earthquake manifestations using two scales
4.	Шебалин, 1975	$I_{MSK} = 1,58I_{JMA} + 0,12$ (interpolation, [Заалишвили и др., 2024a])	Прямое сравнение текста шкал, метод анализа относительных площадей изосейст Direct comparison of scale text, method of analysis of relative isoseismal areas
5.	Wong, Trifunac, 1979	$I_{MM} = 2,0I_{JMA} - 2,2$ $4 \leq MMI \leq 8$	Сопоставление PGA PGA matching
6.	Kramer, 1996, after Richter (1958) and Murphy and O'Brien (1977)	$I_{MSK} = 2,0I_{JMA} - 2,0$ (interpolation [Заалишвили и др., 2002])	Сопоставление описаний шкал Comparison of scale descriptions
7.	Shabestari, Yamazaki, 2001	$I_{MM} = 1,95I_{JMA} - 2,91$ $4 \leq MMI \leq 8$	Применение методики инструментальной шкалы JMA к записям, для которых известны MMI (105 записей землетрясений Калифорнии) Application of the JMA instrumental scale technique

			to records for which MMIs are known (105 California earthquake records)
8.	Sokolov, Furumura, 2008	$I_{MMI} = 1,743 I_{JMA} - 0,584$ MMI > 5.5	Анализ записей ускорений (598 записей ускорений девяти землетрясений Японии с магнитудой от 6.3 до 8.0, 1999-2007) Analysis of acceleration records (598 records of accelerations of nine Japanese earthquakes with magnitudes from 6.3 to 8.0, 1999-2007)
9.	Musson et al., 2009	$I_{MMI} = 2,25 I_{JMA} - 4,75$ (interpolation, [Заалишвили и др., 2024a])	Сопоставление описаний шкал Comparison of scale descriptions

2.2. Способы пересчета сейсмической интенсивности

В результате исследования можно выделить несколько способов пересчета сейсмических интенсивностей:

1. Сопоставление описаний сейсмических шкал [Barosh, 1969; Шебалин, 1975б; Kramer, 1996; Musson et al., 2009]. Здесь во многом результат зависит от опыта, а интерпретация носит авторский характер, как, например, это принято при создании геологических карт. При этом достаточно сложно оценить точность результатов. Для формализации процедур пересчета использовались схемы, приведенные в соответствующих публикациях. Для диапазона $MSK \geq 6$ выполнена интерполяция. Коэффициент перед JMA имеет значительный диапазон значений – от 1,58 до 2,25.

2. Сопоставление зависимостей инструментальных параметров от интенсивности, в первую очередь, ускорений [Wong, Trifunac, 1979]. Первый вариант такого пересчета можно сделать по данным [Gutenberg, Richter, 1942]

и [Kawasumi, 1951]. Отдельно следует отметить расчет инструментальной интенсивности JMA по записям, для которых имелись значения интенсивностей MMI [Shabestani, Yamazaki, 2001] и других инструментальных мер сейсмической интенсивности [Sokolov, Furumura, 2008]. Коэффициент перед JMA по разным источникам составляет 1,5, 2,0 и 2,25.

3. Оценка макросейсмического эффекта по обеим шкалам по данным происшедших землетрясений по соответствующим методикам для обеих шкал [Hirono, Sato, 1971]. Коэффициент перед JMA составил 1,5.

4. Следует отметить принцип сравнения радиусов последовательных изосейст или площадей последовательных изосейст. Данный метод представлен исключительно в отечественных работах [Шебалин, 1975а; Ершов, Шебалин, 1984; Аптикаев, Шебалин, 1988] и основан на сопоставлении уравнения макросейсмического поля, построенного для данной шкалы. Подход позволяет непосредственно оценить равномерность шкалы, определяющую возможности ее применения для вычисления приращений интенсивности.

В результате сопоставления выражений пересчета интенсивностей, не обнаруживается каких-либо специфичных для каждого метода значений масштабирующего коэффициента. В целом для землетрясений интенсивностью $MSK \geq 6$ коэффициент соответствует 2.

Следует отметить, что мы использовали регрессионные соотношения, выполнив привязку целых и дробных баллов к значениям шкал. Поскольку интенсивность является интегральной характеристикой сейсмических эффектов, она как раз часто выражается в практике написания интенсивности римскими цифрами, чтобы подчеркнуть, что они целые и неделимые [Musson et al., 2009]. В то же время, иногда отмечается практика добавления десятичных знаков к арабским цифрам после интенсивности, записанной римскими цифрами (например, в работе [Klugel, 2005]). Современная тенденция состоит в том, чтобы записывать интенсивности арабскими

цифрами, поскольку с ними легче работать, но они, тем не менее, являются целочисленными классами. Следует отметить, что эти ограничения применимы к интенсивности, оцениваемой на основе наблюдений, а не к прогнозируемой интенсивности, выведенной из модели. Именно изучение макросейсмических эффектов по радиусам или площадям различных зон позволяет установить близость этих двух величин [Шебалин, 1975б].

В идеале преобразование вообще не должно производиться. Правильная и лучшая процедура – вернуться к исходным данным и переназначить значения в выбранной шкале интенсивности [Ambraseys et al., 1983; European Macroseismic ..., 1998]. Зачастую это невозможно потому, что исходных данных больше не существует. В таких случаях необходима некоторая форма преобразования. В этой связи физическое обоснование меры сейсмической интенсивности должно позволить производить более точный пересчет сейсмических интенсивностей между различными шкалами. Единственной работой, в которой независимо по обоим шкалам оценивался исходный материал, является работа [Hirono, Sato, 1971] и где достаточно представительный материал отсутствует.

Пример соотношений между одними шкалами позволяет проводить сопоставление для других шкал. Следует особо отметить, что здесь мы предполагаем совпадение шкал MSK, MMI и EMS, что отражено в работе Муссона [Musson et al., 2009]. Более детальное сопоставление шкал может быть выполнено при переходе к шкалам нового поколения, в которых выполнено деление на объекты-индикаторы и описаны их реакции, как это сделано в ШСИ-2017 [ГОСТ Р 57546-2017]. При этом шкалы могут отражать региональные особенности строительства – различные типы конструкций характерных для той или иной территории и предметов быта. Данные шкалы ШСИ-2017 могли бы быть дополнены объектами-индикаторами, на основе эмпирических данных и данных моделирования, что позволит выполнить сопоставление различных шкал на основе сравнения эффектов, как в первом варианте введенной классификации. Но это сравнение выполнить

количественно с возможностью оценки точности результатов, что в дальнейшем может послужить основой для разработки универсальной международной шкалы сейсмической интенсивности.

Здесь также следует иметь в виду, что тот или иной индикатор качественно может проявляться в разных диапазонах интенсивностей, в зависимости от частоты воздействия. Данные наблюдений в совокупности реакций различных объектов позволили бы повысить точность макросейсмических обследований и точность прогнозов и оценки рисков.

2.3. Равномерность шкал. Обоснование использования дробных значений сейсмической интенсивности

Современные требования сейсмостойкого строительства требуют большей детализации оценок воздействий и уже приводят к использованию в практике дробных значений баллов сейсмической интенсивности. Однако такое представление предполагает равномерность изменения «воздействия», или иными словами – «макросейсмическая шкала должна являться не шкалой порядка, а шкалой интервалов» [Ершов, Шебалин, 1984]. Общая неравномерность шкал балльности и, возможно, в большей степени MMI отмечается в работах [Шебалин, 1975а; Аптикаев, Шебалин, 1988]. Сопоставление шкал MSK (шкала Медведева, ГЕОФИАН) и MMI по разным источникам представлено на рисунке 2.5.

Следует иметь в виду, что в работе [Barosh, 1969] выполнялось сопоставление версий шкал Меркалли и Медведева, действовавших на тот момент, и которые многократно дорабатывались в дальнейшем. Тем не менее, в целом наблюдается соответствие с данными, приведенными позднее в [Kramer, 1996]. На рисунке 2.5 также приводится соотношение между шкалой MSC, используемой на тот момент для оценки макросейсмического эффекта и «равномерной шкалой», полученное по материалам 29 землетрясений Македонии Н.В. Шебалиным [Шебалин, 1975а,б]. На основе анализа этих данных можно утверждать, что шкала MSK является наиболее

близкой к равномерной шкале. Также отмечается несоответствие всех шкал при максимальных значениях интенсивности. На наш взгляд здесь нет необходимости приравнять максимальные значения интенсивностей по разным шкалам, а продолжить полученный тренд для интенсивностей, близких к границам шкал.

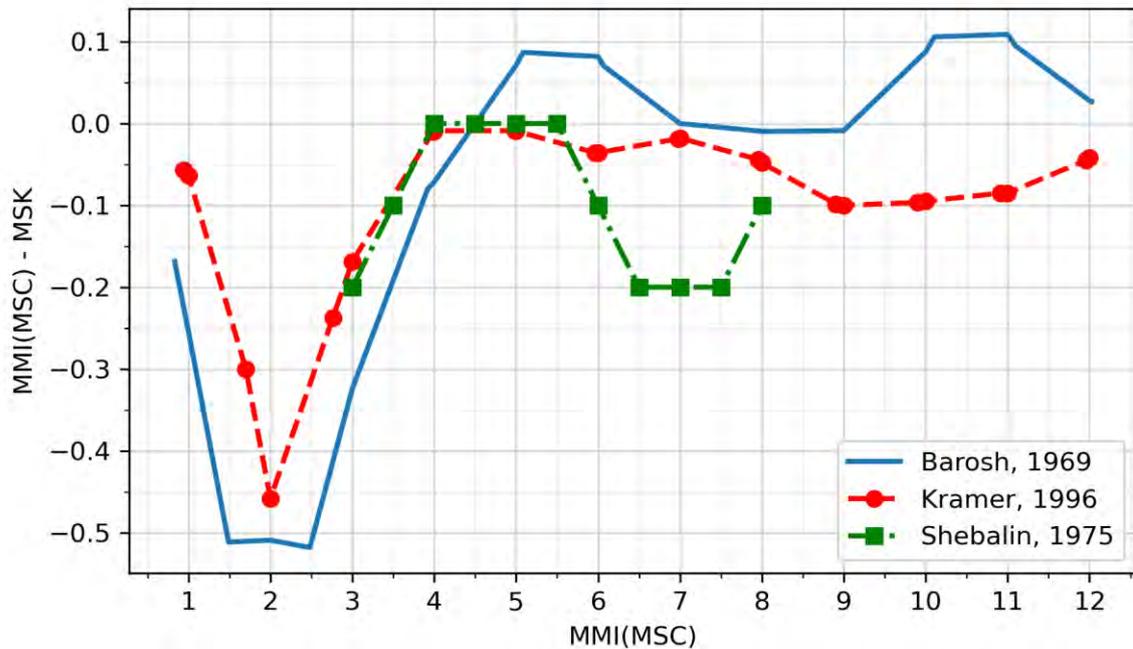


Рисунок 2.5. Соотношение между шкалами MMI и MSK по данным [Barosh, 1969; Kramer, 1996] и «равномерность» шкалы MCS (MMI) по материалам землетрясений Македонии [Шебалин, 1975а]

«Цифровизация» шкал также позволяет приблизиться к установлению связи макросейсмической интенсивности и параметров сейсмического воздействия. И здесь полезен опыт инструментальной шкалы JMA, поскольку учитывает продолжительность и спектральные особенности воздействия. Формальное применение этой шкалы к другой территории, как это сделано в работе [Shabestani, Yamazaki, 2001] не даст объективного результата, т.к. здесь стоит задача определения частотного фильтра для той или иной территории. Однако практическое использование данной методики является достаточно трудоемким и явно не отражает реальные физические процессы и она не нашла распространения. Инструментальную меру JMA

полученную для территории Японии, по представительному набору инструментальных данных для территории Японии, можно считать соответствующей одноименной макросейсмической интенсивности JMA и в первом приближении использовать для разработки инструментальной меры сейсмической интенсивности по базам данных Японии. Для понятного и практически ценного результата (который можно будет верифицировать по всемирным данным) удобно использовать макросейсмическую интенсивность MSK (современный ШСИ-2017), которая является более равномерной.

ВЫВОДЫ

1. Выполнен анализ известных способов получения соотношений между различными сейсмическими шкалами мира. Установлены неравномерности указанных сейсмических шкал, обусловленные особенностями реакции объектов-индикаторов. Выявлены наиболее обоснованные соотношения для пересчета величин интенсивностей, полученных в различных диапазонах сейсмической шкалы JMA, в величины сейсмической шкалы MSK или MMI (США, Европа).

2. Анализ многочисленных имеющихся работ показывает различия в зависимостях, порой достигающих двух баллов. Наибольшей неравномерностью шкала JMA обладает в интервале интенсивностей от 4 до 6 MSK, однако, можно отметить, что в диапазоне $MSK > 6$ зависимость между шкалами JMA и MSK можно считать линейной, при этом угол наклона, определенный по разным источникам примерно одинаков и равен 2. Для верхней границы шкал предлагается продолжить данный тренд, поскольку признаки, основанные на повреждении и разрушении зданий достигают насыщения, а также в силу особенностей развития шкалы JMA, поскольку верхний предел повышался после более разрушительных землетрясений и фактически максимум не определен [Musson et al., 2009].

3. Сопоставление соотношений между шкалами семейства Меркалли (MMI) и Медведева (MSK), полученными различными авторами [Barosh, 1969; Kramer, 1996] с данными Шебалина по распределению изосейст землетрясений Македонии [Шебалин, 1975б], позволяет сделать вывод, что шкала MSK, современной версией которой является действующий стандарт ШСИ-2017, характеризуется высокой равномерностью разметки, что определяет физическую обоснованность закономерностей, получаемых на ее основе, и обуславливает выбор шкалы в качестве основы для разработки инструментальной меры интенсивности («обучение с учителем»).

ГЛАВА 3. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЗАПИСЕЙ КОЛЕБАНИЙ ГРУНТОВОЙ ТОЛЩИ

3.1. Макросейсмическая интенсивность и показатели инструментальных записей

Макросейсмическая интенсивность представляет собой локальную меру сотрясения грунта при землетрясении, соответствующую реакции различных объектов (зданий и сооружений) в виде повреждений различной степени. Оценка сейсмической интенсивности является мерой эффекта воздействия сейсмических колебаний на различные объекты, и, в первую очередь, на здания и сооружения, последствия которых приводят к разрушениям и соответствующим ущербам. В связи с чем, макросейсмическая интенсивность является параметром, напрямую оценивающим сейсмические риски (как статистические распределения степени и количества повреждений зданий различного типа) [Gutenberg, Richter, 1956; Trifunac, Brady, 1975; Wald et al., 1999; Musson et al., 2009; Caprio et al., 2015; Zaalishvili et al., 2020a].

Известно множество различных сейсмических шкал и, при этом, наиболее часто используемыми из них являются: шкала MSK-64 и ее актуализированная версия ШСИ-17, модифицированная шкала интенсивности Меркалли (MMI), Европейская макросейсмическая шкала (EMS), шкала интенсивности Японского метеорологического агентства (JMA) и Китайская шкала макросейсмической интенсивности (CMSIS) [Musson et al., 2009; Caprio et al., 2015; Sun et al., 2019; Du et al., 2018]. Большинство шкал имеет двенадцать уровней от I до XII, но соответствующие значения пикового ускорения грунта (PGA) и пиковой скорости грунта (PGV) в шкалах значительно различаются между собой [Sun et al., 2019; Du et al., 2018]. Одна из основных причин этого различия заключается в том, что пиковые параметры движения грунта характеризуются сильной региональной зависимостью, в том числе от

механизма источника сейсмического разлома, скоростных структур слоев земной коры и почвы и локальных условий в различных регионах. Это обуславливает различие в уравнениях прогнозирования движения грунта или уравнениях макросейсмической интенсивности для обоих типов макросейсмической шкалы. Таким образом, собственные региональные регрессионные модели для макросейсмической шкалы создаются в разных странах и регионах, например, в Калифорнии, восточной части Северной Америки, Италии, Греции, Японии, да и в России (напр., Дальний Восток и Северный Кавказ). Другая основная причина заключается в том, что исследованные макросейсмические шкалы, в первую очередь, основаны на оценках повреждений зданий и сооружений, которые также могут сильно отличаться. В то же время, инструментальные величины сейсмической интенсивности, рассчитанные на основе регрессионных моделей, могут обеспечить быстрое получение отчетов об интенсивности проявленных сейсмических воздействий после разрушительного землетрясения. Для этого предполагается доступность записей колебаний грунта, полученных с помощью приборов для сейсморазведки и сильных колебаний грунта. Система ShakeMap в Калифорнии и Италии, а также система оперативной отчетности JMA о сейсмической интенсивности в Японии основаны на инструментальной сейсмической интенсивности.

Традиционно сейсмические воздействия в практике сейсмостойкого строительства оцениваются величиной пикового горизонтального ускорения грунта. Такой подход, являясь простым и удобным для практического использования, отражен в строительных нормах для сейсмостойкого проектирования и строительства в сейсмически опасных районах большинства стран мира.

Движение грунта, вызванное землетрясением, является сложным, и для количественного отражения характеристик движения грунта используется несколько параметров, а не один параметр. Амплитуда, частотный состав и продолжительность являются наиболее важными характеристиками в

воззрениях инженерного сообщества [Kramer, 1996; Karimzadeh, Askan, 2021]. Инструментальные значения сейсмической интенсивности для ускорения определены из регрессионных моделей для многих регионов в первую очередь, с целью быстрой оценки интенсивности сейсмических воздействий после разрушительных землетрясений (например, система ShakeMap в Калифорнии). Много моделей построено также для пиковой скорости. В зависимости от категории объектов в специальных Нормах используются скорости и смещения. В американской ShakeMap инструментальной оценке используются статистические данные для ускорений, скоростей и смещений в зависимости от их интенсивности [Wei et al., 2014]. Очевидно, что каждый из этих показателей «работает» в разных диапазонах в силу различного частотного состава колебаний. Следующим типом показателя интенсивности грунтов являются спектральные параметры. Так, в работе [Campbell, Bozorgnia, 1994], рассмотрена интенсивность Ариаса и кумулятивная абсолютная скорость. Тот факт, что одному и тому же значению сейсмической интенсивности соответствует большой разброс значений максимальных ускорений, известен давно [Шебалин, 1975б]. Японские ученые [Karim, Yamazaki, 2002] исследовали связь макросейсмической интенсивности шкалы JMA с пиковыми ускорениями, скоростями и спектральной интенсивностью (SI). В работе [Constantin et al., 2021] приводятся корреляционные соотношения между макросейсмической интенсивностью и пиковыми значениями ускорения (PGA) и скорости (PGV) колебаний для землетрясений зоны Вранча. В работе [Androutselis et al., 2020] были исследованы различные параметры для оценки повреждения мостовых сооружений.

В последние годы делаются попытки при расчетах зданий и сооружений на сейсмические воздействия использовать величины скоростей колебаний грунтов, что, по мнению инженеров, позволяет непосредственно учитывать кинетическую энергию, воздействующую и поглощаемую исследуемым объектом. Следует отметить, что и величина скорости не

характеризуется высокой надежностью в качестве показателя потенциала «повреждаемости». Следует отметить, что не особенно надежна и т.н. «интенсивность Ариаса», которая установлена на основе анализа 250 записей сильных грунтовых движений [Габеева, Бурдзиева, 2008; Уздин и др., 2008].

Очень часто, поврежденные или, тем более, разрушенные в результате землетрясения здания, априори, связывают с результатами низкого качества строительства. При этом, часто не обращают внимания на другие не менее важные факторы, которые определяют интегральный эффект сейсмического воздействия (тип здания, грунтовые условия, эпицентральное расстояние, спектральный состав приходящего воздействия, длительность процесса, резонансные явления и т.д.). Другими словами, при анализе последствий сильных и разрушительных землетрясений необходимо учитывать многофакторность влияния процесса землетрясения на застройку. Становится неясным, что определяет сейсмостойкость сооружения или какой параметр воздействия определяет его сейсмический эффект и является наиболее важным для адекватной оценки сейсмостойкости застройки.

Поскольку величина PGA, несмотря на изложенное выше, является основополагающей в сейсмическом зонировании параметров движения грунта и сейсмическом проектировании зданий и сооружений, в первую очередь, именно связь между PGA и интенсивностью была проанализирована и установлена [Gutenberg, Richter, 1956; Trifunac, Brady, 1975; Wald et al., 1999; Du et al., 2018; Kaka, Atkinson, 2004; Tselentis, Danciu, 2008; Faenza, Michelini, 2010; Karim, Yamazaki, 2002; Worden et al., 2012; Bilal, Askan, 2014; Panza et al., 1997]. Параметр PGV (пиковая скорость) более показателен для повреждений от землетрясения в более гибких конструкциях, и модели линейной регрессии генерируются на основе PGV [Gutenberg, Richter, 1956; Trifunac, Brady, 1975; Wald et al., 1999; Du et al., 2018; Kaka, Atkinson, 2004; Tselentis, Danciu, 2008; Faenza, Michelini, 2010; Karim, Yamazaki, 2002; Worden et al., 2012; Bilal, Askan, 2014; Panza et al., 1997; Wu et al., 2003; Akansel et al., 2014]. Wald et al. [1999] установили, что значения

интенсивности, рассчитанные с помощью PGV, были надежнее, чем значения, основанные на PGA, если фактическая сейсмическая интенсивность была не ниже VII баллов. Akansel et al. [2014] заявили, что связь сейсмической шкалы MMI с PGA или PGV зависит от прочности грунтов. Bilal и Askan [2014] пришли к выводу, что MMI имеет лучшую линейную корреляцию с PGA для жесткой структуры и с PGV – для пластичной структуры. Помимо PGA и PGV, для установления взаимосвязей также используются другие параметры движения грунта. Поскольку реакция грунтов оснований определяется из спектра реакции на ускорение, величина интенсивности спектра ускорения использовалась Тонгом и Ямазаки [Tong, Yamazaki, 1995] и Каримом и Ямазаки [Karim, Yamazaki, 2002], и они оба обнаружили, что интенсивность спектра ускорения имеет более высокий коэффициент корреляции, чем PGA и PGV. Интенсивность спектра скоростей также использовалась для установления взаимосвязей [Housner et al., 1953; Chiauzzi et al., 2012]. Shabestari and Yamazaki [2019] получили эквивалентное пиковое ускорение по трехкомпонентным ускорениям, прошедшим полосу, и получили новое соотношение между шкалой интенсивности JMA и полученным ускорением. Эта взаимосвязь реализована в системе оперативной отчетности JMA о сейсмической интенсивности. Другие параметры движения грунта, такие как продолжительность движения грунта [Masi et al., 2020], кумулятивная абсолютная скорость [Rathje et al., 1998] и интенсивность Ариаса [Silva et al., 2017], также были введены для создания взаимосвязей с MSI. Каждый параметр движения грунта в определенных случаях имеет свое преимущество перед другими. Например, PGA и интенсивность спектра ускорения являются лучшими параметрами для оценки более низких интенсивностей, а PGV и интенсивность спектра скоростей являются лучшими параметрами для оценки более высоких интенсивностей. Следует отметить, что приведенные выше выводы основаны на методе линейной регрессии. Если для установления связи используется другой метод нелинейной регрессии, результаты могут быть другими. Метод

линейной регрессии позволяет обрабатывать несколько переменных, используя обычный метод наименьших квадратов или взвешенный метод наименьших квадратов, но результаты регрессии показывают большой разброс из-за двух основных проблем. Одна из основных проблем заключается в том, что истинная связь состоит в том, что имеется не только линейная зависимость от каждой переменной, но и могут появиться перекрестные связи нескольких переменных. Например, McCann [McCann et al., 1980] добавил квадратичные члены в уравнение регрессии. Истинная связь сложна и нелинейна, а линейная регрессия не всегда годится для обработки скрытых нелинейных перекрестных условий. Например, Альварез и др. [Alvarez et al., 2012] использовали нейронные сети для установления сложных и нелинейных взаимосвязей.

Цель работы – разработка физически обоснованного параметра (или параметров) сейсмического воздействия, который может успешно быть использован проектировщиками и специалистами в области сейсмостойкого строительства для расчетов зданий и сооружений.

Таким образом, устанавливается связь макросейсмической интенсивности с параметрами сейсмических записей. Введение надежного энергетического показателя позволит обосновать и повысить точность пересчета сейсмических интенсивностей, выраженных в различных шкалах, повысить точность предварительных оценок сейсмической интенсивности по инструментальным данным.

Анализ указанных данных позволит установить тенденции корреляционных связей между параметрами грунтового движения. В частности, рассмотреть показатели потенциала «повреждаемости» объекта и их связь с уровнем проявленной интенсивности или сейсмическим эффектом землетрясений. В качестве таких параметров рассматривались следующие параметры:

1. Кумулятивный квадрат ускорений (модифицированная интенсивность Ариаса, отличается отсутствием множителя $\pi/2g$ [Arias, 1970]):

$$I_A = \int_0^{t_d} a(t)^2 dt, \quad (3.1)$$

$a(t)$ – акселерограмма;

t_d – эффективная продолжительность землетрясения.

2. Кумулятивная абсолютная скорость [Reed, 1990]:

$$I_V = \int_0^{t_d} a(t) dt \quad (3.2)$$

3. Индекс интенсивности Анга [Ang, 1990]:

$$I_C = (a_{rms})^{3/2} t_d^{1/2}, \quad (3.3)$$

a_{rms} – среднеквадратическое ускорение:

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t_d} \int_0^{t_d} a(t)^2 dt}.$$

4. Мера Fajfar [Fajfar, 1995]:

$$I_F = PGV t_d^{1/4} \quad (3.4)$$

PGV – пиковая скорость

5. Интенсивность Хаузнера [Housner, 1959]:

$$I_H = \int_{0.1}^{2.5} S_v(T) dT \quad (3.5)$$

$S_v(T)$ – спектр псевдоскорости (демпфирование $\xi = 5\%$),

T – период.

6. Индекс полной входной энергии:

$$E_j = \int_0^{t_d} a(t)v(t)dt, \quad (3.6)$$

$a(t)$ – ускорение, $v(t)$ – скорость.

7. Площадь реального спектра колебаний [Заалишвили, 1986]:

$$S_r = \int A(f)df \quad (3.7)$$

8. Средневзвешенная частота колебаний [Заалишвили, 1986]:

$$f_{av} = \frac{\int A(f) \cdot fdf}{\int A(f)df} \quad (3.8)$$

9. Преобладающий период колебаний [Rathje et al., 1998]:

$$T_m = \frac{\int A(f)^2 \cdot Tdf}{\int A(f)df} \quad (3.9)$$

3.2. Корреляция между величиной макросейсмической интенсивности и показателями инструментальных записей Гаубанского землетрясения 2000 г. и Тбилисского землетрясения 2002 г.

Для оценки воздействий в ближней зоне землетрясений требуются инструментальные записи. И, хотя в мире в силу развития сетей сильных движений накоплено много записей, на Кавказе имеются только отдельные записи сильных движений [Чотчаев и др., 2019]. В этой связи представляется интересным рассмотреть записи, землетрясений, полученных в 2000, 2002 гг. на территории г.Тбилиси. Проявление землетрясений было детально изучено, и записи подкрепляются макросейсмическими данными, которые позволяют выполнить надежное сопоставление макросейсмической интенсивности проявления землетрясений с соответствующими инструментальными данными [Заалишвили и др., 2022б].

3.2.1. Макросейсмические и инструментальные данные проявления землетрясений различной интенсивности на территории г. Тбилиси

В апреле 2002 г. на территории г. Тбилиси весьма неожиданно произошли т.н. Тбилисские апрельские землетрясения. Как и при предыдущем Гоубанском землетрясении, которое произошло 14 декабря 2000 г., при указанных землетрясениях ощущались сильные вертикальные толчки. Население кавказского региона, характеризующегося умеренной сейсмической активностью и, в частности, Тбилиси, как правило, наиболее часто ощущает проявления относительно удаленных землетрясений, которые характеризуются преобладающим горизонтальным движением (Боржоми, 1970; Дагестан, 1970; Дманиси, 1978; Гавази, 1981; Спитак, 1988; Рача, 1991; Барисахо, 1992 и т.д.). В частности, землетрясение 14 декабря 2000 г. имело эпицентр в окрестностях с. Гоубани и характеризовалось в эпицентре интенсивностью превышающей 6 баллов (Рисунок 3.1 а). В обследованных селах распространены типичные для сельской местности двухэтажные жилые дома. Это позволило надежно сопоставлять проявленный эффект землетрясения. Сейсмический эффект на большей части территории города Тбилиси не превышал 4-х баллов. В южной части города, т.е. ближе к эпицентру, проявление землетрясения было выше (Рисунок 3.2). Дошло до того, что несколько домов старой застройки даже полностью обрушилось (Рисунок 3.2 в) [Заалишвили и др., 2001; 2014].

Как и при Гоубанском землетрясении ученые-сейсмологи Армении первыми сообщили приблизительное расположение эпицентра к югу от Тбилиси. Землетрясение 11 апреля 2002 г. по имеющимся данным не сопровождалось повреждением или разрушениями. Тем не менее, сотрудниками отдела инженерной сейсмологии Института Строительной Механики и Сейсмостойкости АН Грузии (ИСМИС) по инициативе его руководителя (В.Б. Заалишвили) было проведено детальное макросейсмическое обследование последствий землетрясения. В связи с малостью прошедших колебаний, и отсюда сложностью выявления и дифференциации возможных повреждений, использовался опросный метод. Были опрошены почти 1000 людей с целью оценки их ощущений. И самым

главным был вопрос: ощутили или не ощутили респонденты землетрясение и как. Именно эти факторы позволили в относительно короткие сроки, практически, нескольким участникам не только провести рутинное, и вместе с тем детальное обследование, но и выявить эпицентральную зону такого достаточно слабого землетрясения, обусловившего отсутствие интереса со стороны большинства ученых-инженеров. Направления маршрутов предполагали изучение проявления, как в самом городе, так и за его пределами. Совершенно непонятно по какой причине, но удаление от фактического центра исследуемой площади города в южном и других направлениях, давало устойчивое уменьшение интенсивности.

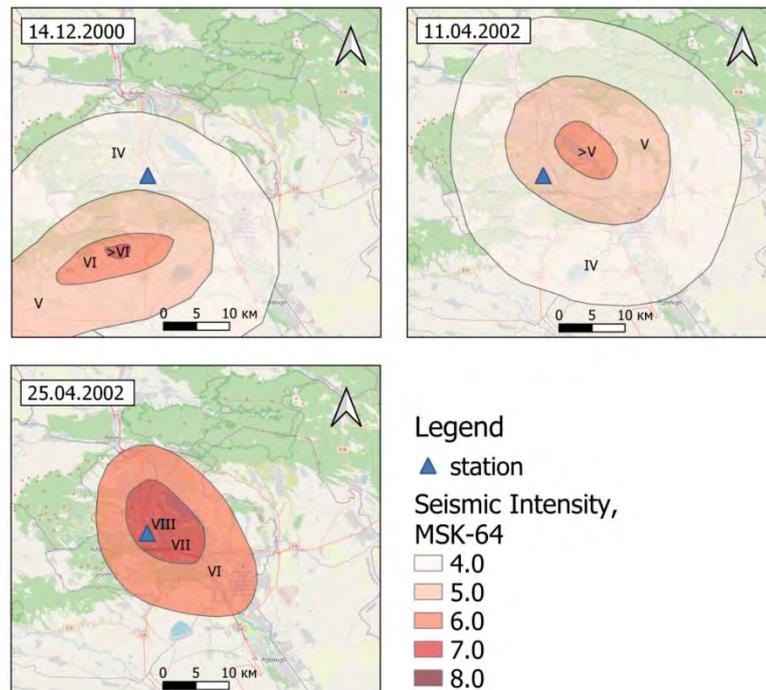


Рисунок 3.1. Результаты макросейсмического обследования эпицентральной зоны Гюбанского (14 декабря 2000 г.) и Тбилисских землетрясений (11 апреля 2002 г. и 25 апреля 2002 г.). На основе данных [Заалишвили и др., 2001, 2014; Javahishvili et al.; 2004; Материалы ..., 2005]

Дальнейшее изучение землетрясения неожиданно привело к пониманию того простого факта, что эпицентр находится непосредственно на территории г.Тбилиси. И, наконец, была установлена эпицентральная зона,

где наблюдался массовый бой посуды, сдвиг тяжелой мебели, поломка оконных стекол и т.п. И об этом вообще отсутствовала информация. По результатам макросейсмического обследования были построены изосейсты землетрясения 11 апреля 2002 года (рис. 3.1 б). Анализ изосейст показывает, что эпицентральная зона землетрясения охватывает северо-западную часть города и приурочена к районам Глдани, Наздаладеви, Чугурети и т.д.

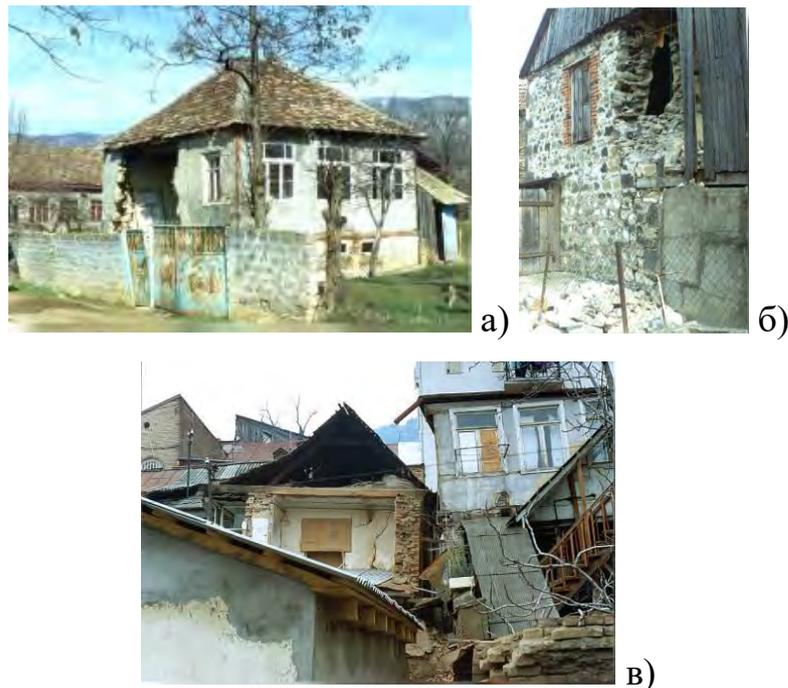


Рисунок 3.2. Типовая застройка и повреждения зданий при Гоубанском землетрясении: а) Село Гоубани, повреждения 4 степени; б) Село Джорджиашвили. Дом В. Окуашвили; в) Тбилиси, дом на ул. М. Зичи, повреждение 5 степени [Заалишвили и др., 2014]

Выявление гипоцентра непосредственно под городом напомнило о т.н. «Тбилисских» землетрясениях позапрошлого века, когда в первой половине 19-го столетия в Тбилиси произошел целый ряд заметных землетрясений. После указанного землетрясения, совершенно закономерно, в городе были зарегистрированы афтершоки. При этом имело место совершенно непонятное возрастание активности. Дело доходило до того, что за день происходил ряд весьма ощутимых толчков. Все это дало основание руководителю отдела инженерной сейсмологии В.Б. Заалишвили во вторник

13 апреля 2002 г. на первом же заседании Ученого Совета ИСМИС АН Грузии выступить от имени исследовательской группы с заявлением о прогнозе сильного землетрясения на территории г. Тбилиси. Конечно, при этом не давался точный прогноз времени, но эпицентр предполагался в Тбилиси где-то в пределах эпицентральной зоны землетрясения 11 апреля 2002 г., а время проявления что-то около месяца. Понятно, ни у кого и в мыслях не было привлекать сюда средства массовой информации, и заявление носило научный или только служебный характер [Заалишвили и др., 2001].

После первого землетрясения прошло две недели и вечером 25 апреля произошло разрушительное землетрясение с преобладающим вертикальным толчком с магнитудой порядка $M=4.5$. В результате землетрясения 25 апреля 2002 г. в Тбилиси погибло 9 человек. В городе землетрясение привело к значительным разрушениям и серьезным повреждениям (Рисунок 3.3). Сотни людей остались без крова. Эпицентр землетрясения был вновь, как и предполагалось, в пределах города (в восточной части города), естественно перекрыв эпицентральной зону землетрясения от 11 апреля 2002 г. (Рисунок 3.1 в) [Заалишвили и др., 2001]. Таким образом, землетрясение от 11 апреля 2002 г. можно рассматривать в качестве форшока.

Макросейсмические данные приведены на рисунке 3.1 в. При этом использовались все данные, включая результаты оперативного обследования, которые впоследствии уточнялись [Javahishvili et al., 2004]. В данной работе использованы общие данные проявления землетрясения, обусловленные расположением очага. Влияние грунтовых условий в данной работе не рассматривалось. В то же время проявление интенсивности происходило путем наложения различных факторов, обусловленных сложным переплетением влияния близко расположенного очага и грунтовых условий территории [Заалишвили и др., 2014].

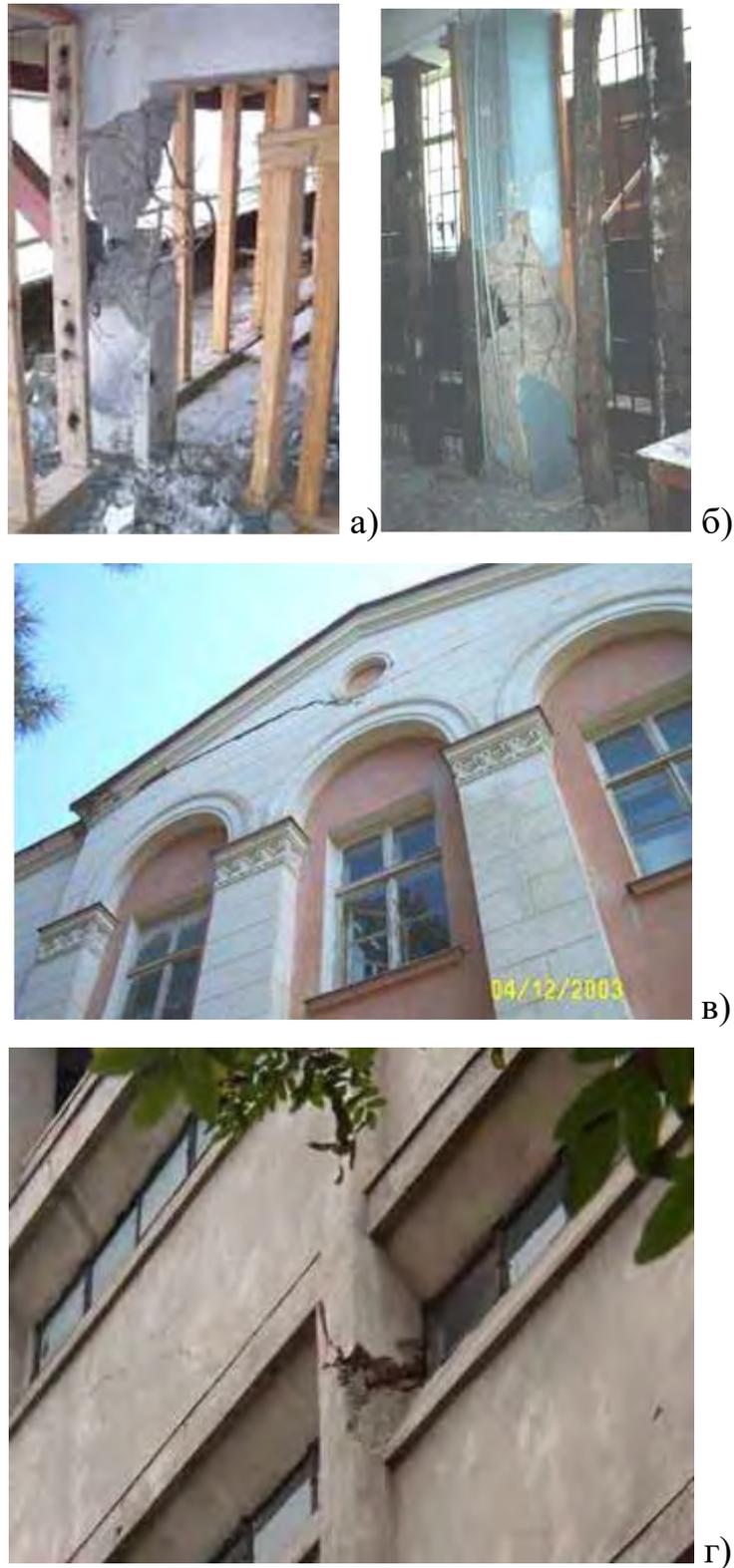


Рисунок 3.3. Повреждения зданий при Тбилисском землетрясении 25 апреля 2002 года: а) повреждение колонн здания Института математики; б) колонна первого этажа ЖБ крупноблочного дома в Надзаладевском районе; в) кирпичное здание больницы по ул. А. Казбеги; г) поврежденная колонна здания Государственного исторического музея [Gabrichidze et al., 2004]

В результате землетрясения 25 апреля 2002 года было серьезно повреждено более 2500 зданий и сооружений. Оперативное обследование зданий было проведено СБР НССЗ Республики Армения. Было установлено, что наибольшие повреждения получили преимущественно малоэтажные здания, более всего в районах Авлабара и Сололаки [Материалы ..., 2005].

По поручению Министерства строительства Грузии и руководства ИСМиС АН Грузии под руководством В.Б. Заалишвили было выполнено обследование зданий и сооружений в центральной части территории г. Тбилиси. В первую очередь, решались неотложные социальные задачи оценки их состояния и необходимости выведения населения в безопасные здания и районы. И уже по результатам обследования строились соответствующие изосейсты. С наибольшей интенсивностью землетрясение проявилось в выделенной эпицентральной зоне землетрясения, т.е. в восточной части города: улицы Пиросмани, Зиари, Рача, Магаро, Либани, Кетеван Тсамебули, Э. Бежанишвили, Б. Бенделиани, Диди-Джихаиши и другие. Относительно малая глубина очага (около 5 км) предопределила сильное затухание выделяющейся сейсмической энергии за пределами сферического в идеале, а на практике протяженного вдоль городской застройки очага. Анализ грунтовых условий города, проведенный выше, позволяет приурочить увеличение интенсивности к району старого города, где большая часть поверхностных слоев грунтовой толщи представляет собой насыпные грунты. Неравномерные осадки таких грунтов также сформировали высокий сейсмический эффект и в других районах города (район, заключенный между площадью Свободы, мостом Бараташвили и ул. Л. Асатиани и т.д.). С другой стороны, высокий сейсмический эффект проявился в районе распространения сложного подземного и поверхностного рельефов, что соответствует современным концепциям формирования интенсивности землетрясения.

Наиболее тяжелое положение создалось в центральной части города. Здесь расположено много амортизированных зданий постройки конца и даже

середины 19-го столетия. В основном пострадали двух- и трехэтажные здания, с большими проемами и расположенные на слабых насыпных грунтах (ул. А. Дюма, К. Леселидзе, пл. Хлебная и т.д.). Расположенная здесь же купольная церковь X века также пострадала значительно. Некоторые здания были частично разрушены.

Вертикально преобладающий толчок обусловил нестандартные проявления повреждений. Некоторые уже поврежденные перед землетрясением здания, например, с почти 5-сантиметровым раскрытием стены первого этажа («отголосок» деревянных конструкций!), в период землетрясения не пострадали вообще. Это было обусловлено тем, что высокочастотные составляющие вертикальных колебаний здесь сильно поглощались. В то же время со многих крыш упали кирпичи дымовых труб, но разрушение происходило не в горизонтальном, а вертикальном направлении. Действительно во многих зданиях дымовые трубы, сложенные кирпичами, характеризовались повреждением верхней кладки без проявления каких-либо повреждений в нижней кладке и т.д.

Основные особенности методологии инженерной сейсмологии сформировались в эпоху, когда большая часть застройки городов представляла собой разношерстную, часто весьма некачественно построенную, однородную совокупность зданий и сооружений. Поэтому проявление сейсмического эффекта логически вполне обуславливалось сейсмологической идеологией, а анализ изосейст позволял вполне уверенно выделять влияние грунтовых условий.

В настоящее время, стремительное развитие урбанизированных территорий приводит к формированию сложной застройки, где старые амортизированные дома непосредственно соседствуют с более поздними постройками и с современными зданиями. При этом проявление землетрясения может совершенно различаться в пределах нескольких метров.

Для надежного выделения влияния грунтовых условий необходимо учитывать и сроки эксплуатации, техническое состояние, и качество

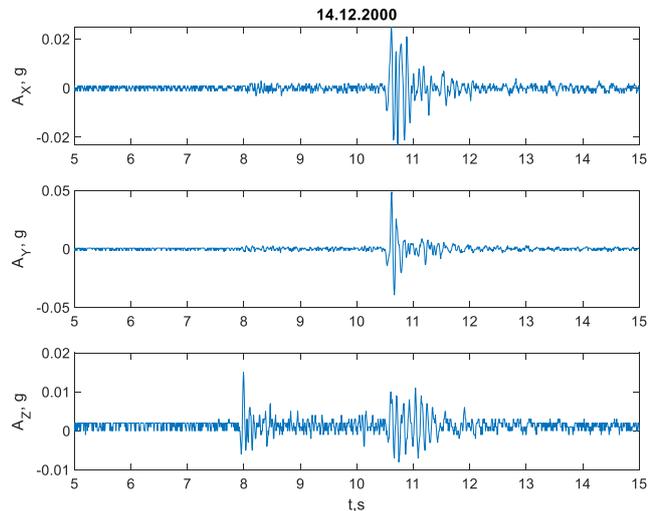
строительства, особенно, для новых зданий и сооружений. Не секрет, что, нередко, новые здания построены с такими отклонениями от проекта и, соответственно, от положений действующих Строительных Норм, что они при первом же относительно сильном землетрясении обречены на значительные повреждения. При этом весьма часто в последние годы и сами проекты могут характеризоваться такими нарушениями. Такие обстоятельства всегда формировали интегральный сейсмический эффект землетрясения. Поэтому анализ данных проявления всегда соседствует с отсеиванием проявлений, обусловленных указанными обстоятельствами. В то же время сейсмические шкалы основаны на использовании в качестве объектов анализа именно амортизированных застроек в большинстве своем без антисейсмических мероприятий.

Таким образом, при анализе проявления землетрясений на урбанизированной территории необходимо весьма внимательное изучение застройки с целью выделения различных аномалий. Апрельские землетрясения произошли в городе, насыщенном не просто амортизированной застройкой, но и нередко уже, практически, саморазрушающейся. При этом, весьма распространено характерное для большинства современных городов мира, явление «подтопления» грунтов, отягощаемое, в свою очередь, характерной для старых городов изначальной их высокой водонасыщенностью. Указанные грунты с сейсмической точки зрения очень часто, особенно в старой исторической части города относятся в лучшем случае к грунтам третьей категории, а нередко и еще худшим грунтам (насыпные, торфяные, илистые и т.д.). Это обстоятельство при наличии здесь же прочных грунтов, обуславливало во все времена в Тбилиси отчетливую дифференциацию проявления землетрясения по грунтовым условиям.

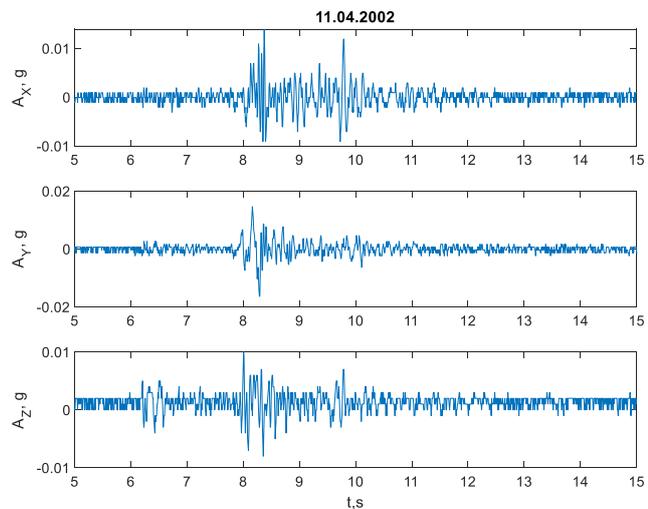
С другой стороны, близость источника или очага землетрясения создает совершенно необычные условия для проявления землетрясения. Так здесь не столь явно выражена дифференциация разрушений. Кроме того,

сама особенность очага создала совершенно необычную картину, вытянутую, очевидно, вдоль разрывного нарушения, которое, кстати, не четко выделено. И, наконец, свою роль, сыграла малая глубина очага, обусловившая формирование весьма локального проявления апрельских землетрясений.

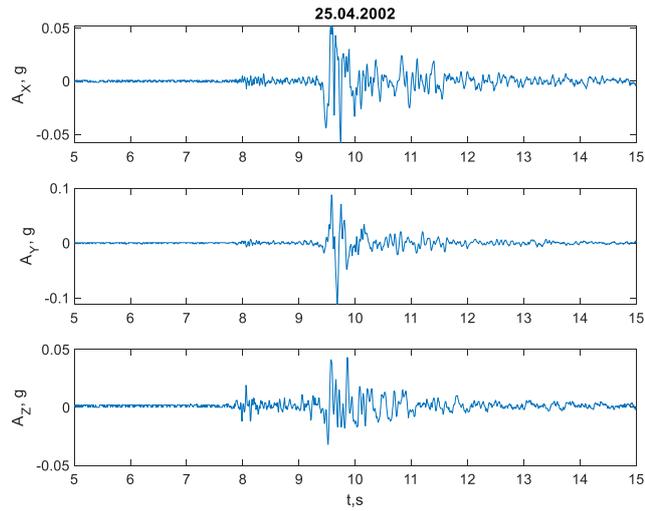
Апрельские землетрясения 2002 года были зарегистрированы сейсмической станцией, расположенной на скальных грунтах в здании Института геофизики АН Грузии (рис. 3.4). Расположение станции обозначено на рис. 3.1, соответствующие эпицентральные расстояния, оцененные по расстояниям от макросейсмического центра до станции приведены в таблице 3.1, содержащей также параметры землетрясений по данным различных источников.



а)



б)



в)

Рисунок 3.4. Акселерограммы Гоубанского 14 декабря 2000 г. (а) и Тбилисских землетрясений: 11 апреля 2002 г. (б) и 25 апреля 2002 г. (в)

Таблица 3.1. – Параметры землетрясений

Дата и время события по местному времени [Материалы ..., 2005]	Магнитуда, приведенная в (UNDP Report) [Материалы ..., 2005]	Глубина очага по оперативным данным НССЗ РА	Магнитуда M_d по оперативным данным НССЗ РА	Дата и время события UTC	M_b (IRIS)	Глубина очага (IRIS)	Расстояние до макросейсмического эпицентра, км
14.12.2000 19:45	3.6	-	-	2000-12-14 15:45:38.1	3.3	48.7	12.2
11.04.2002 21:38	3.5	2.5	3.4	2002-04-11 16:38:24.1	3.7	10	7.4
25.04.2002 22:41	4.5	2.5	4.3	2002-04-25 17:41:22.4 4	4.8	10	2.9

3.2.2. Параметры сейсмических записей

Оценим параметры, используемые для описания эффекта сейсмических воздействий. Традиционно в качестве такого параметра используется ускорение [Karimzadeh, Askan, 2021]. Инструментальные значения сейсмической интенсивности для ускорения определены из регрессионных моделей для многих регионов и, в первую очередь, с целью быстрой оценки

интенсивности сейсмических воздействий после разрушительных землетрясений (например, система ShakeMap в Калифорнии). Много моделей построено также для пиковой скорости. В зависимости от категории объектов в специальных нормах используются скорости и смещения. В американской shake-map инструментальной оценке используются статистические данные для ускорений, скоростей и смещений в зависимости от интенсивности [Wei et al., 2014]. Очевидно, что в разных диапазонах «работает» каждый из этих показателей в силу разного частотного состава. Следующим типом показателя являются спектральные параметры. В работе [Campbell, Bozorgnia, 1994], рассмотрены интенсивность Ариаса и кумулятивная абсолютная скорость. То, что одному и тому же значению сейсмической интенсивности соответствует большой разброс значений максимальных ускорений известно давно [Шебалин, 1975б]. [Karim, Yamazaki, 2002] исследовали связь макросейсмической интенсивности шкалы JMA с пиковыми ускорениями, скоростями и спектральной интенсивностью (SI). В работе [Constantin et al., 2021] приводятся корреляционные соотношения между макросейсмической интенсивностью и пиковым ускорением и скоростью для землетрясений зоны Вранча. В работе [Androutselis et al., 2020] были исследованы различные параметры для оценки повреждения мостовых сооружений.

Соответствующие соотношения между рассчитанными по формулам (3.1)–(3.8) параметрами (Таблица 3.2) и макросейсмической интенсивностью представлены на рисунке 3.5. Полученные зависимости не являются статистически значимыми и приведены только для иллюстрации общих трендов. Наилучшее соответствие получено для преобладающего периода колебаний.

Таблица 3.2. – Инструментальные параметры сейсмических записей

Параметр		горизонтальная компонента			вертикальная компонента		
		14.12.2000	11.04.2002	25.04.2002	14.12.2000	11.04.2002	25.04.2002
Пиковое ускорение	PHA	0.054	0.017	0.114	0.015	0.010	0.043
Пиковая скорость	PHV	1.544	0.548	3.453	55.863	52.537	58.500
Пиковое смещение	PHD	19.293	8.199	12.170	1169.474	1056.662	1285.618
Продолжительность колебаний	D_5_95	17.117	31.344	2.070	36.398	35.383	26.805
Преобладающий период колебаний	Tm	0.121	0.177	0.209	0.168	0.206	0.202
Средневзвешенная частота	fw	21.128	26.407	15.074	26.457	27.495	18.041
Период, соответствующий средневзвешенной частоте	Tw	0.047	0.038	0.066	0.038	0.036	0.055
Кумулятивный квадрат ускорений (модифицированная интенсивность Ариаса)	IA	0.000033	0.000000	0.000164	0.000003	0.000003	0.000027
Кумулятивная абсолютная скорость	IV	0.000508	0.000044	0.001132	0.000153	0.000153	0.000460
Индекс интенсивности Анга (характеристическая интенсивность)	IC	0.051517	0.011170	0.061798	0.026277	0.026153	0.051941
Мера Fajfar	IF	3.140	1.297	4.142	137.21	128.13	133.11
Интенсивность Хаузнера	IN	1.841	1.454	5.663	0.87	0.86	2.70
Индекс полной входной энергии	Ej	0.007	0.002	0.043	15.61	13.81	17.13
Площадь реального спектра	Sr	0.054	0.038	0.113	0.037	0.034	0.070

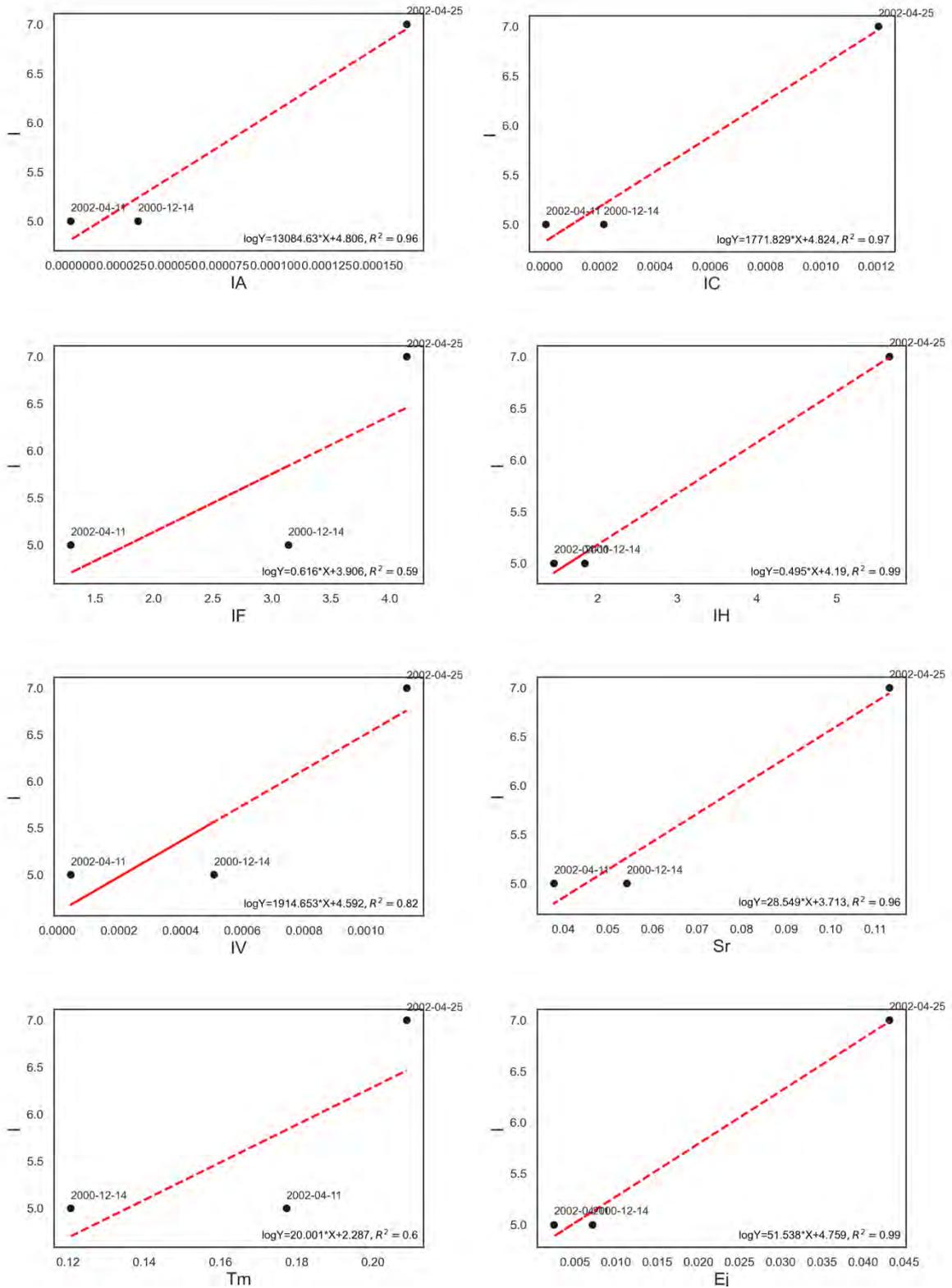


Рисунок 3.5. Соотношение инструментальных параметров оценки интенсивности с макросейсмической интенсивностью (полученные зависимости не являются статистически значимыми и приведены только для иллюстрации общих трендов)

Инструментальные параметры можно разделить на амплитудные и спектральные. Макросейсмическая интенсивность оценивается на различных объектах. В связи с этим существенную роль при оценке интенсивности оказывает тип объекта-индикатора, который характеризуется собственной частотой колебаний и прочностными характеристиками. Для территории Италии исследована связь интенсивности Хаузнера с макросейсмической интенсивностью в работе [Masi et al., 2020].

Для оценки сейсмических воздействий на устойчивость склонов, при изучении исторических землетрясений использовался преобладающий период [Silva et al., 2017], на основе соответствующих эмпирических данных можно восстановить зоны различной интенсивности. В работе [Wang et al., 2013] предложено корректировать спектральную интенсивность на основе преобладающего периода спектрального ускорения.

Связь интенсивности со спектром акселерограмм исследована в работе Чернова и Соколова [Chernov, Sokolov, 1999]. Аналогичные данные были получены позднее [Чернов и др., 2019а,б]. Для каждой интенсивности шкалы MMI спектральная амплитуда рассматривается в определенном диапазоне репрезентативных частот, которые приведены на рисунке 3.6 в сравнении с преобладающими частотами. Спектральные особенности отклика на сейсмическое воздействие хорошо описываются спектрами реакции – рисунок 3.7. Хорошо видно, что максимум воздействия с увеличением интенсивности на горизонтальной компоненте ускорений смещается в длиннопериодную область (обозначено пунктиром, соответствующие периоды: 0.04 с, 0.14 с, 0.21 с). На вертикальной же компоненте наблюдается обратный эффект (периоды: 0.06 с, 0.11 с, 0.07 с). Кроме того здесь же можно выделить интервалы периодов, в которых амплитуды воздействия при Тбилисском землетрясении 11 апреля 2002 г. превышают амплитуды Гоубанского землетрясения 2000 г. (отмечены стрелками), а при условии совпадения данных частот с собственной частотой застройки получим соответствие с проявленной интенсивностью.

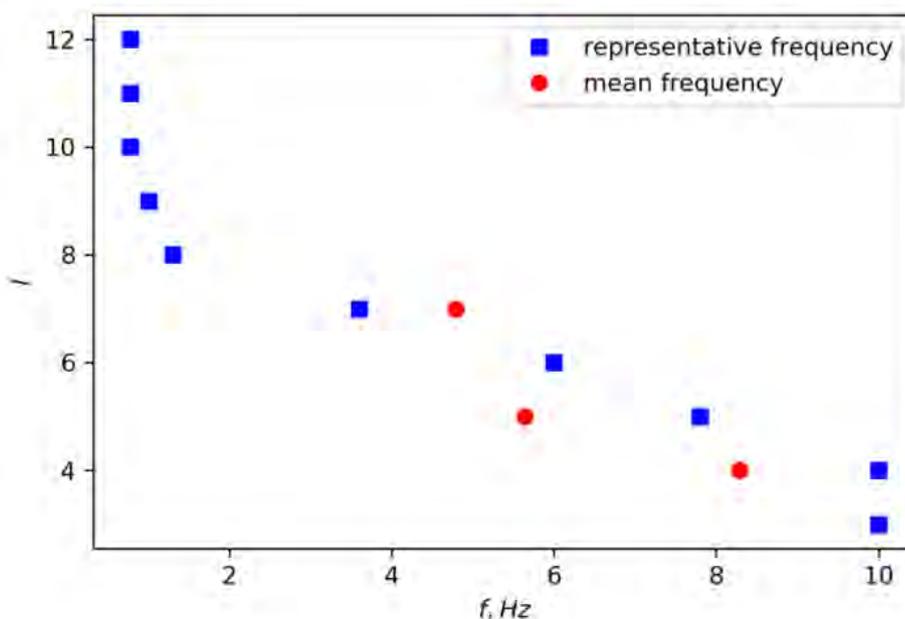
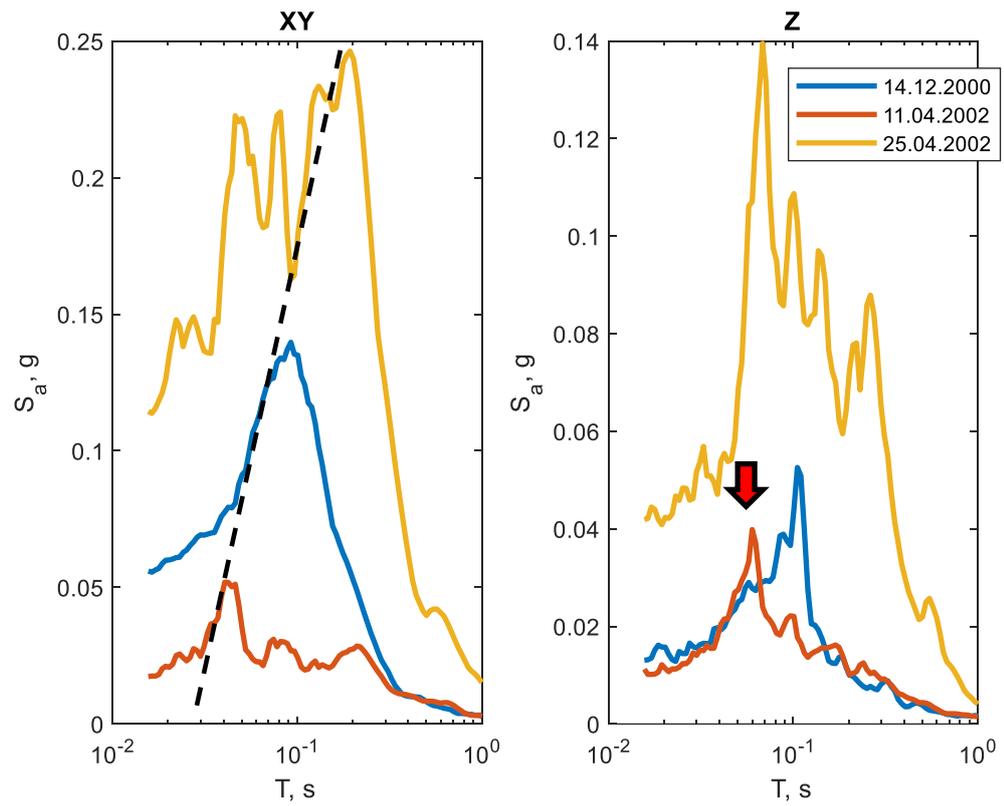


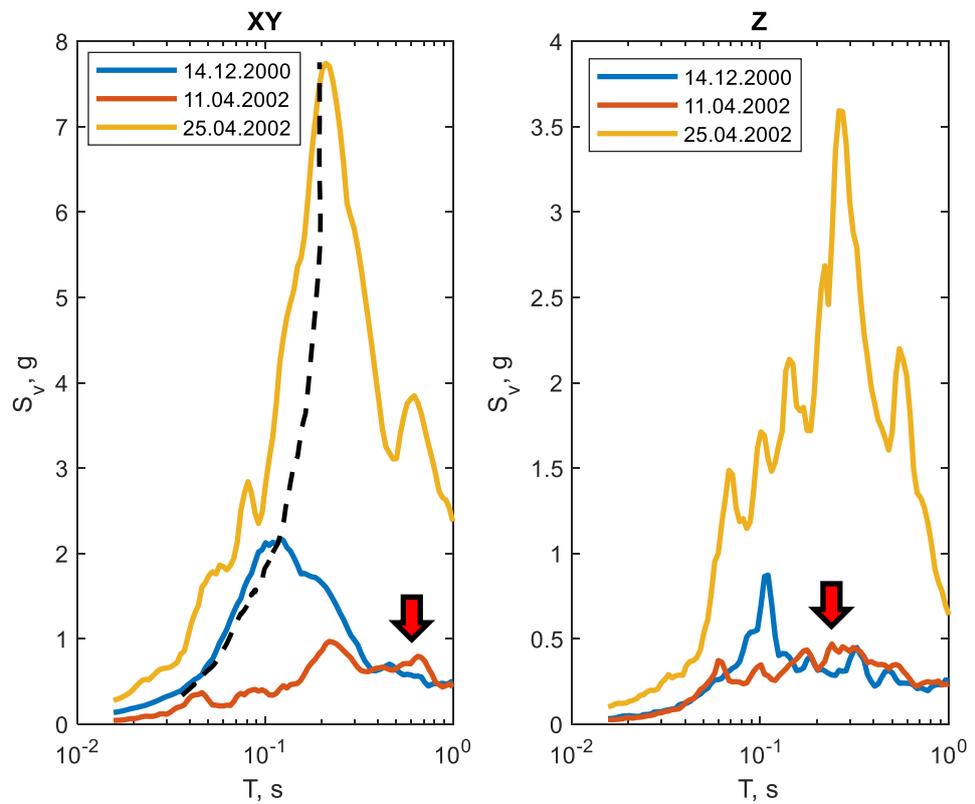
Рисунок 3.6. Репрезентативные частоты, используемые при определении инструментальной интенсивности согласно работе [Chernov, Sokolov, 1999] и средние частоты колебаний

В методах машинного обучения выбор лучшей модели осуществляется на основе минимизации выбранной метрики (accuracy, precision, recall и др.). Аналогично может быть сформулирована задача поиска частотных диапазонов рассматриваемых спектральных параметров, наилучшим образом коррелирующих с макросейсмической интенсивностью. В качестве простого примера рассмотрим величину достоверности аппроксимации и сопоставим ее значения на различных периодах (Рисунок 3.8). Максимумы соответствуют для горизонтальной компоненты 0.04 с и для вертикальной компоненты 0.06 с.

Оценка сейсмической интенсивности является мерой эффекта воздействия сейсмических колебаний на различные объекты, и, в первую очередь, здания и сооружения, последствия которых приводят к разрушениям и соответствующим ущербам. В связи с чем макросейсмическая интенсивность является параметром, напрямую оценивающим сейсмические риски (как статистические распределения степени и количества повреждений зданий различного типа) [Zaalishvili et al., 2020a].



а)



б)

Рисунок 3.7. Спектры реакции: ускорения (а), скорости (б) для горизонтальной (слева) и вертикальной (справа) компонент

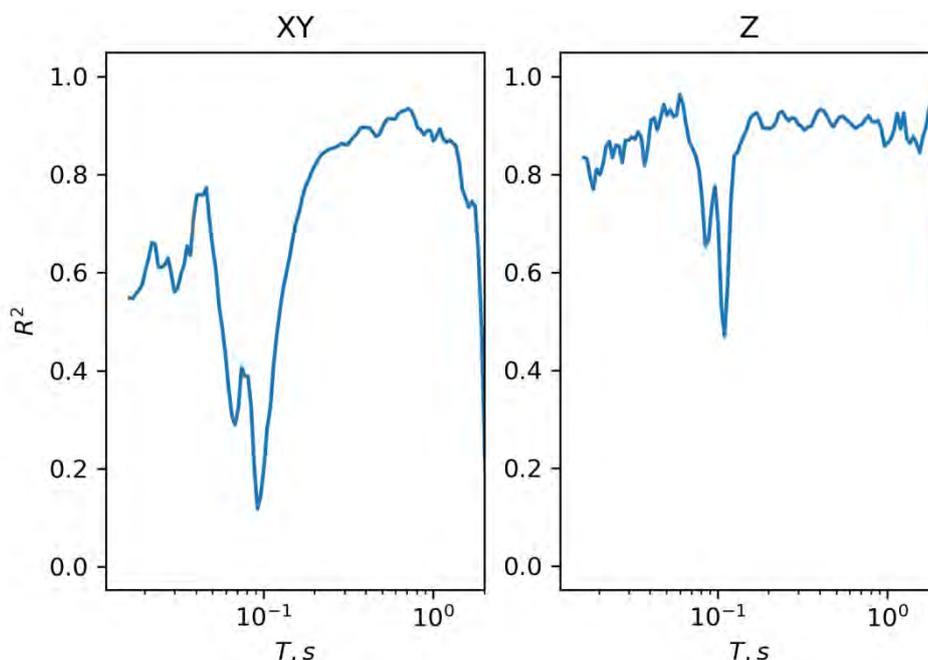


Рисунок 3.8. Величина достоверности аппроксимации спектров реакции и проявленной интенсивности

Макросейсмическая интенсивность оценивается на различных объектах. В связи с этим существенную роль при оценке интенсивности оказывает тип объекта-индикатора. Естественно что важнейшими такими объектами являются здания и сооружения, каждый из которых характеризуется собственными частотами и прочностными характеристиками. С появлением новых конструктивных решений требуется актуализация макросейсмических шкал, и в этой связи следует отметить, что подобная работа в РФ выполнена в форме нового поколения сейсмической шкалы (ГОСТ) [Аптикаев, 2021; Aptikaev, Erteleva, 2017; Aptikaev et al., 2021]. В работе [Yazgan, 2015], например, предложена методика оценки моделей уязвимости зданий, в которой для классов RC12, RC34 и RC56 рассматриваются спектральные ускорения для периодов: 0.15 с, 0.35 с и 0.55 с.

Актуальной остается задача нахождения инструментального параметра (набора параметров), наилучшим образом описывающего макросейсмическую интенсивность. Вероятно, по аналогии с новой шкалой, для каждого типа зданий может быть введена своя мера воздействия, как,

например, это сделано в работе [Yazgan, 2015], где используются значения спектра реакции в единицах ускорений для различных периодов.

Нами рассмотрены различные инструментальные показатели сейсмического воздействия по данным землетрясений на территории Тбилиси. Установлено, что наилучшим образом сейсмический эффект описывается энергетическими показателями, такими как кумулятивная скорость (интенсивность Ариаса), площадь реального спектра (Заалишвили), площадь спектральной псевдоскорости (интенсивность Хаузнера). С данными показателями тесно связаны такие параметры как преобладающий период, средневзвешенная частота колебаний [Заалишвили, 1986] и продолжительность колебаний.

Рассмотрено уточнение спектральных параметров – площадей спектров и спектров реакции (для ускорений и скоростей) в различных интервалах периодов. В результате исследований наилучшее соответствие с макросейсмической интенсивностью получено для периодов 0,04–0,05 с и 0,16–1,5 с. Предполагается совпадение периодов воздействия в данных интервалах с собственными периодами застройки. Также следует отметить, что в силу близкого расстояния достаточно большие значения наблюдаются на вертикальной компоненте, что также обусловило заметное отличие реакции застройки от среднестатистических данных, в которых рассматривается максимальное горизонтальное ускорение.

Для непосредственной оценки разрушительного потенциала различных показателей грунтового движения необходимо рассмотреть их корреляционную взаимосвязь с интенсивностью проявления сейсмического воздействия, т.е. для установления весового вклада различных показателей грунта в формирование чувствительности к сейсмическому воздействию землетрясения, необходимо установить связь сейсмического эффекта землетрясений с соответствующими или сопутствующими показателями инструментальных записей колебаний грунтов. Такой подход к решению основной задачи исследования представляет основную концепцию

формирования связи интегрального сейсмического эффекта землетрясения с тем или иным показателем движения грунтов, характеризуемую логической целесообразностью причинно-следственной связи.

Апрельские землетрясения 2002 года в Тбилиси отличались тем, что впервые на постсоветской территории без наличия весьма сильного землетрясения (Спитак, 1988; Рача, 1991) был получен целый набор инструментальных записей ускорений землетрясений в цифровом виде. В то же время, в отличие от Гоубанского землетрясения 14 декабря 2000 года апрельские землетрясения были записаны на территории, где прямо под толщей грунтов, слагающих ее, находился очаг достаточно сильного, скорее умеренного землетрясения. Поэтому обработка записей землетрясения представляла, несомненно, большой практический и научный интерес.

В то же время, необходимо отметить, что точность определения важнейших характеристик такого неглубокого землетрясения, а именно, магнитуды, глубины очага и т.д., связана с большими погрешностями и может достигать значительных величин.

С другой стороны, хорошо известно, что эмпирические уравнения макросейсмического поля (Шебалин Н.В., Варазанашвили О.Ш., Папалашвили В.Г. и т.д.), устанавливались, как правило, именно по сильным и, при этом, удаленным землетрясениям. Поэтому для подобных землетрясений, охватывающих большие пространства, точность определения магнитуды или глубины очага, как самостоятельных параметров, вполне удовлетворительна. При этом вполне удовлетворительна и точность определения интенсивности землетрясения.

Для неглубоких землетрясений получаемые результаты, учитывая большой разброс основных исходных параметров, с точки зрения задачи сейсмологии, до некоторой степени также достаточно удовлетворительны. В то же время, никому из сейсмологов не придет в голову определять по ним абсолютное значение интенсивности. Другими словами, связывать количественно весьма неточные исходные сейсмологические данные,

обусловленные особенностями неглубокого землетрясения, с проявленной или ожидаемой интенсивностью совершенно неприемлемо.

Также совершенно неприемлемым является анализ абсолютной величины ускорения, полученного инструментальным путем. Некорректно связывать, а точнее определять или подтверждать по нему количественную величину проявленной интенсивности. Специалистам, работающим в области инженерной сейсмологии, хорошо известно, что корреляция между вышеприведенными и другими параметрами может иметь лишь статистический смысл. Другими словами, большинство эмпирических уравнений справедливо лишь для достаточно большого числа рассматриваемых событий. Таким образом, получение той или иной величины в уравнениях макросейсмического поля имеет явно вероятностный смысл. В то же время, большинство параметров таких событий были получены в скудно инструментальный период (во всяком случае, для Кавказа) и именно для удаленных землетрясений. Отсутствие статистического числа значащих событий происшедших под городом для вертикально распространяющихся волн не позволяет делать тех или иных количественных выводов.

Рассмотренные записи показывают сложность формирования сейсмического поля в ближней зоне землетрясений, и любых выводов, в том числе о параметрах инструментальной оценки макросейсмической интенсивности. В то же время, необходимо отметить, что полученные в данной работе результаты, требуют статистического обоснования. В этой связи совершенно необходимым является развитие сетей сильных движений на Северном Кавказе, в особенности в связи с возрастающими темпами строительства и повышением этажности застройки, сопровождающихся новыми конструктивными решениями. На современном этапе требуется использование баз данных сильных движений, содержащих общемировые данные.

3.3. Отбор параметров для разработки инструментальной меры сейсмической интенсивности по данным сети K-net

3.3.1. База данных и параметры движения грунта

В Геофизическом институте ВНИИ РАН в 2003 году по инициативе В.Б. Заалишвили была создана К.С. Харбевым пополняемая база данных сильных движений, содержащая данные со всего мира (США, Япония, Тайвань, Греция, Грузия). Для анализа в данной работе были отобраны записи землетрясений, зарегистрированных системой K-NET (Япония, www.kyoshin.bosai.go.jp) [National Research ..., 2019]. База содержит более 10 000 записей на 1000 станций с различными грунтовыми условиями с интенсивностью MSK от 5 баллов и выше, начиная с мая 1996 г. по декабрь 2013 г. Также в базе данных содержатся записи землетрясений с малыми эпицентрными расстояниями от 0 до 3 км. Наличие различных грунтовых условий позволяет анализировать зависимость параметров сильных движений, в том числе от средней скорости поперечных сейсмических волн V_{s30} . Различные эпицентрные расстояния и интенсивности позволяют делать равномерную выборку значений для обучения моделей в достаточно широких диапазонах. Исходя из этого принципа, была сделана выборка, содержащая 155 записей, для которых вычислялись соответствующие параметры.

Данные японской сети K-NET (около 50 000 записей) могут считаться эталоном при включении ее в банк данных сильных движений. Указанные данные были любезно переданы академиком А.В. Николаевым привезшим их из Японии, где он читал цикл лекций, своему ученику В.Б. Заалишвили. Кроме того, проведена работа по пополнению таких данных через интернет. Сопоставление данных с подобными данными из других источников показало их высокое качество. В отличие от других подобных данных, в японских данных имеются весьма важные дополнительные параметры места регистрации. Так, в указанной базе данных каждая запись характеризуется

конкретным инженерно-геологическим разрезом. При этом здесь же кроме типов грунтовых слоев приведены значения скоростей продольных и поперечных волн, а также число пенетрации (N). С другой стороны ограничение грунтовой толщи ее 20-метровой величиной по всей системе наблюдений, очевидно, ограничивает возможности данных, т.к. не дает возможности использовать их более полноценно. Хорошо известно, что при Спитакском землетрясении (Армения, 1988) под десятиметровым слоем скального грунта – туфа «неожиданно» оказалась 300-метровая ослабленная толща глины, песка и озерных отложений. В связи с этим при изысканиях для целей сейсмостойкого строительства желательно иметь данные о мощности рыхлой толщи в целом (30–100 м и более). Кроме того, приведенные в базе японских данных разрезы скальных грунтов характеризуются весьма низкими скоростями. В этой связи было бы желательно здесь получить информацию и о мощности зоны выветривания. В настоящее время ведется переписка с японскими коллегами по отмеченным проблемам.

3.3.2. Метод. Построение и отбор признаков

Главной задачей всех рассмотренных работ является прогноз макросейсмической интенсивности по параметрам инструментальных записей. При этом методы машинного обучения можно разделить на интерпретируемые и не интерпретируемые. И, вообще говоря, только интерпретируемые методы можно считать инструментом для решения поставленной задачи разработки инструментальной меры сейсмической интенсивности, т.к. в нашем случае ключевым является не непосредственно прогноз интенсивности, а поиск параметра (комбинации параметров) наилучшим образом связанного функциональной зависимостью с интенсивностью. Таким образом, задача стоит шире, и в терминах машинного обучения называется «конструированием признаков» (feature engineering) [Bermingham et al., 2015]. Построение признаков – это процесс,

во время которого мы извлекаем новые переменные из необработанных данных. Такими данными могут являться, в частности, текст или изображение. В нашем случае это сейсмическая запись – сейсмограмма, велосигграмма или акселерограмма. Основные параметры воздействия можно разделить на амплитудные: максимальные скорости (PHV), смещения (PHD) и ускорения (PHA), среднеквадратическое ускорение (RMS), спектральные параметры – частота максимума спектра Фурье (f_{\max}), средневзвешенная частота (f_{aw}), энергетические параметры, такие как площадь спектра (S_r), кумулятивная абсолютная скорость (CAV), кумулятивный квадрат ускорений (интенсивность Ариаса), индекс полной входной энергии (E_r), продолжительность колебаний ((Duration), которая также может определяться различными способами)) и производные от данных параметров – например мера Фаджфара (Fajfar), площадь нормализованного спектра (Заалишвили) (S_n), а также параметры спектра реакции – интенсивность Хаузнера (Hausner intensity).

Признак может быть строго существенен (имеет информацию, которая не существует в других признаках), существенен, слабо существенен (содержит информацию, которая может содержаться в других признаках) или несущественен. Важно создать много признаков, даже если некоторые из них будут несущественны. Затем может быть использован отбор признаков путем исключения излишних и незначительных признаков, которые могут быть удалены без существенной потери информации. При этом излишний признак может быть значимым, и исключаться в силу его сильной корреляции с другим признаком входящим в модель, а незначительные признаки могут быть исключены в силу их малой информативности [Mairead et al., 2015]. Отбор признаков следует отличать от выделения признаков. Выделение признаков создаёт новые признаки, как функции от оригинальных признаков, в то время как отбор признаков возвращает подмножество признаков. Помимо упрощения модели для повышения интерпретируемости отбор признаков используется по следующим причинам – для сокращения времени

обучения и борьбы с переобучением. Очевидно, что в рамках выделенных нами групп признаков – амплитудных, временных, спектральных, и их производных между признаками будет сильная корреляция, т.е. они будут слабо существенными в рамках модели, в целом, будут излишними. Наша задача состоит в ранжировании признаков-кандидатов в оценки меры интенсивности. В данной работе рассматриваются критерии ранжирования, определенные для отдельных переменных, независимо от контекста других.

Многие алгоритмы выбора переменных включают ранжирование переменных в качестве основного или вспомогательного механизма выбора из-за его простоты, масштабируемости и хорошего эмпирического успеха [Guyon, Elisseeff, 2003]. Например, в работах [Bekkerman et al., 2003; Caruana, de Sa, 2003; Forman, 2003; Weston et al., 2003] в качестве базового метода используется ранжирование переменных. Ранжирование переменных не обязательно используется для построения предикторов. Одним из его распространенных применений в области микроматричного анализа является обнаружение набора потенциальных лекарств.

Простейший способ оценки степени связи двух величин – корреляция. Линейный коэффициент корреляции (или коэффициент корреляции Пирсона), рассчитывается по формуле:

$$R_{XY} = \frac{\text{cov}_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{(\sum (X - \bar{X})^2) \sum (Y - \bar{Y})^2}}, \quad (3.10)$$

где \bar{X} , \bar{Y} – средние значения выборок.

В линейной регрессии коэффициент детерминации, который представляет собой квадрат R_{XY} , представляет долю общей дисперсии вокруг среднего значения \bar{Y} , которая объясняется линейной зависимостью между X_{ii} и Y . Таким образом, использование R_{XY} в качестве критерия ранжирования переменных обеспечивает ранжирование в соответствии с качеством линейного соответствия отдельных переменных.

Использование R_{XY} может быть расширено на случай двухклассовой классификации, для которой каждая метка класса отображается на заданное

значение y , например, ± 1 . Затем можно показать, что R_{XY} тесно связан с критерием Фишера, с критерием Т и другими подобными критериями. **Критерий Фишера** – один из наиболее широко используемых методов контролируемого выбора признаков. Алгоритм, который мы будем использовать, возвращает ранги переменных на основе оценки критерия в порядке убывания, после чего уже следует их отбор.

При изучении различных оценок Браун, Поукок, Чжао и Лухан [Brown et al., 2012] рекомендовали **совместную взаимную информацию** в качестве хорошей оценки для отбора признаков. Оценка пытается найти признак, который добавляет наибольшую новую информацию к уже отобранным признакам, чтобы избежать избыточности. Взаимная информация определяется следующим образом:

$$I(X, Y) = \sum_i \sum_j p(x_i, y_j) \log \frac{p(x_i, y_j)}{p(x_i)p(y_j)} \quad (3.11)$$

где $p(x_i)$ – вероятность реализации любого из m элементов ансамбля X , а $p(y_j)$ – вероятность реализации любого из n элементов ансамбля Y .

Взаимная информация показывает насколько чётко определена целевая переменная, если известны значения предиктора. Этот тип тестов считается самым удобным в использовании – он хорошо работает "из коробки" и позволяет находить нелинейные зависимости. Реализован в sklearn как `mutual_info_regression` и `mutual_info_classif` соответственно для регрессии и классификации.

Регуляризация LASSO (L1). Регуляризация состоит в добавлении штрафа (penalty) к различным параметрам модели во избежание чрезмерной подгонки. При регуляризации линейной модели штраф применяется к коэффициентам, умножающим каждый из предикторов. Lasso-регуляризация обладает свойством, позволяющим уменьшить некоторые коэффициенты до нуля. Следовательно, такие “фичи” можно будет просто удалить из модели.

Метод с использованием Случайного Леса (Random Forest Importance). Стратегии на основе дерева, используемые случайными лесами, естественным образом ранжируются по тому, насколько хорошо они улучшают чистоту модели в плане данных. Таким образом, «обрезая» деревья ниже определенного коэффициента, мы можем подобрать наиболее важные признаки. Метод использует набор деревьев, которые содержат узлы, полученные в результате разделения. Основная цель этих расщеплений – максимально возможно уменьшить количество «шумов» таких, как энтропия и коэффициент Джини. Эти системы взаимосвязей или «деревья», основанные на моделях, позволяют определить, насколько важен признак, рассчитав степень уменьшения «шумов» за счёт этого признака.

3.3.3. Результаты отбора параметров для разработки инструментальной меры сейсмической интенсивности

Для оценки связей между различными параметрами набора данных рассчитан коэффициент корреляции для всех пар параметров набора данных, в том числе сейсмической интенсивности, результаты представлены в виде тепловой карты на рисунке 3.9 [Заалишвили и др., 2022б,в,д]. Ранжирование признаков на основании различных методов, описанных в предыдущем разделе статьи представлено на диаграмме на рисунке 3.10, численные значения в таблице 3.3.

Интенсивность наилучшим образом коррелирует с величиной пиковой горизонтальной скорости (PHV) – коэффициент корреляции составляет 0.89. Следующим параметром жестко коррелирующим с интенсивностью является мера Фаджфара (Fajfar) – 0.86, далее можно выделить амплитуду спектра Фурье (Spectral PNA) со значением корреляции 0.80, которое лучше коррелирует с интенсивностью, чем значение пикового горизонтального ускорения (PNA). Отметим также параметры, корреляция которых с интенсивностью составила более 0.5: интенсивность Анга (0.76), площадь реального спектра Sr (0.73), кумулятивная абсолютная скорость CAV (0.73),

интенсивность Ариаса (0.7), среднеквадратическое ускорение (0.68), пиковое горизонтальное смещение PHD (0.51). Корреляция для интенсивности Хаузнера составила 0.38. Следует также отметить, что корреляция интенсивности с продолжительностью воздействия оказалась слабой, что однако, может являться особенностью выборки. Для предварительного анализа в сводной таблице 3.3 приведены также средние отклонения и среднеквадратические отклонения нормированных величин, которые показывают значимость выборки (Таблица 3.3).

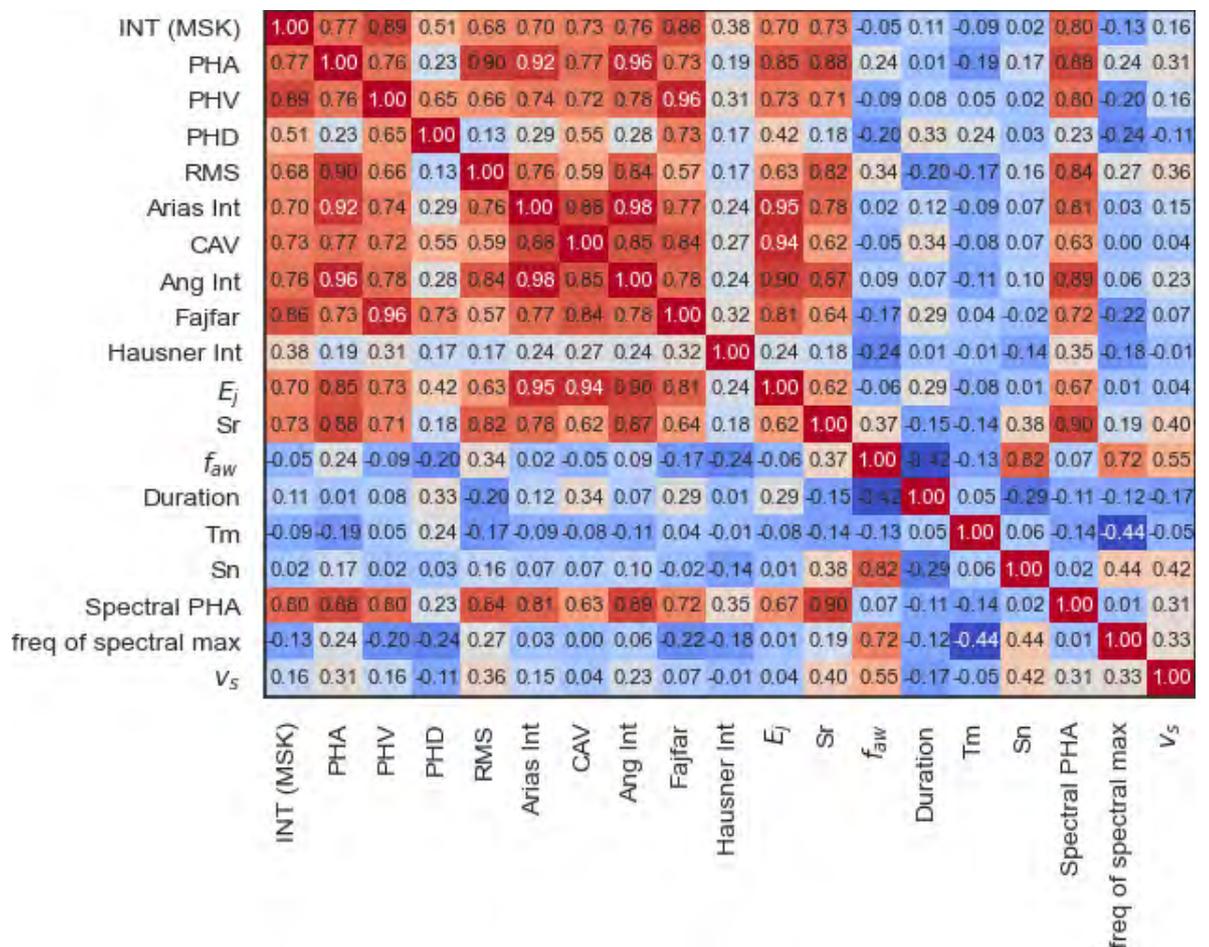


Рисунок 3.9. Тепловая карта корреляции параметров анализируемого набора данных

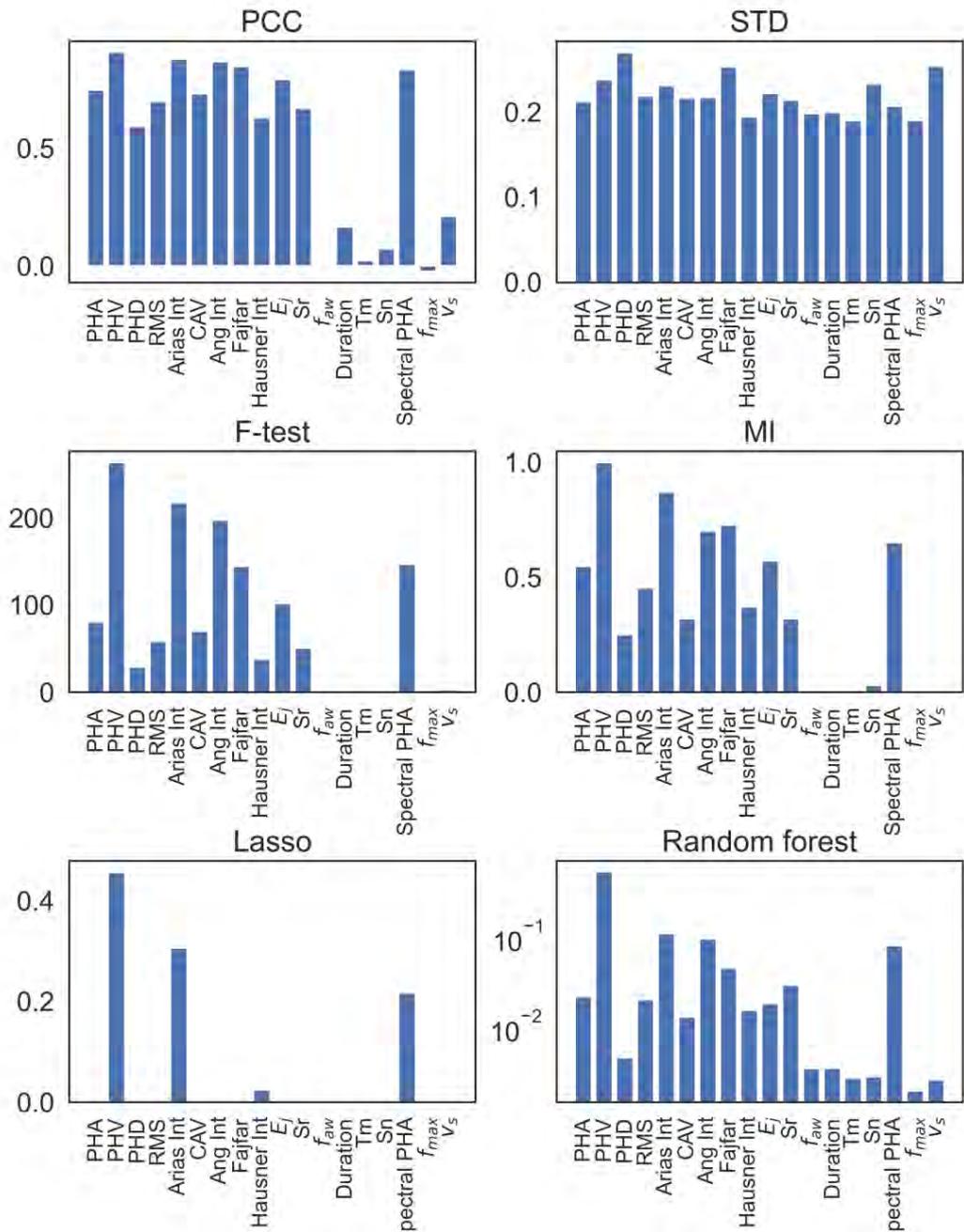


Рисунок 3.10. Отбор признаков: коэффициент корреляции Пирсона (PCC) (а), среднеквадратическое отклонение (б), F-тест (в), взаимная совместная информация (г), важность признаков по модели LASSO (д), важность признаков по модели «случайный лес» (е)

Таблица 3.3. – Ранжирование признаков различными методами

	PCC	MAD	STD	F-test	MI	Lasso importance	Random Forest importance
PHA	0.762	0.168	0.212	80.538	0.549	0.000	0.019
PHV	0.905	0.189	0.238	263.709	1.000	0.457	0.560
PHD	0.575	0.221	0.270	28.688	0.250	0.000	0.004
RMS	0.709	0.176	0.219	58.575	0.451	0.000	0.014
Arias Int	0.889	0.173	0.231	217.616	0.881	0.306	0.102
CAV	0.739	0.166	0.216	69.988	0.320	0.000	0.022
Ang Int	0.879	0.167	0.217	197.814	0.695	0.000	0.072
Fajfar	0.845	0.203	0.253	144.555	0.730	0.001	0.048
Hausner Int	0.629	0.144	0.194	37.954	0.357	0.024	0.008
<i>Ej</i>	0.798	0.175	0.222	101.694	0.571	0.000	0.019
Sr	0.681	0.171	0.214	50.266	0.330	0.000	0.014
<i>faw</i>	0.009	0.156	0.198	0.005	0.000	0.000	0.003
Duration	0.164	0.147	0.199	1.599	0.000	0.000	0.002
Tm	0.013	0.149	0.190	0.009	0.000	0.000	0.004
Sn	0.075	0.188	0.233	0.327	0.032	0.000	0.004
Spectral PHA	0.847	0.164	0.207	146.735	0.649	0.218	0.098
<i>fmax</i>	-0.013	0.149	0.190	0.009	0.000	0.000	0.003
<i>vs</i>	0.210	0.201	0.254	2.688	0.000	0.000	0.003

Рассмотрим амплитудные параметры с целью удаления излишних признаков. Очевидно, что наибольшая корреляция наблюдается для максимальных и среднеквадратических горизонтальных ускорений, но при этом максимальные ускорения лучше коррелируют с интенсивностью (0.77 против 0.68). Меньше всего амплитудные параметры коррелируют с максимальными смещениями, что говорит о том, что в данном параметре может содержаться информация, необходимая для уточнения модели; с интенсивностью также наблюдается низкая корреляция (0.51).

Энергетические параметры, такие как площадь реального спектра, индекс полной входной энергии, интенсивность Ариаса и кумулятивная абсолютная скорость имеют одинаковую корреляцию с интенсивностью равную 0.7. При этом интенсивность Ариаса и индекса полной входной энергии прямо связаны между собой, их корреляция составила 0.94.

Среди спектральных параметров наилучшая корреляция с интенсивностью получена для максимума амплитудного спектра Фурье. Для преобладающей и средневзвешенной частоты корреляция не наблюдается. Также не получена корреляция для такого важного параметра, как продолжительность колебаний. Следует отметить, что полученные результаты справедливы для данного набора данных. Поэтому можно предположить, что в нем недостаточна вариация ряда параметров, однако дисперсия всех параметров достаточно велика (Рисунок 3.10 б).

В качестве одного из параметров набора данных, формируемого из базы K-NET, нами была оставлена средневзвешенная скорость поперечной сейсмической волны по глубине 30 м, характеризующая грунтовые условия участка, на котором получена запись. Важно отметить, что здесь мы не рассматриваем влияние грунтовых условий на приращение интенсивности, поэтому в рамках данного анализа, как и ожидалось, получена низкая корреляция 0.16 (Рисунок 3.9). Тем не менее интересно отметить, корреляцию 0.55 данной величины со средневзвешенной частотой, 0.42 с площадью нормированного спектра, 0.4 с площадью реального спектра, 0.36

со среднеквадратическим ускорением и 0.31 с пиковым горизонтальным ускорением. Таким образом, данная величина не имеет жесткой связи ни с одним другим параметром и может рассматриваться как один из факторов инструментальной меры интенсивности, уточняющих результаты (во множественном регрессионном анализе, методе случайный лес и др.).

Результаты анализа значимости рассматриваемых параметров по комплексу методов показывают наибольшую информативность таких признаков, как пиковая горизонтальная скорость (PHV), кумулятивный квадрат ускорений – интенсивность Ариаса и максимальное значение амплитудного спектра Фурье. Также следует отметить интенсивность Анга и меру Фаджфара.

ВЫВОДЫ

1. Апрельские землетрясения 2002 года в Тбилиси характеризуются тем, что впервые на постсоветской территории без наличия весьма сильного землетрясения (Спитак, 1988; Рача, 1991) целенаправленно был получен целый набор инструментальных записей ускорений землетрясений в цифровом виде и проведено макросейсмическое обследование территории с плотной застройкой.

2. В ближней зоне разрушительного землетрясения в спектральном составе сейсмического воздействия проявилась предварительная вертикальная высокочастотная (ВЧ) составляющая, значительно превышающая по амплитуде т.н. «основной» сигнал на всех трех составляющих.

3. Появление большой амплитуды ВЧ составляющей сигнала сопутствует неупругим явлениям в среде и выявляется на ближних расстояниях от источника. На это указывают результаты исследований записей в ближней зоне сильных землетрясений и также специальных экспериментов.

4. Рассмотрены различные инструментальные показатели сейсмического воздействия по данным землетрясений на территории Тбилиси. Установлено, что наилучшим образом сейсмический эффект описывается энергетическими показателями, такими как: кумулятивная скорость (интенсивность Ариаса), площадь реального спектра (Заалишвили), площадь спектральной псевдоскорости (интенсивность Хаузнера). С данными показателями тесно связаны такие параметры как преобладающий период, средневзвешенная частота и продолжительность колебаний.

5. Из базы данных сильных движений K-NET сделана выборка записей с различными грунтовыми условиями, эпицентрными расстояниями, магнитудами, охватывающая широкий диапазон интенсивностей и спектрального состава.

6. 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, мер Заалишвили (площади спектра, площади нормированного спектра, средневзвешенной частоты колебаний) и создан соответствующий набор данных.

7. Выполнена оценка различных параметров сейсмических записей подходящих для разработки меры «инструментальной интенсивности» по данным расчета коэффициента корреляции Пирсона, F-теста, важности признаков по модели «случайный лес» и взаимной совместной информации.

8. В результате по целому ряду критериев установлены наиболее подходящие «кандидаты» для конструирования «инструментальной меры макросейсмической интенсивности», а также задания входных параметров моделей машинного обучения (как интерпретируемых, так и неинтерпретируемых).

9. Наиболее информативными признаками являются пиковая горизонтальная скорость (PHV), кумулятивный квадрат ускорений – интенсивность Ариаса, максимальное значение амплитудного спектра Фурье, интенсивность Анга и мера Фаджфара.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ МЕРЫ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

4.1. Метод опорных векторов

Метод опорных векторов (support vector), называемый ранее алгоритмом «обобщенного портрета», был разработан советскими математиками В. Н. Вапником и А. Я. Червоненкисом и с тех пор приобрел широкую популярность. Основная идея классификатора на опорных векторах заключается в том, чтобы строить разделяющую поверхность с использованием только небольшого подмножества точек, лежащих в зоне, критической для разделения [Вапник, Червоненкис, 1974]. Данный метод может быть эффективно использован для решения задач регрессии [Smola, Schölkopf, 2004].

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. Так, если прогнозное значение попадает в область гиперплоскости, то потери равны нулю. В противном случае потери равны разности прогнозного и фактического значений [Вапник, Червоненкис, 1974].

Перечислим преимущества метода опорных векторов перед методом наименьших квадратов.

1. SVR более устойчив к выбросам в данных. В отличие от метода наименьших квадратов, на который могут сильно повлиять выбросы, SVR использует функцию потерь, которая штрафует большие ошибки, поэтому они меньше влияют на общую точность модели.

2. SVR более гибок в своей способности моделировать нелинейные данные, чем метод наименьших квадратов, который ограничен только линейными моделями. Это делает его полезным для моделирования сложных

отношений между переменными, которые могут быть нелинейными по своей природе.

3. SVR имеет лучшие возможности обобщения, чем метод наименьших квадратов, поскольку он использует методы регуляризации, чтобы избежать переобучения и улучшить свою способность точно обобщать невидимые точки данных.

Расчеты выполнялись с использованием библиотеки `sklearn`. Для оценки эффективности моделей с наиболее равномерным использованием имеющихся данных применялась процедура кроссвалидации (перекрестной проверки) [Hastie et al., 2009].

Машина опорных векторов (SVM) — это метод классификации шаблонов и техника регрессии, который успешно использовался в ряде приложений [Drucker et al., 1997; Furey et al., 2000; Dibike et al., 2001; Foody, Mathur, 2004]. Функция может быть функцией классификации или функцией общей регрессии. В SVM основная цель состоит в том, чтобы разделить два класса с помощью функции, которая выполняется путем размещения границы между двумя разными классами и ориентации ее таким образом, чтобы обеспечить максимальную границу. Например, на рисунке 4.1 показано множество возможных линейных классификаторов, которые могут разделять данные, но есть только один, который можно максимизировать по границе (максимизирует расстояние между ближайшей точкой данных каждого класса). Этот линейный классификатор называется оптимальной разделяющей гиперплоскостью. Максимальная граница имеет хорошие возможности обобщения. Ближайшие точки данных используются для определения запаса и известны как векторы поддержки (Рисунок 4.2).

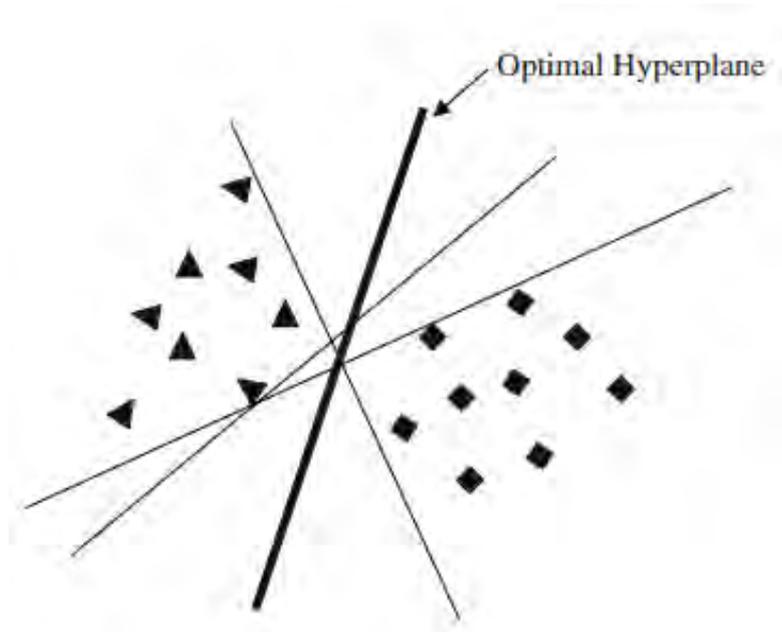


Рисунок 4.1. Оптимальная разделяющая гиперплоскость

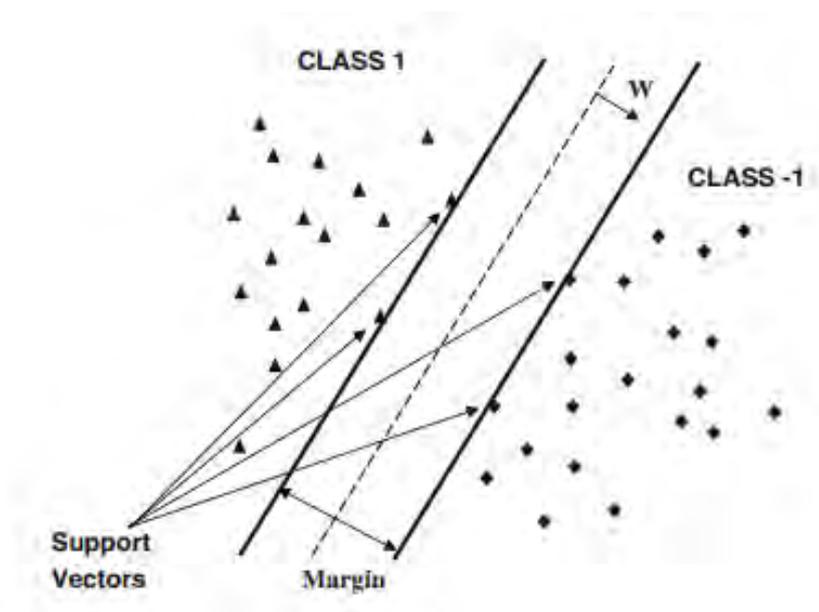


Рисунок 4.2. Опорные векторы с максимальным зазором

Рассмотрим задачу разделения множества обучающих векторов (D), принадлежащих двум отдельным классам, как:

$$D = \{(x^1, y^1), \dots, (x^n, y^n)\},$$

$$x \in R^n, y \in \{-1, 1\}$$

(4.1)

где $y = a$ – двоичная величина представляющая два класса (+1 и -1), x – входной вектор.

Рассматриваемая гиперплоскость может быть представлена в виде:

$$w \cdot x + b = 0, \quad w \in R^n, b \in R \quad (4.2.)$$

Уравнение (4.2) обладает некоторой избыточностью. Для устранения которой рассматривается каноническая гиперплоскость [Varnik, 1995], удовлетворяющая следующим условиям:

$$\begin{aligned} w \cdot x + b &= 1, \\ w \cdot x + b &= -1. \end{aligned} \quad (4.3)$$

Рисунок 4.3 иллюстрирует эту идею: показано расстояние от ближайшей точки до каждой гиперплоскости.

Разделяющая гиперплоскость в канонической форме должна удовлетворять следующим условиям:

$$y_i |(w \cdot x_i) + b| \geq 1, \quad i = 1, \dots, n. \quad (4.4)$$

Расстояние $d(w, b; x)$ точки x от гиперплоскости (w, b) :

$$d(w, b; x) = \frac{|(w \cdot x_i) + b|}{\|w\|} \quad (4.5)$$

Зазор ($\rho(w, b)$) представляет собой сумму абсолютных расстояний между гиперплоскостью и ближайшей точкой набора данных каждого класса +1 и -1 (Рисунок 4.3):

$$\rho(w, b) = \min_{class-1} d(w, b; x^i) + \min_{class+1} d(w, b; x^j) = \frac{2}{\|w\|} \quad (4.6)$$

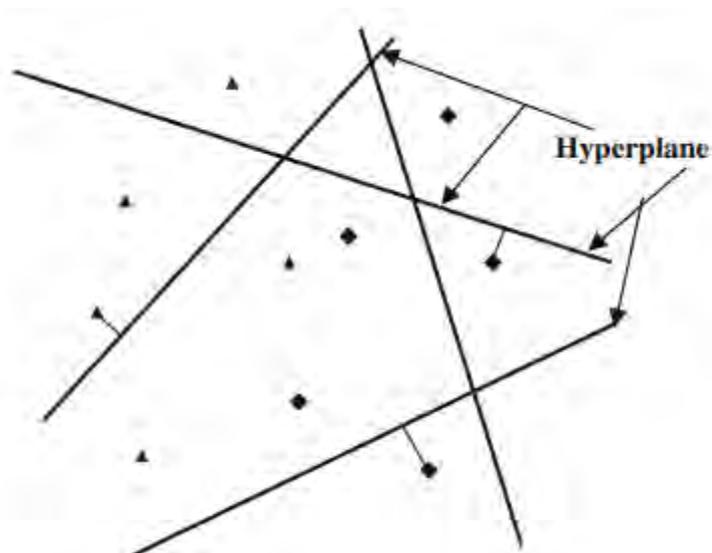


Рисунок 4.3. Каноническая гиперплоскость

Гиперплоскость должна отделять набор векторов без ошибок, а расстояние между ближайшими векторами на плоскости должно быть максимальным. Для максимизации этого зазора гиперплоскость должна отделять набор векторов без ошибок, а расстояние между ближайшими векторами на плоскости должно быть максимальным. Максимизация этого зазора приводит к следующей задаче ограниченной оптимизации при ограничениях-неравенствах уравнения (4.4):

$$\min \left\{ \frac{1}{2} \|w\|^2 \right\} \quad (4.7)$$

В случае, когда линейная опорная гиперплоскость неуместна, SVM применяет «трюк ядра» для поддержки гиперплоскости (Boser et al., 1992). Трюк с ядром — это метод, позволяющий легко преобразовать алгоритм обучения линейной классификации в нелинейный путем отображения исходных наблюдений в нелинейное пространство более высокой размерности, так что линейная классификация в новом пространстве эквивалентна нелинейной классификации в исходном пространстве. Преобразование может быть нелинейным. Для нелинейных случаев использовались некоторые общие ядра, такие как полиномиальное (однородное), полиномиальное (неоднородное), радиальная базисная

функция, функция Гаусса, сигмовидная функция и т. д. SVM также можно применять к задачам регрессии путем введения альтернативной функции потерь, которая модифицирована для включения меры расстояния [Smola, 1996]. Возможные функции потерь: квадратичная, Лапласа, е-нечувствительная и Хубера. В регрессии опорных векторов (SVR) основная идея заключается в отображении исходных данных в пространстве признаков с высокой размерностью с помощью неизвестной функции нелинейного отображения и дальнейшем проведении линейной регрессии в этом пространстве.

4.2. Нормализация данных

В Геофизическом институте ВНЦ РАН создана база данных сильных движений, включающая данные со всего мира (США, Япония, Тайвань, Греция, Грузия) [Заалишвили и др., 2013]. Для анализа в данной работе были отобраны записи землетрясений, зарегистрированных системой K-NET (Япония, www.kyoshin.bosai.go.jp) [National Research ..., 2019]. База содержит более 10 000 записей на 1000 станций с различными грунтовыми условиями с интенсивностью MSK от 5 баллов и выше, начиная с мая 1996 г. по декабрь 2013 г. Также в базе данных содержатся записи землетрясений с малыми эпицентрными расстояниями от 0 до 3 км.

Из базы данных была сделана выборка, содержащая 150 записей с различными эпицентрными расстояниями, магнитудами и грунтовыми условиями. Набор данных был дополнен логарифмами параметров для последующего регрессионного анализа. Данные были отцентрированы и нормированы на дисперсию. Соответствующие распределения приведены на рисунке 4.4. Видно, что данные имеют логнормальное распределение. Соответствующая коробочная диаграмма приведена на рисунке 4.5. Коробочная диаграмма описывает распределение набора данных, показывая медиану, квартили, диапазон и выбросы. Блочная диаграмма – это

графическое представление числовых данных, основанное на сводке из пяти чисел. Она состоит из поля, в котором заключены средние 50% данных (межквартильный диапазон), с линиями, выходящими из поля, чтобы показать остальную часть распределения.

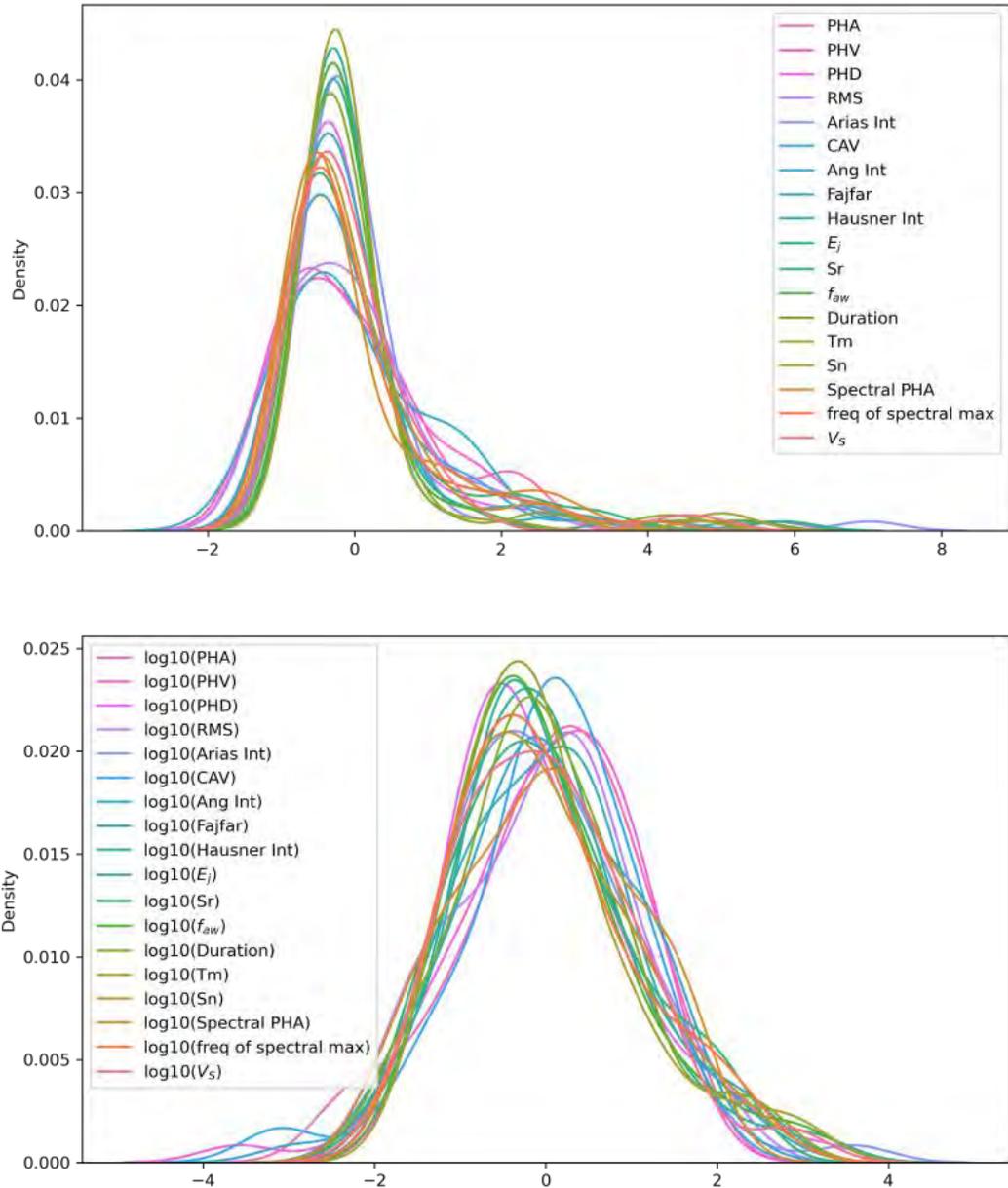


Рисунок 4.4. Распределение нормированных данных

Нижняя линия представляет 25-й процентиль (Q1), а верхняя линия представляет 75-й процентиль (Q3). Медиана представлена линией внутри этого прямоугольника. Далее показаны выбросы, которые могут

присутствовать в наборе данных в интервалах: разность первого квартиля и полутора межквартильных расстояний; сумма третьего квартиля и полутора межквартильных расстояний. Данные, выходящие за пределы указанных интервалов обычно считаются выбросами. Хорошо видно, что в логарифмическом масштабе «выбросов» значительно меньше. Выбросы не были исключены из набора данных по двум причинам: во-первых они могут содержать данные важные для анализа и, во-вторых, метод опорных векторов хорошо справляется с подобными выбросами.

4.3. Регрессионный анализ

На первом этапе исследовалась зависимость сейсмической интенсивности от каждого параметра в отдельности [Заалишвили и др., 2020]. Все результаты приведены в табл. 4.1. Рассчитаны параметры критерия Фишера (F-test), уровня значимости (p-value), коэффициент детерминации R^2 , средние абсолютные (MAE) и среднеквадратические (RMS) отклонения. Для критерия Фишера рассчитаны соответствующие вероятности, значения p-value более 0.05 выделены жирным шрифтом. Следует отметить, что критерий для p-value <0.05 является необходимым, но вовсе не достаточным условием выбора модели. В частности значительное количество параметров, для которых выполняется p-value <0.05 имеют низкий R^2 . Наилучший результат получен для пиковой скорости с коэффициентом детерминации $R^2=0.76$, причем, не только в логарифмическом, но и в линейном масштабе с $R^2 = 0.73$ (Рисунок 4.6). Зависимости для различных инструментальных мер приведены на рисунке 4.7. Для спектральных характеристик прямой зависимости не получено (Рисунок 4.8). Относительно высокое значение коэффициента детерминации $R^2 = 0.59$ получено для меры Фаджфара.

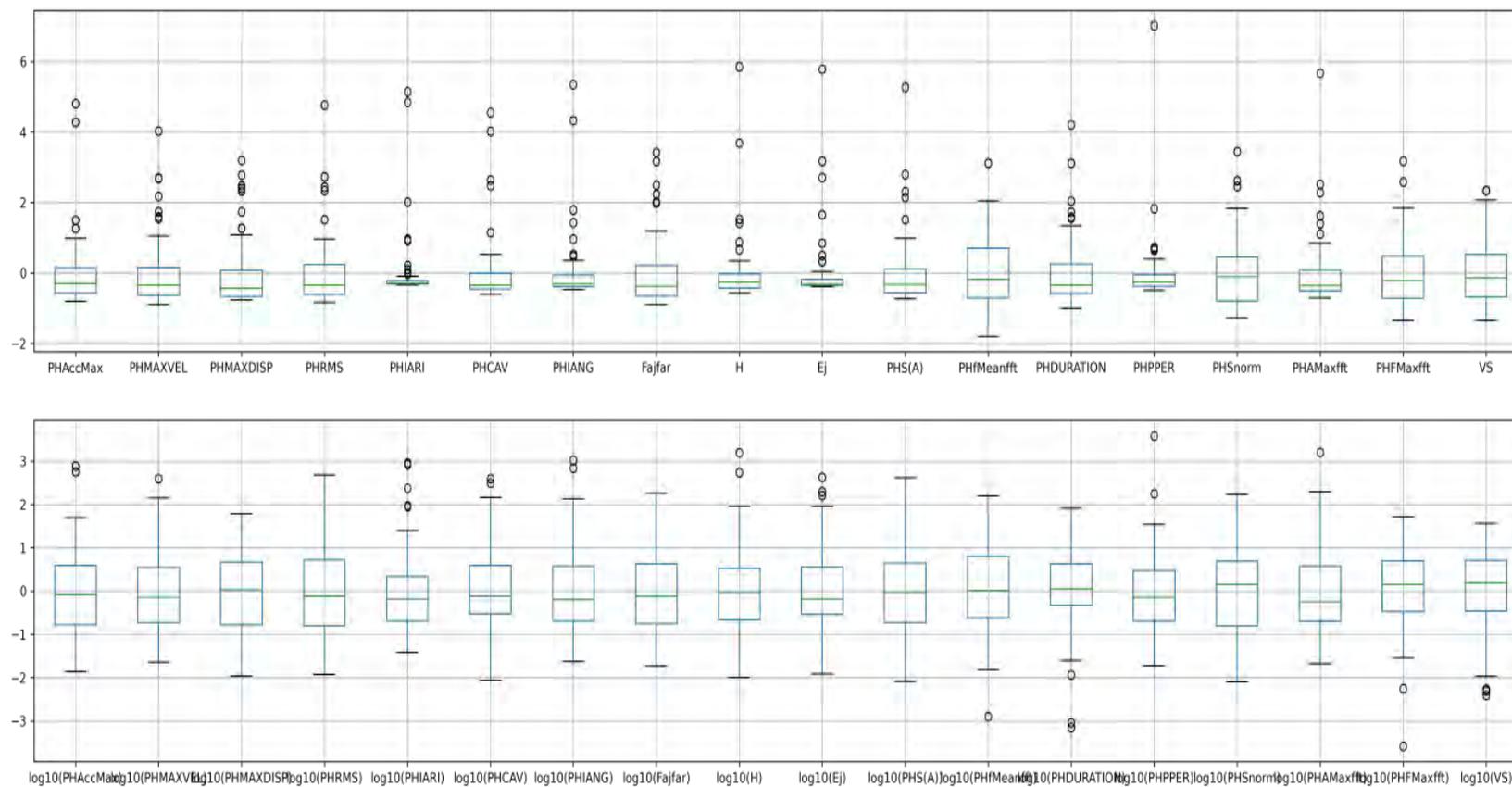


Рис. 4.5. Коробочная диаграмма исходных данных: анализируемых параметров (а) и параметров в логарифмическом масштабе (б)

На следующем этапе рассмотрены регрессионные выражения зависимости интенсивности от двух параметров при различных их комбинациях. В таблице 4.2. приведены значения с максимальным R^2 до 0.7 и минимальными MAE до 0.35. Статистические критерии F-test и p-value приведены для каждого из параметров.

Нормированные коэффициенты. Комбинация двух параметров позволила повысить значения коэффициента детерминации, в частности при совместном использовании скорости и средневзвешенного ускорения до 0.82 и пиковой скорости до 0.8 (Рисунок 4.9). При этом наилучший результат получен для среднеквадратического значения ускорения (RMS) и меры Фаджфара (Fajfar). Далее следуют сочетания разных параметров с пиковой скоростью. Лучшее из них с кумулятивной абсолютной скоростью, $R^2=0.82$, MAE=0.22 (Рисунок 4.9). Модели на основе сочетания пиковой скорости с различными определениями ускорения (пиковыми РНА и среднеквадратическими RMS) приведены на рисунке. 4.10. Интенсивность Анга занимает 6 и 7 места в рейтинге двухпараметрических моделей (Таблица 4.2).

Представляется интересным рассмотреть модели, в которые входят параметры, связанные со спектральными особенностями воздействия: частота пикового ускорения, средневзвешенная частота и площадь нормированного спектра, которая характеризует ширину спектра. При этом из них наилучший результат получен для частоты, соответствующей максимуму спектра, и пикового горизонтального ускорения, а для ширины спектра (S_n) и средневзвешенной частоты в комбинации с пиковой скоростью (PHV).

Таблица 4.1. – Регрессионные модели для одного параметра

	Parameters	F-test	f_percent	pi-value	R^2	MAE	RMSE	Coeff	Intercept	Coeff_norm	Intercept_norm
0	log10(Ang Int)	4385.615	1	0	0.855797	0.323958	0.41609	2.162942	1.0303	0.949116	7.782661
1	log10(Arias Int)	3389.465	1	0	0.804102	0.394294	0.484971	1.560041	2.788921	0.899461	7.781331
2	log10(Spectral PHA)	2713.37	1	9.3E-295	0.760868	0.4182	0.53582	2.690684	2.980906	0.878044	7.745144
3	log10(PHA)	2446.804	1	7.2E-278	0.735073	0.44132	0.563979	2.553823	1.767044	0.87249	7.803146
4	log10(RMS)	1894.529	1	2.4E-238	0.721481	0.442743	0.578267	2.445502	3.93071	0.868618	7.773851
5	log10(PHV)	1827.867	1	4.3E-233	0.630799	0.490968	0.665782	3.655405	3.286988	0.790396	7.879877
6	log10(Sr)	1174.125	1	6.6E-174	0.595845	0.540336	0.696586	1.724793	3.518142	0.747646	7.702143
7	log10(Fajfar)	643.4062	1	2.4E-111	0.345078	0.656631	0.886738	2.454886	3.879868	0.621804	7.902813
8	log10(CAV)	458.5878	1	7.45E-85	0.324092	0.698898	0.900833	1.338716	3.930172	0.523973	7.817376
9	log10(Tm)	88.72711	1	2.73E-20	0.129542	0.799156	1.02229	-0.62885	7.431959	-0.25455	7.638199
10	log10(freq of spectral max)	88.72711	1	2.73E-20	0.129485	0.799178	1.022324	0.628434	7.432119	0.254387	7.638223
11	log10(f_{aw})	82.78735	1	4.4E-19	0.108308	0.808283	1.034684	1.273141	6.668301	0.236065	7.655281
12	log10(Sn)	33.51195	1	9.32E-09	0.047413	0.832174	1.069431	0.6105	7.281359	0.130727	7.681332
13	log10(PHD)	49.40463	1	3.72E-12	0.016595	0.835332	1.086592	0.469708	7.474131	0.24155	7.803545
14	log10(Duration)	21.78829	0.999997	3.43E-06	0.010545	0.839592	1.08993	-0.1702	7.949081	-0.07868	7.688822
15	log10(V_S)	1.316733	0.748563	0.251438	-0.01292	0.850184	1.102779	0.29644	6.966238	0.060704	7.69801

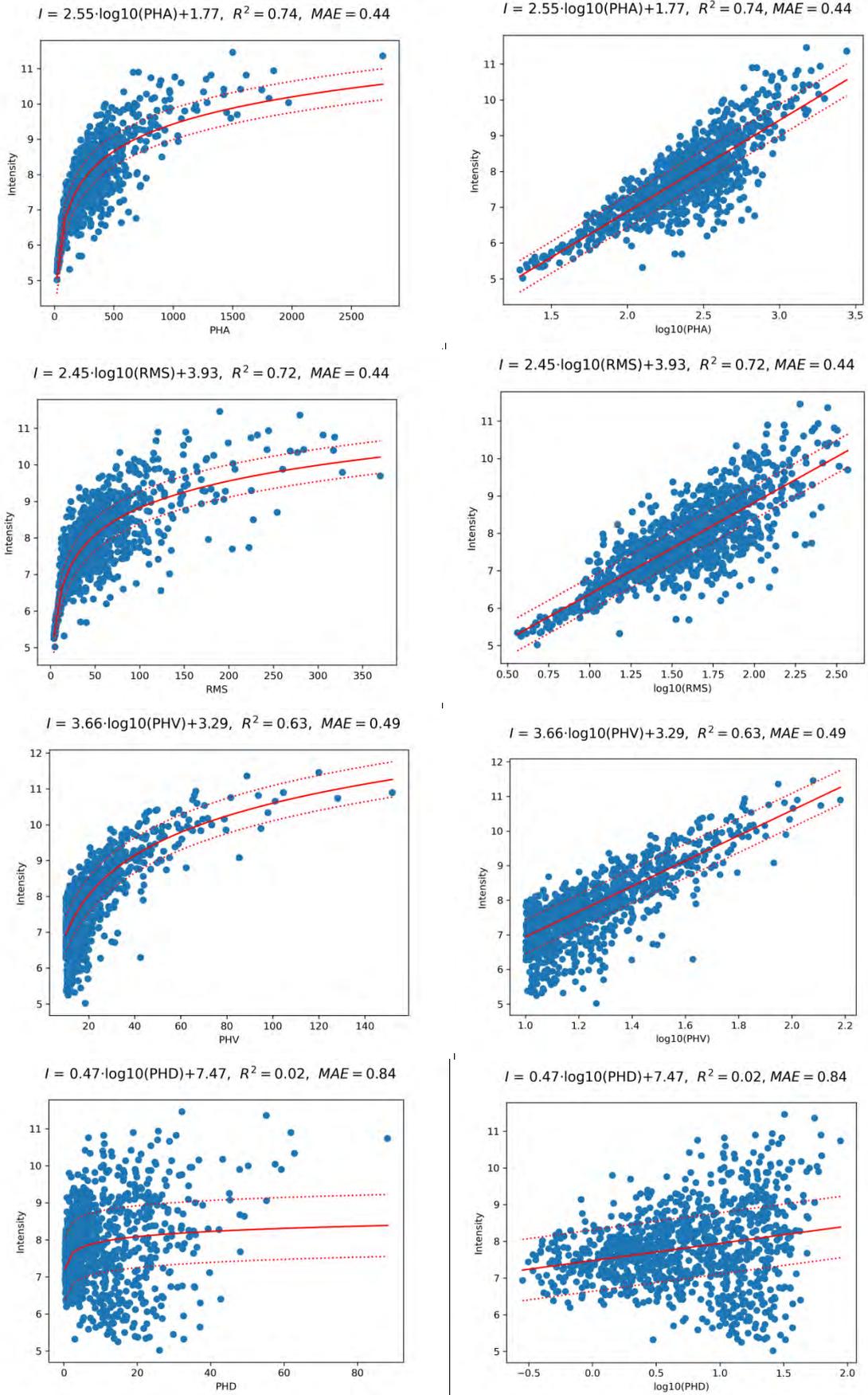


Рисунок 4.6. Связь амплитудных характеристик с макросейсмической ИНТЕНСИВНОСТЬЮ

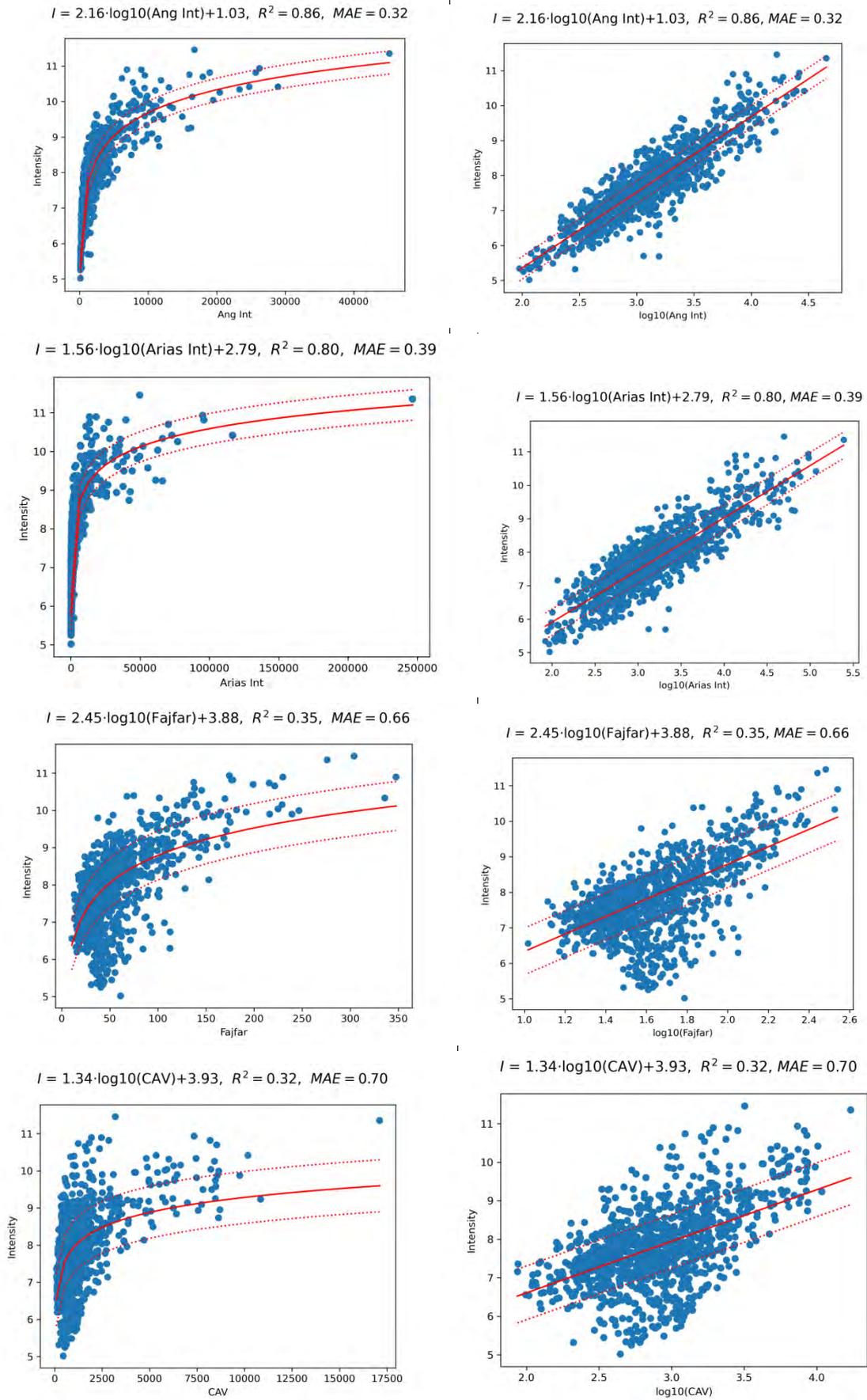
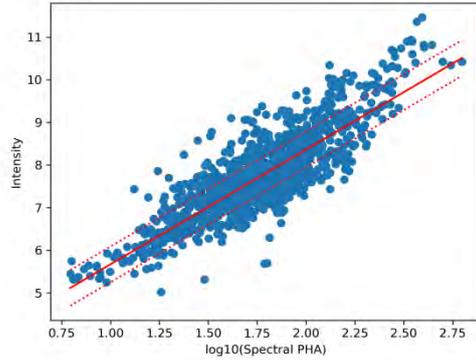
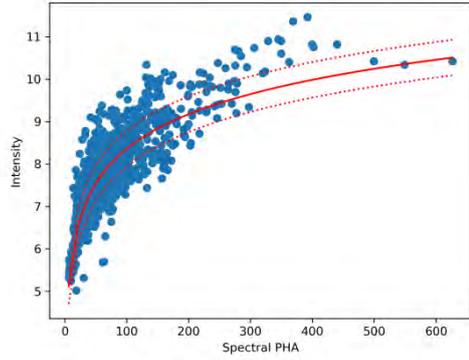


Рисунок 4.7. Связь различных инструментальных мер с сейсмической интенсивностью

$$I = 2.69 \cdot \log_{10}(\text{Spectral PHA}) + 2.98, R^2 = 0.76, MAE = 0.42$$

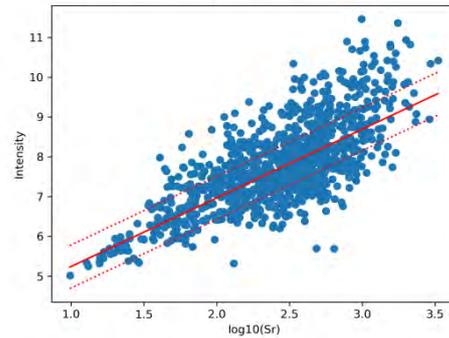
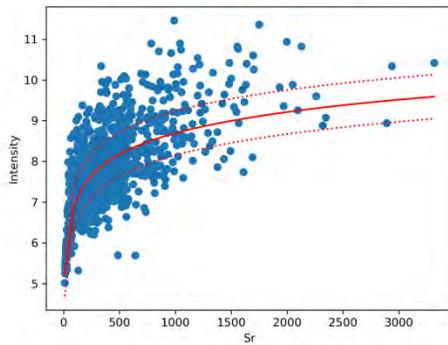
$$I = 2.69 \cdot \log_{10}(\text{Spectral PHA}) + 2.98, R^2 = 0.76, MAE = 0.42$$



а)

$$I = 1.72 \cdot \log_{10}(\text{Sr}) + 3.52, R^2 = 0.60, MAE = 0.54$$

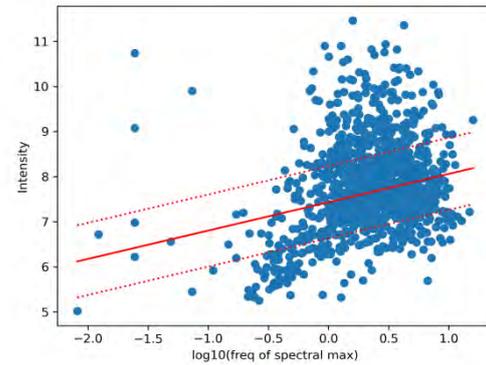
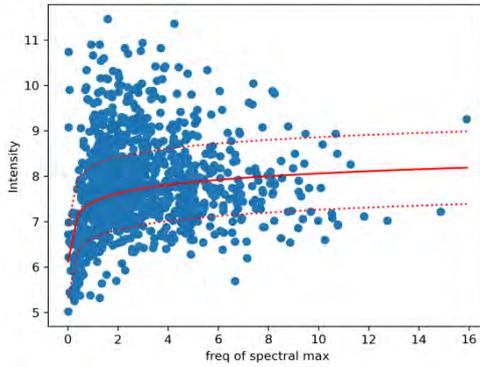
$$I = 1.72 \cdot \log_{10}(\text{Sr}) + 3.52, R^2 = 0.60, MAE = 0.54$$



б)

$$I = 0.63 \cdot \log_{10}(\text{freq of spectral max}) + 7.43, R^2 = 0.13, MAE = 0.80$$

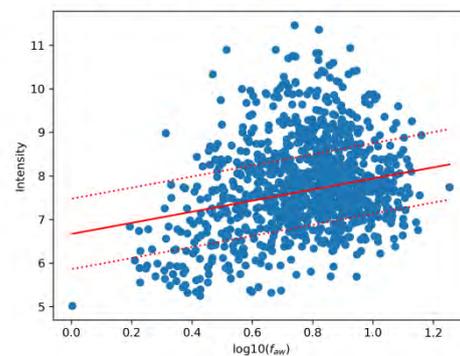
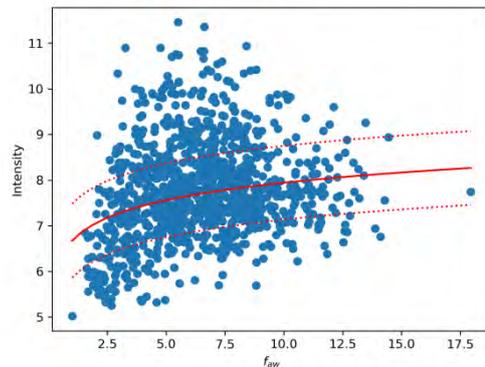
$$I = 0.63 \cdot \log_{10}(\text{freq of spectral max}) + 7.43, R^2 = 0.13, MAE = 0.80$$



в)

$$I = 1.27 \cdot \log_{10}(f_{av}) + 6.67, R^2 = 0.11, MAE = 0.81$$

$$I = 1.27 \cdot \log_{10}(f_{av}) + 6.67, R^2 = 0.11, MAE = 0.81$$



г)

Рисунок 4.8. Зависимость интенсивности от максимума спектра (а), площади спектра (б), частоты максимума спектра (в) и средневзвешенной частоты (в) колебаний

Таблица 4.2. – Регрессионные модели для двух параметров

№	Parameters	F-test	f_percent	pi-value	R^2	MAE	RMSE	Coeff	Intercept	Coeff_norm	Intercept_norm
0	['log10(RMS)', 'log10(Fajfar)']	[1895; 643]	[1; 1]	[0 0]	0,91	0,26	0,33	[2,08; 2,05]	1,20	[0,74; 0,52]	7,83
1	['log10(PHV)', 'log10(Ang Int)']	[1828; 4386]	[1; 1]	[0 0]	0,90	0,27	0,34	[1,84; 1,5]	0,84	[0,4; 0,66]	7,83
2	['log10(Fajfar)', 'log10(Spectral PHA)']	[643; 713]	[1; 1]	[0 0]	0,90	0,28	0,35	[1,72; 2,31]	0,89	[0,44; 0,75]	7,80
3	['log10(PHV)', 'log10(Spectral PHA)']	[1828; 2713]	[1; 1]	[0 0]	0,89	0,27	0,36	[2,3; 1,84]	1,65	[0,5; 0,6]	7,79
4	['log10(Ang Int)', 'log10(Fajfar)']	[4386; 643]	[1; 1]	[0 0]	0,88	0,31	0,38	[1,82; 1,03]	0,42	[0,8; 0,26]	7,81
5	['log10(PHA)', 'log10(PHV)']	[2447; 1828]	[1; 1]	[0 0]	0,88	0,30	0,38	[1,83; 2,31]	0,61	[0,63; 0,5]	7,85
6	['log10(PHV)', 'log10(RMS)']	[1828; 1895]	[1; 1]	[0 0]	0,88	0,31	0,39	[2,54; 1,62]	2,11	[0,55; 0,57]	7,84
7	['log10(Arias Int)', 'log10(Spectral PHA)']	[3389; 2713]	[1; 1]	[0 0]	0,87	0,30	0,39	[0,95; 1,46]	2,16	[0,55; 0,48]	7,79
8	['log10(Ang Int)', 'log10(Sn)']	[4386; 34]	[1; 1]	[0 0]	0,87	0,32	0,40	[2,24; - 0,68]	1,24	[0,98; -0,15]	7,80
9	['log10(Ang Int)', 'log10(Tm)']	[4386; 89]	[1; 1]	[0 0]	0,87	0,32	0,40	[2,36; 0,56]	0,64	[1,03; 0,23]	7,81
10	['log10(Ang Int)', 'log10(freq of spectral max)']	[4386; 89]	[1; 1]	[0 0]	0,87	0,32	0,40	[2,36; - 0,56]	0,64	[1,03; -0,23]	7,81

11	['log10(PHA)', 'log10(Fajfar)']	[2447; 643]	[1; 1]	[0 0]	0,87	0,32	0,40	[2,28; 1,69]	-0,32	[0,78; 0,43]	7,82
12	['log10(Ang Int)', 'log10(Spectral PHA)']	[4386; 2713]	[1; 1]	[0 0]	0,87	0,30	0,40	[1,62; 0,83]	1,28	[0,71; 0,27]	7,79
13	['log10(Ang Int)', 'log10(\$V_S\$)']	[4386; 1]	[1; 0,75]	[0 0]	0,87	0,32	0,40	[2,21; - 0,64]	2,46	[0,97; -0,13]	7,77
14	['log10(Ang Int)', 'log10(\$f_{aw}\$)']	[4386; 83]	[1; 1]	[0 0]	0,86	0,32	0,41	[2,29; - 0,82]	1,27	[1,01; -0,15]	7,79
15	['log10(Arias Int)', 'log10(CAV)']	[3389; 459]	[1; 1]	[0 0]	0,86	0,32	0,41	[2,24; - 1,23]	4,18	[1,29; -0,48]	7,79
16	['log10(PHD)', 'log10(Ang Int)']	[49; 86]	[1; 1]	[0 0]	0,86	0,32	0,41	[0,11; 2,14]	1,02	[0,05; 0,94]	7,78
17	['log10(Ang Int)', 'log10(Sr)']	[4386; 1174]	[1; 1]	[0 0]	0,86	0,32	0,42	[2,24; - 0,08]	1,01	[0,98; -0,04]	7,78
18	['log10(RMS)', 'log10(Duration)']	[1895; 22]	[1; 1]	[0 0]	0,86	0,32	0,42	[3,23; 1,06]	1,08	[1,15; 0,49]	7,78
19	['log10(Ang Int)', 'log10(Duration)']	[4386; 22]	[1; 1]	[0 0]	0,86	0,32	0,42	[2,16; - 0,02]	1,08	[0,95; -0,01]	7,78
20	['log10(RMS)', 'log10(Ang Int)']	[1895; 4386]	[1; 1]	[0 0]	0,86	0,32	0,42	[0,06; 2,12]	1,08	[0,02; 0,93]	7,78
21	['log10(Arias Int)', 'log10(Ang Int)']	[3389; 4386]	[1; 1]	[0 0]	0,86	0,32	0,42	[-0,03; 2,19]	1,02	[-0,01; 0,96]	7,78
22	['log10(RMS)', 'log10(Arias Int)']	[1895; 3389]	[1; 1]	[0 0]	0,86	0,32	0,42	[1,11; 1,06]	2,64	[0,39; 0,61]	7,78
23	['log10(Arias Int)', 'log10(Duration)']	[3389; 22]	[1; 1]	[0 0]	0,86	0,32	0,42	[1,62; - 0,55]	3,45	[0,93; -0,26]	7,78
24	['log10(CAV)', 'log10(Ang Int)']	[459; 386]	[1; 1]	[0 0]	0,86	0,32	0,42	[-0,15; 2,23]	1,25	[-0,06; 0,98]	7,78

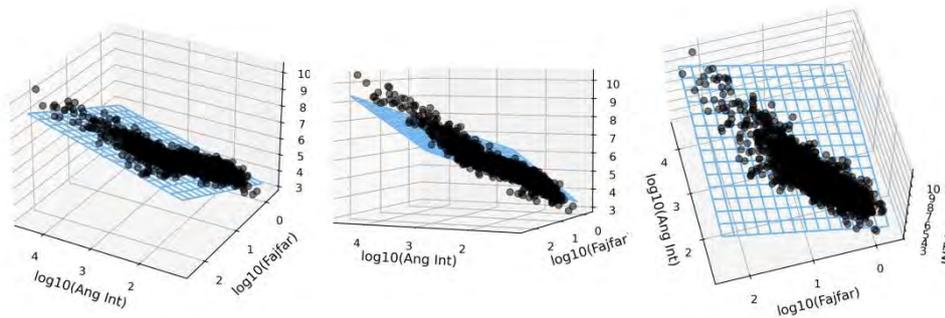
25	['log10(PHV)', 'log10(Sr)']	[1828; 1174]	[1; 1]	[0 0]	0,85	0,33	0,42	[2,95; 1,19]	1,22	[0,64; 0,52]	7,82
26	['log10(PHA)', 'log10(Ang Int)']	[2447; 4386]	[1; 1]	[0 0]	0,85	0,33	0,42	[0,72; 1,65]	0,95	[0,24; 0,72]	7,80
27	['log10(PHV)', 'log10(Arias Int)']	[1828; 3389]	[1; 1]	[0 0]	0,84	0,33	0,43	[2,01; 0,97]	2,24	[0,43; 0,56]	7,86
28	['log10(CAV)', 'log10(Spectral PHA)']	[459; 713]	[1; 1]	[0 0]	0,84	0,34	0,43	[0,79; 2,43]	1,18	[0,31; 0,79]	7,78
29	['log10(PHD)', 'log10(Spectral PHA)']	[49; 13]	[1; 1]	[0 0]	0,84	0,33	0,43	[0,62; 2,85]	2,30	[0,32; 0,93]	7,78
30	['log10(RMS)', 'log10(CAV)']	[1895; 459]	[1; 1]	[0 0]	0,84	0,34	0,43	[2,19; 0,96]	1,55	[0,78; 0,37]	7,76
31	['log10(PHA)', 'log10(Arias Int)']	[2447; 3389]	[1; 1]	[0 0]	0,84	0,34	0,43	[1,39; 0,91]	1,61	[0,47; 0,53]	7,80
32	['log10(Fajfar)', 'log10(Sr)']	[643; 174]	[1; 1]	[0 0]	0,84	0,34	0,44	[2,32; 1,64]	0,03	[0,59; 0,71]	7,81
33	['log10(PHD)', 'log10(RMS)']	[49; 95]	[1; 1]	[0 0]	0,83	0,34	0,45	[0,66; 2,62]	3,20	[0,34; 0,93]	7,77
34	['log10(Arias Int)', 'log10(Sr)']	[3389; 1174]	[1; 1]	[0 0]	0,83	0,35	0,45	[1,27; 0,59]	2,27	[0,73; 0,26]	7,77
35	['log10(PHA)', 'log10(\$f_{aw}\$)']	[2447; 83]	[1; 1]	[0 0]	0,83	0,35	0,45	[3,44; - 2,42]	1,56	[1,17; -0,45]	7,81
36	['log10(PHA)', 'log10(PHD)']	[2447; 49]	[1; 1]	[0 0]	0,82	0,36	0,46	[2,72; 0,57]	0,99	[0,93; 0,29]	7,82
37	['log10(Duration)', 'log10(Spectral PHA)']	[22; 3]	[1; 1]	[0 0]	0,82	0,37	0,46	[0,63; 3,11]	1,31	[0,29; 1,02]	7,78

38	['log10(PHA)', 'log10(CAV)']	[2447; 459]	[1; 1]	[0 0]	0,82	0,37	0,47	[2,32; 0,74]	0,15	[0,79; 0,29]	7,80
39	['log10(PHD)', 'log10(Arias Int)']	[49; 89]	[1; 1]	[0 0]	0,81	0,39	0,48	[-0,21; 1,63]	2,70	[-0,11; 0,94]	7,77
40	['log10(PHA)', 'log10(Sn)']	[2447; 34]	[1; 1]	[0 0]	0,81	0,37	0,48	[3,01; - 1,33]	1,59	[1,03; -0,29]	7,83
41	['log10(Arias Int)', 'log10(\$V_S\$)']	[3389; 1]	[1; 0,75]	[0 0]	0,81	0,39	0,48	[1,58; - 0,54]	4,07	[0,91; -0,11]	7,78
42	['log10(Arias Int)', 'log10(\$f {aw}\$)']	[3389; 83]	[1; 1]	[0 0]	0,80	0,39	0,48	[1,56; 0,04]	2,77	[0,9; 0,01]	7,78
43	['log10(Arias Int)', 'log10(Sn)']	[3389; 34]	[1; 1]	[0 0]	0,80	0,40	0,49	[1,57; - 0,34]	3,00	[0,9; -0,07]	7,80
44	['log10(CAV)', 'log10(Duration)']	[459; 22]	[1; 1]	[0 0]	0,80	0,38	0,49	[2,95; - 1,98]	2,20	[1,15; -0,91]	7,73
45	['log10(PHA)', 'log10(Spectral PHA)']	[2447; 2713]	[1; 1]	[0 0]	0,80	0,39	0,49	[1,49; 1,32]	1,95	[0,51; 0,43]	7,81
46	['log10(PHV)', 'log10(Tm)']	[1828; 89]	[1; 1]	[0 0]	0,80	0,39	0,49	[4,07; - 1,02]	2,41	[0,88; -0,41]	7,85
47	['log10(PHV)', 'log10(freq of spectral max)']	[1828; 89]	[1; 1]	[0 0]	0,80	0,39	0,49	[4,07; 1,02]	2,41	[0,88; 0,41]	7,85
48	['log10(Arias Int)', 'log10(Fajfar)']	[3389; 643]	[1; 1]	[0 0]	0,80	0,40	0,49	[1,34; 0,59]	2,56	[0,77; 0,15]	7,81
49	['log10(Arias Int)', 'log10(Tm)']	[3389; 89]	[1; 1]	[0 0]	0,80	0,40	0,50	[1,58; 0,23]	2,83	[0,91; 0,09]	7,80
50	['log10(Arias Int)', 'log10(freq of spectral max)']	[3389; 89]	[1; 1]	[0 0]	0,80	0,40	0,50	[1,58; - 0,23]	2,83	[0,91; -0,09]	7,80

51	['log10(RMS)', 'log10(\$f_{aw}\$)']	[1895; 83]	[1; 1]	[0 0]	0,79	0,39	0,50	[3,13; - 2]	4,43	[1,11; -0,37]	7,81
52	['log10(Sr)', 'log10(\$f_{aw}\$)']	[1174; 83]	[1; 1]	[0 0]	0,79	0,40	0,50	[3,2; - 4,35]	3,37	[1,39; -0,81]	7,75
53	['log10(\$f_{aw}\$)', 'log10(Spectral PHA)']	[83; 13]	[1; 1]	[0 0]	0,78	0,41	0,52	[-1,09; 2,98]	3,33	[-0,2; 0,97]	7,77
54	['log10(PHA)', 'log10(Tm)']	[2447; 89]	[1; 1]	[0 0]	0,78	0,41	0,52	[3,26; 0,98]	0,45	[1,12; 0,4]	7,84
55	['log10(PHA)', 'log10(freq of spectral max)']	[2447; 89]	[1; 1]	[0 0]	0,78	0,41	0,52	[3,26; - 0,98]	0,45	[1,12; -0,4]	7,84
56	['log10(PHA)', 'log10(Duration)']	[2447; 22]	[1; 1]	[0 0]	0,77	0,41	0,52	[2,85; 0,5]	0,29	[0,98; 0,23]	7,80
57	['log10(RMS)', 'log10(Spectral PHA)']	[1895; 2713]	[1; 1]	[0 0]	0,77	0,41	0,53	[0,7; 1,98]	3,14	[0,25; 0,65]	7,75
58	['log10(Spectral PHA)', 'log10(\$V_{S}\$)']	[2713; 1]	[1; 0,75]	[0 0]	0,77	0,41	0,53	[2,71; - 0,36]	3,82	[0,89; -0,07]	7,74
59	['log10(Spectral PHA)', 'log10(freq of spectral max)']	[2713; 89]	[1; 1]	[0 0]	0,77	0,41	0,53	[2,91; - 0,42]	2,72	[0,95; -0,17]	7,74
60	['log10(Tm)', 'log10(Spectral PHA)']	[89; 13]	[1; 1]	[0 0]	0,77	0,41	0,53	[0,42; 2,91]	2,72	[0,17; 0,95]	7,74

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 колебаний, по сути, это уточнение трехпараметрической модели, сочетающий в себе элементы меры Фаджфара и Анга.

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



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

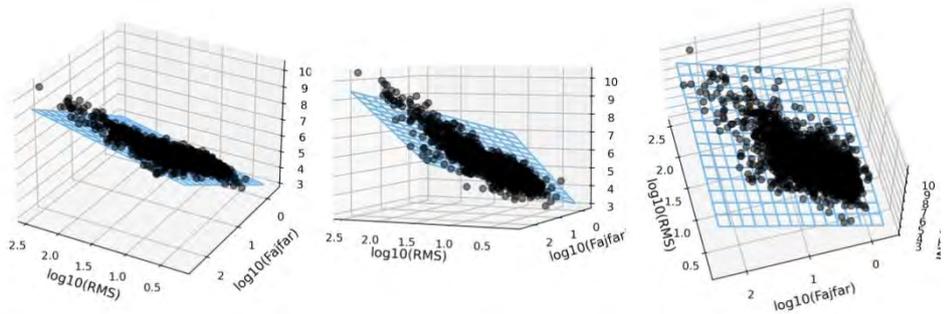


Рисунок 4.9. Регрессионные модели, основанные на мере Фаджфара-Анга

Индекс интенсивности Анга [Ang, 1990]:

$$I_C = (a_{rms})^{3/2} t_d^{1/2},$$

a_{rms} – среднеквадратическое ускорение:

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t_d} \int_0^{t_d} a(t)^2 dt}.$$

Мера Fajfar [Fajfar, 1995]:

$$I_F = PGV t_d^{1/4},$$

PGV – пиковая скорость.

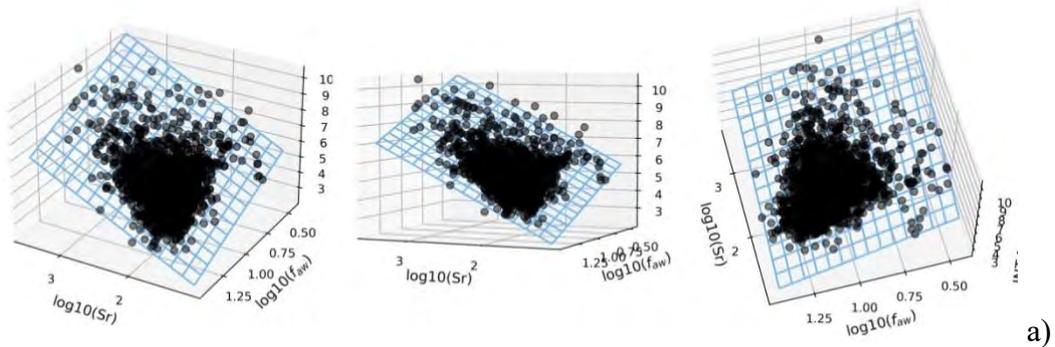
$I_{FA1} = RMS^{1.23} PGV^{1.34} t_d^{0.745}$ или, поскольку нас интересует соотношение между параметрами, соответствующие показатели степени можно представить в виде: 1.65 1.8 1 или 0.83 0.90 0.5.

$I_{FA2} = RMS^{0.9} PGV^{1.72} t_d^{0.43}$ 2.09 4 1 или 1.04 2.0 0.5.

Т.е. $I_{FA2} = RMS \cdot PGV^2 \cdot t_d^{1/2}$

Для двух основных параметров лучший результат получен для площади спектра и средневзвешенной частоты ($R^2 = 0.88$, $MAE = 0.23$) – рисунок 4.10. а. Для сравнения комбинация площади реального спектра с частотой колебаний спектрального максимума дает хуже результат – рис. 4.10 б.

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



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

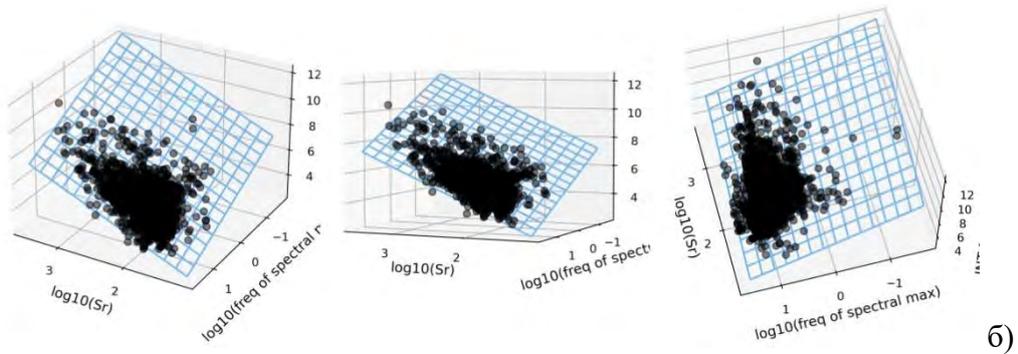
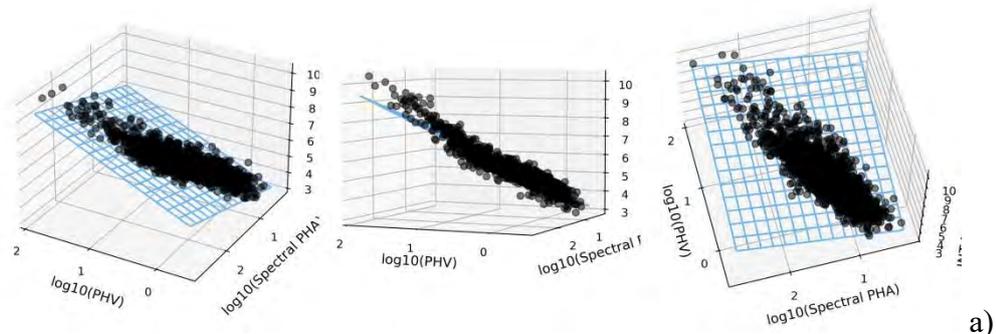


Рисунок 4.10. Регрессионные модели, основанные на площади спектра колебаний

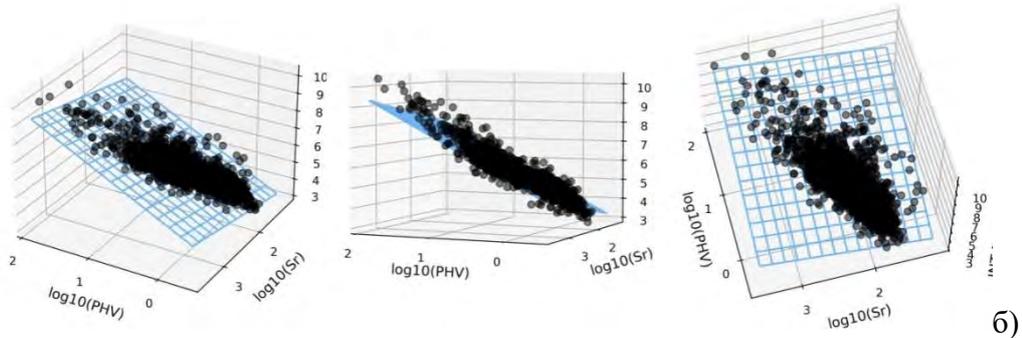
Поскольку лучший результат в модели с одним параметром был у пиковой горизонтальной скорости, следующие наиболее удачные модели получены с помощью добавления к пиковой скорости еще одного параметра.

При этом лучший результат получается в комбинации с максимумом спектра ускорений ($R^2 = 0.89$, $MAE = 0.23$) – рисунок 4.11 а. Далее в сочетании с площадью спектра ($R^2 = 0.87$, $MAE = 0.25$) – рисунок 4.11 б. И в сочетании с продолжительностью колебаний ($R^2 = 0.86$, $MAE = 0.26$) – рисунок 4.11 в.

$$I = 1.74 \cdot \log_{10}(\text{PHV}) + 0.93 \cdot \log_{10}(\text{Spectral PHA}) + 3.58, R^2 = 0.89, MAE = 0.23$$



$$I = 1.98 \cdot \log_{10}(\text{PHV}) + 0.66 \cdot \log_{10}(\text{Sr}) + 3.26, R^2 = 0.87, MAE = 0.25$$



$$I = 2.26 \cdot \log_{10}(\text{PHV}) + 0.26 \cdot \log_{10}(\text{Duration}) + 4.20, R^2 = 0.86, MAE = 0.26$$

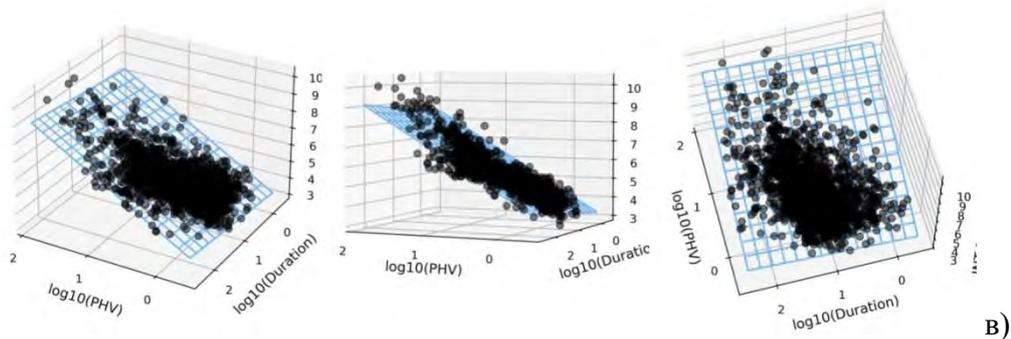


Рисунок 4.11. Регрессионные модели, основанные на пиковой горизонтальной скорости (PHV)

Следующие комбинации дают одинаковый результат ($R^2 = 0.85$, MAE = 0.27): пиковое ускорение, скорость поперечных волн, средневзвешенная частота. В дальнейшем при анализе трехпараметрических моделей представляет интерес рассмотреть их в комбинации с продолжительностью.

Комбинация пикового горизонтального ускорения и пиковой скорости также дает высокий $R^2 = 0.85$ при MAE = 0.27 – рисунок 4.12.

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

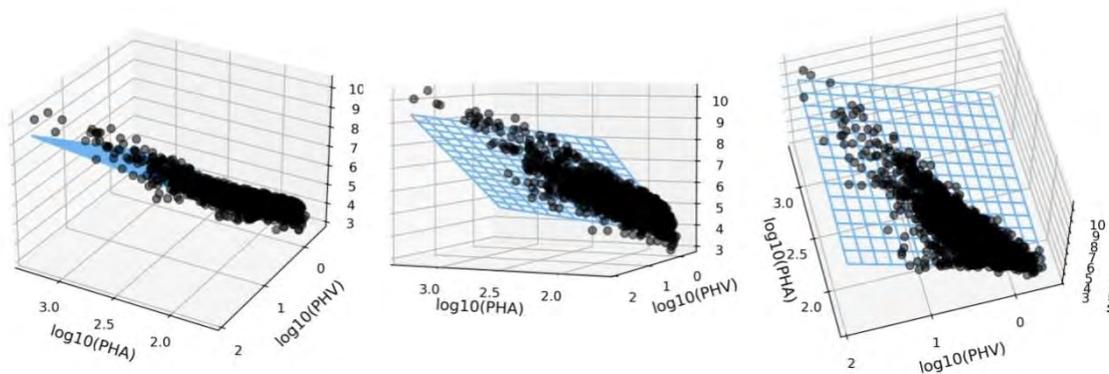


Рисунок 4.12. Регрессионные модели, основанные на пиковой горизонтальной скорости (PHV) и пиковом горизонтальном ускорении (PHA)

Влияние средней скорости поперечных волн в грунтах дает $R^2 = 0.85$ при MAE = 0.27 – рисунок 4.13.

$$I = 2.37 \cdot \log_{10}(\text{PHV}) - 0.03 \cdot \log_{10}(V_s) + 4.55, \quad R^2 = 0.85, \quad \text{MAE} = 0.27$$

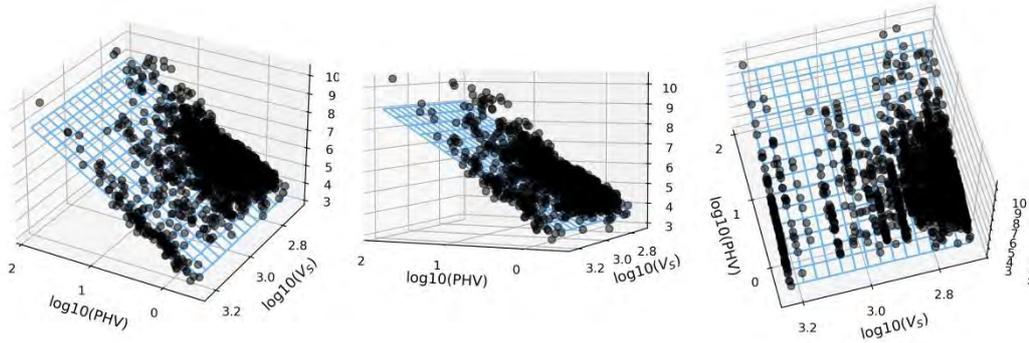


Рисунок 4.13. Учет скорости поперечных волн в грунтах

Комбинация пиковой горизонтальной скорости и средневзвешенной частоты колебаний дает $R^2 = 0.85$, $\text{MAE} = 0.27$. (Рисунок 4.14).

$$I = 2.30 \cdot \log_{10}(\text{PHV}) - 0.25 \cdot \log_{10}(f_{aw}) + 4.76, \quad R^2 = 0.85, \quad \text{MAE} = 0.27$$

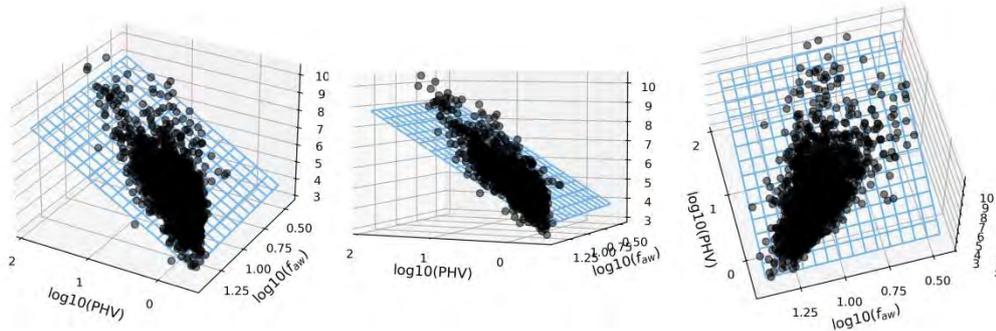


Рисунок 4.14. Модель, основанная на пиковой горизонтальной скорости и средневзвешенной частоте колебаний

Рассмотрим также параметры, описывающие спектральное разложение сигнала: комбинацию максимума спектра ускорений и соответствующей ему частоты – рисунок 4.15. При этом интенсивность пропорциональна квадрату спектральной амплитуды и обратно пропорциональна частоте колебаний этого максимума (с точностью до десятых коэффициента).

$$2.08 \cdot \log_{10}(\text{Spectral PHA}) - 1.07 \cdot \log_{10}(\text{freq of spectral max}) + 3.70, R^2 = 0.81, MAE = 0$$

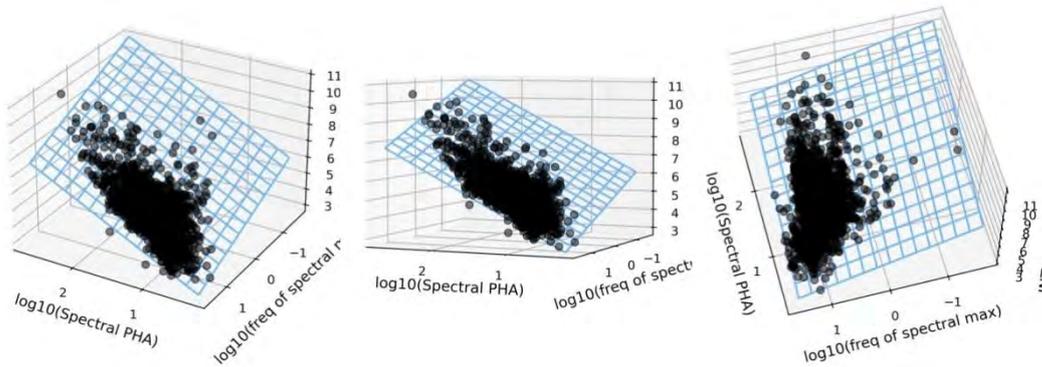


Рисунок 4.15. Модель, основанная на спектральном максимуме ускорений и частоте колебаний данного максимума

Для сравнения комбинация максимума спектра ускорений со средневзвешенной частотой дает худший результат по $R^2 = 0.79$. – рисунок 4.16.

$$I = -2.15 \cdot \log_{10}(f_{av}) + 1.93 \cdot \log_{10}(\text{Spectral PHA}) + 5.24, R^2 = 0.79, MAE = 0.31$$

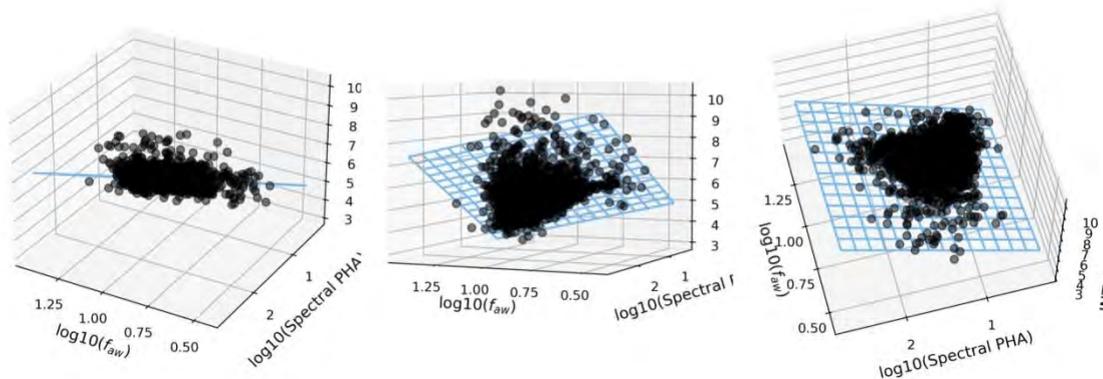


Рисунок 4.16. Модель, основанная на средневзвешенной частоте колебаний и максимуме спектра ускорений

Добавление средневзвешенной частоты в модель, содержащую пиковое горизонтальное ускорение также приводит к улучшению исходной модели для ускорений с $R^2 = 0.49$ на $R^2 = 0.78$ – рисунок 4.17.

$$I = 2.70 \cdot \log_{10}(\text{PHA}) - 3.40 \cdot \log_{10}(f_{aw}) + 3.57, \quad R^2 = 0.78, \quad \text{MAE} = 0.33$$

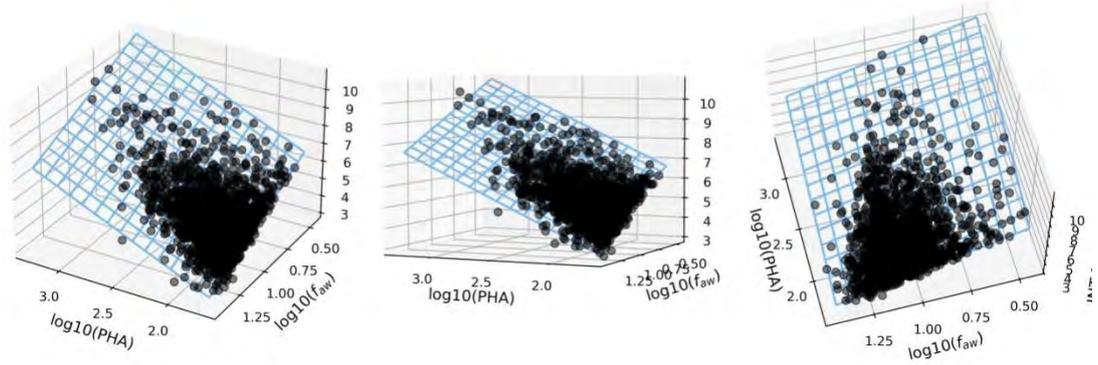


Рисунок 4.17. Модель, основанная на пиковом горизонтальном ускорении (PHA) и средневзвешенной частоте колебаний f_{aw}

ВЫВОДЫ

1. Для регрессионной модели с одним параметром наилучшие показатели метрик получены для пиковой горизонтальной скорости PGV: $R^2 = 0.76$, MAE = 0.29. Физический смысл имеет квадрат скорости, пропорциональный энергии, при этом пиковые значения соответствуют максимальным кратковременным воздействиям, т.е. энергии которую система не может поглотить и рассеять в ограниченный промежуток времени.

2. Введением дополнительных параметров к скорости удается повысить R^2 до 0.85 (с кумулятивной абсолютной скоростью) и 0.8–0.82 с различными сочетаниями ускорений (Рисунок 4.12).

3. Наилучшие показатели достигаются для модели с комбинацией среднеквадратической скорости и меры Фаджфара. Учитывая, что мера Фаджфара представляет собой произведение пиковой скорости на корень четвертой степени из продолжительности новый параметр можно рассматривать как модифицированную меру Фаджфара $PGV \cdot RMS^{3/4} \cdot Dur^{1/4}$.

4. Представляется интересным рассмотреть зависимости, полученные без участия пиковой скорости, и содержащие амплитудные и частотные характеристики: частоту спектрального максимума, среднеквадратическое ускорение и средневзвешенную частоту колебаний, энергию и продолжительность (Рисунок 4.10). Ускорения характеризуют силы, которые воздействуют на систему, на определенных преобладающих частотах. При этом согласно полученным закономерностям с увеличением преобладающей частоты интенсивность уменьшается. Аналогично с увеличением продолжительности (отрицательный коэффициент) происходит уменьшение интенсивности, т.е. вся энергия сигнала распределяется в более длительный промежуток времени и система успевает его поглощать без повреждений.

ГЛАВА 5. ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНОВА СЕЙСМИЧЕСКОГО РИСКА НА ПРИМЕРЕ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ТЕРРИТОРИИ ГОРОДА ВЛАДИКАВКАЗА

5.1. Задачи зонирования территорий по сейсмическому фактору

Для урбанизированных горных территорий проблема оценки и снижения сейсмического риска с целью разработки мер по снижению ущерба и управлению им является актуальной [Заалишвили и др., 2021]. В горных районах находится значительное количество промышленных и гражданских зданий, гидротехнических сооружений и объектов транспортной инфраструктуры, создающих различные виды антропогенного воздействия на геологическую среду. Они потенциально способствуют развитию процессов и явлений, требующих создания защитных мер. Интенсификация урбанизации, образование крупных городов и городских агломераций, увеличение объемов промышленного производства, а также рост населения связаны с интенсивным использованием ограниченных земельных, водных и минеральных ресурсов. Эффективность их использования и защита от опасных процессов во многом зависит от характера инженерно-геологических условий и степени их изученности. Концепция анализа факторов сейсмического риска использует возможности геоинформационных 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 позволяющих оценивать возможные потери [Yodgorov, 2018].

Факторами, определяющими сейсмический риск территорий, являются его основные составляющие: природные – геолого-тектонические, искусственно-техногенные, экологические, социально-экономические и административные, состояние которых определяет потенциал ущерба, его степень и последствия землетрясений. Каждый из этих факторов характеризуется особенностями состояния рассматриваемого фактора.

Современные геоинформационные технологии позволяют производить системную оценку состояния каждого фактора риска. Основой такой оценки является, конечно же, оценка сейсмической опасности. Единицы измерения которой 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. Как было показано ранее при сопоставлении шкал, наиболее близкой к непрерывной шкале является шкала MSK. Для решения инженерных задач проектирования различных защитных сооружений, в зависимости от жесткости элементов и размеров конструкций могут быть выбраны различные инструментальные параметры.

Актуальность также заключается в переходе в практике инженерных изысканий к дробным баллам сейсмической интенсивности. При этом осуществляется округление данных, полученных различными способами, до десятичных знаков, без оценки точности и статистической (вероятностной) обеспеченности получаемых результатов.

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, подвергнувшейся сейсмическому воздействию. Таким образом, данная характеристика является пространственной – требуется рассчитать количество зданий различного типа

и процентное соотношение повреждений 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 она не может быть непрерывной, в чем и заключается определение интенсивностей в форме баллов. Иными словами оценка не может иметь дробное значение хотя и может быть интерполирована между зонами различной интенсивности, но 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 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. 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.

Возникающая при этом задача соответствия цифровой модели реальным свойствам объектов решается на основе математического моделирования и сопоставления с инструментальными данными непосредственно на данных участках [Muzaev et al., 2019; Kharebov et al., 2019; Zaalishvili et al, 2020; 2021b; Заалишвили и др., 2022г; Мельков и др., 2022]. 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 поскольку одним из наиболее обоснованных методов является инструментальный метод СМР, например, формулы способа слабых землетрясений, мощных источников, способа сейсмических жестокостей основаны 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), то 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 использованием оценок в форме верхней границы доверительных интервалов**, что в обоих случаях (использование закономерностей «инженерный параметр – балл сейсмической интенсивности» и «балл сейсмической интенсивности – инженерный параметр») даст обоснованный «запас прочности».

Выполнен анализ различных инструментальных мер сейсмической интенсивности по базе данных сети K-NET. В результате получены модели, основанные на различных параметрах (Глава 3). Полученные закономерности для сейсмической интенсивности, а также формулы, включенные в ШСИ-2017 и полученные для мощных источников (основанные на площади спектра, средневзвешенной частоте в сочетании с амплитудными параметрами) применены для тестового полигона – территории г. Владикавказа.

Таким образом, 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). Возвращаясь к вопросу формирования 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.**

Сейсмический метод исследования является инженерным методом установления строения грунтов, и одновременно позволяет получать данные о сейсмических свойствах среды, необходимые для моделирования. При этом категория грунтов верхней части толщи может измениться в силу перемещения масс грунтов либо искусственного их уплотнения. Поэтому подобные изыскания также фиксируют изменения природной среды до техногенного вмешательства, и на уровне геоэкологических изысканий и оценок воздействия на окружающую среду подобная методология вполне обоснована. Поэтому интерполяция данных по территории при достаточной плотности точек измерений в целом будет соответствовать 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. Разница в мере ответственности схем, используемых при планировании и принятии решений. Так зона проявления локальных грунтов второй категории 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). При этом при проведении изысканий для строительства сейсмичность площадки будет уточнена в соответствии с результатами изысканий, как это указано в Пояснительной записке к карте.

В практику геоэкологических исследований включены сейсмические методы оценки грунтовых условий. При строительстве зданий и сооружений требуется проведение изысканий, требующих специальных затрат. Массовое исследование, в частности запись микросейсм позволяет выполнять районирование территории по признакам параметров сейсмических колебаний. Способ регистрации слабых землетрясений не позволяет набрать статистически надежный набор данных в кратчайшие сроки. В работах

Заалишвили и др., разработан способ дифференциации участков по признаку преобладающей частоты. Однако такое районирование предполагает привязку полученных частот к инженерно-геологическим условиям для которых имеются данные изысканий.

В действующих нормах СП, как и зарубежных нормах Eurocode 8 принята классификация грунтовых условий по средневзвешенной по мощности скорости поперечных волн в 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 и различной ориентации плоскости разлома и первого подысточника и разного расстояния до моделируемых эпицентров зон ВОЗ приходящие сейсмические волны имеют различный спектральный состав и приводят к большей вариации параметров колебаний на поверхности и результирующей сейсмической интенсивности. Параметром, описывающим данный эффект является дисперсия, характеризующая ширину распределения исследуемой величины или в случае конечной выборки – величина среднеквадратического отклонения. Таким образом, **дисперсия (квадрат среднеквадратического отклонения) также является характеристикой грунтовых условий в сейсмическом отношении.**

Для решения задачи исследования слоистости среды и параметров распределения на основе базы данных сейсморазведочных работ, проводимых ГФИ ВНЦ РАН на территории г. Владикавказа, были построены сейсмические модели грунтовой толщи различных участков (Рисунки 5.1-5.12). В качестве входных данных использована симуляция сценарных землетрясений от различных зон ВОЗ территории на основе конечноразломной модели (программа FINSIM). Моделирование акселерограмм каждого участка осуществлялось методом многократно отраженных волн [Zaalishvili et al., 2021b].

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 [Zaalishvili et al., 2020].

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 ВНЦ РАН, работа с пространственными данными осуществлялась в программах ARCGIS 9 и QGIS, обработка данных в программах MATLAB, JupyterNotebook (библиотек Pythonscipy, numpy, sklearn). Используются данные баз данных «Владикавказ» и K-NET.

5.2. Информационный слой инженерно-геологических условий территории в ГИС геоэкологического районирования территории г. Владикавказа

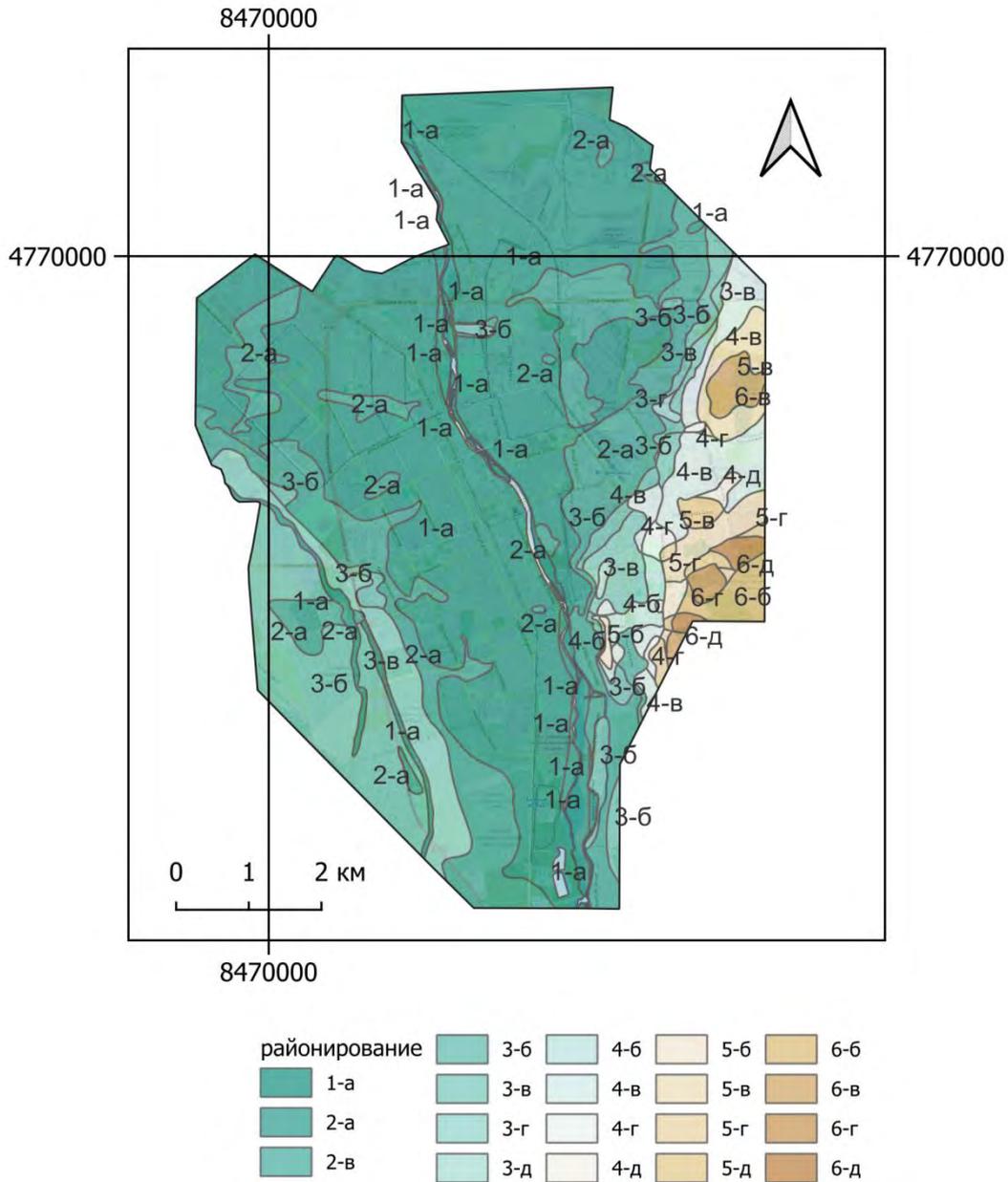


Рисунок 5.1. Карта-схема инженерно-геологического районирования территории г. Владикавказа

5.3. Определение скоростей сейсмических волн в типичных грунтах территории г. Владикавказа по данным сейсморазведочных исследований

Для геофизических исследований города Владикавказа, были выбраны, участки с характерными геологическими разрезами грунтов, естественной обнаженностью площадок (парки и скверы, не покрытые асфальтом) и минимальной транспортной загруженностью. Координаты участков были определены с помощью GPS-приёмника Garmin.

Участки были выбраны с учетом имеющихся сведений о сейсмической балльности отдельных площадей. Выбор методов геофизических исследований и их модификаций основывался на необходимости детальных исследований, количественной оценки параметров грунтов, максимально возможной глубины исследований в условиях города, получения сведений о сейсмических свойствах грунтов. Исходя из этого, комплекс геофизических исследований включал сейсморазведку в широком диапазоне изучения продольных и поперечных волн от разноориентированных источников возбуждения упругих колебаний с регистрацией сигнала по 24 каналам.

Возбуждения осуществлялись многоразовым способом воздействия (10-кратным) и накоплением сигнала с последующим суммированием в случае длины профиля 25 метров и применением схемы YY. При длине профиля 120 метров и схеме наблюдения ZZ для возбуждения колебаний применялась ударная установка с грузом 500 кг, без применения накопления.

На основе типовых сейсморазведочных исследований путем применения схем ZZ, YY+, YY-, ZX, ZY были определены скорости распространения продольных и поперечных волн в типичных грунтах различного вида, распространенных на территории г. Владикавказа. Для выделения поперечных волн использовалось явление фазовой инверсии и другие признаки [Заалишвили, 1986, 2000; Сейсмическое микрорайонирование ..., 2009].

Сейсморазведочные работы были выполнены всего в 26 точках (пп. 1–26 в таблице 5.1). За прошедшее время Геофизическим институтом на территории города Владикавказа проводились инженерно-геологические изыскания включающие в том числе сейсморазведочные работы.

Таблица 5.1. – Участки проведения работ

№№ п/п	Название участков	LAT	LONG
1.	Архонские сады	43,05853	44,63817
2.	Гадиева 1	43,00931	44,64597
3.	Галковского	43,04694	44,65778
4.	Водная 1	42,98722	44,67944
5.	Учитель	43,003	44,6583
6.	БАМ	43,03378	44,63977
7.	Комсомольский парк	43,02692	44,69605
8.	Сапитская 1	43,02017	44,7059
9.	Дарьял	43,08069	44,67916
10.	Газоаппарат	43,06904	44,69433
11.	Металлург	43,04967	44,66353
12.	Пожарского	43,05745	44,67848
13.	Соб. балка	43,06055	44,71097
14.	СОГУ	43,02678	44,69347
15.	Ставропольская	43,05433	44,70419
16.	Гадиева 2	43,012	44,65636
17.	Весна	43,0273	44,7151
18.	Карцинское шоссе	43,0426	44,714



Рисунок 5.3. Участок «БАМ». Применение ударной установки с грузом 500 кг. Схема ZZ



Рисунок 5.4. Участок «Гизель»



Рисунок 5.5. Участок «Весна». Схема наблюдений УУ, горизонтальные удары



Рисунок 5.6. Разрез на участке «БАМ»



Рисунок 5.7. Участок «Гизель 2»



Рисунок 5.8. Участок «Сапитская»



Рисунок Участок «Комсомольский парк»



Рисунок 5.10. Участок «СОГУ»



Рисунок 5.11. Участок «Гадиева 2»



Рисунок 5.12. Участок «Переезд»

Значения скоростей распространения сейсмических волн определялись по наклону годографов прямых и головных волн.

Глубина залегания преломляющей границы оценивалась по известной формуле для двухслойной параллельно-слоистой среды [Горяинов, Ляховицкий, 1979]:

$$h_1 = \frac{x_{12}}{2} \sqrt{\frac{v_2 - v_1}{v_2 + v_1}}, \quad (5.1.)$$

где x_{12} – критическая точка пересечения годографов;

v_1, v_2 – скорости распространения сейсмических волн в верхнем слое и подстилающей толще, определенные по наклону годографов.

В случае многослойной горизонтально-слоистой среды, представляющей последовательность n плоских горизонтальных границ (при условии $v_1 < v_2 < \dots < v_n$) мощности слоев устанавливались по формуле [Горяинов, Ляховицкий, 1979]:

$$h_1 = \frac{x_{12}}{2} \sqrt{\frac{v_2 - v_1}{v_2 + v_1}}; \quad h_2 = \frac{x_{23}}{2} \sqrt{\frac{v_3 - v_2}{v_3 + v_2}} - h_1 \frac{\cos i_{13} - \cos i_{12}}{\sin i_{12} \cos i_{23}};$$

$$h_n = \frac{x_{n(n+1)}}{2} \sqrt{\frac{v_{n+1} - v_n}{v_{n+1} + v_n}} - \sum_{k=1}^{k=n-1} h_k N_{kn}; \quad (5.2.)$$

$$N_{kn} = \frac{\cos i_{k(n+1)} - \cos i_{kkn}}{\sin i_{kn} \cos i_{n(n+1)}}.$$

где

v_k и $x_{(k-1)k}$ – скорости в каждом пласте, по соответствующему годографу головной волны и характерные точки годографа.

В случае многослойной среды с плоскими наклонными границами вычисления проводились по следующей схеме:

$$\begin{aligned}
\alpha_{12} &= \arcsin\left(\frac{v_1}{v_3}\right); \beta_{12} = \arcsin\left(\frac{v_1}{v_3}\right); \\
a_{12} &= \alpha_{12} - \varphi_2; b_{12} = \beta_{12} + \varphi_2; \\
\bar{a}_{22} &= \arcsin\left(\frac{v_2}{v_1} \sin a_{12}\right); \bar{b}_{22} = \arcsin\left(\frac{v_2}{v_1} \sin b_{12}\right); \\
a_{22} &= b_{22} = \frac{\bar{a}_{22} + \bar{b}_{22}}{2}; a_{22} = b_{22} = \frac{\bar{a}_{22} + \bar{b}_{22}}{2}; \\
\varphi_3 &= \varphi_2 + \frac{\bar{a}_{22} - \bar{b}_{22}}{2}; \\
\alpha_{22} &= a_{22} + \varphi_3; \beta_{22} = b_{22} - \varphi_3.
\end{aligned} \tag{5.3}$$

Затем вычисляется скорость $v_3 = \frac{v_2}{\sin a_{22}}$ и устанавливается мощность

второго слоя.

$$\begin{aligned}
z_2' &= \frac{v_2}{\cos \alpha_{22} + \cos \beta_{22}} \left[t_{02}' - \frac{z_1'}{v_1} (\cos \alpha_{12} + \cos \beta_{12}) \right]; \\
z_2'' &= \frac{v_2}{\cos \alpha_{22} + \cos \beta_{22}} \left[t_{02}'' - \frac{z_1''}{v_1} (\cos \alpha_{12} + \cos \beta_{12}) \right].
\end{aligned} \tag{5.4}$$

Аналогичная процедура продельвается и для более глубоких границ. Для расчётов была написана программа на языке Matlab. Мощность n-го слоя вычислялась по следующей формуле:

$$z_n = \frac{v_n}{\cos \alpha_{nn} + \cos \beta_{nn}} \left[t_{0n}' - \sum_{k=1}^{n-1} \frac{z_k}{v_k} (\cos \alpha_{kn} + \cos \beta_{kn}) \right], \tag{5.5}$$

где

$$\begin{aligned}
\alpha_{nn} &= a_{nn} + \varphi_{n+1}; \\
\beta_{nn} &= b_{nn} - \varphi_{n+1}; \\
a_{nn} &= b_{nn} = \arcsin \frac{v_n}{v_{n+1}}
\end{aligned} \tag{5.6}$$

Результаты определения скоростей распространения сейсмических волн для различных участков исследуемой территории приведены в таблице 5.6.

Определенные с помощью вышеизложенных подходов скорости распространения продольных и поперечных волн были отнесены к конкретным слоям, сложенным соответствующими видами грунтов.

Использование встречных годографов позволило оценить вполне обоснованно скорости их распространения и определить углы наклона преломляющих границ.

5.4. Методы расчета приращений сейсмической интенсивности для слабых землетрясений, взрывных источников и по соотношениям ШСИ-2017

Способ регистрации землетрясений малых энергий применяется для количественной оценки относительных изменений сейсмической интенсивности на участках с различными инженерно-геологическими условиями.

Оценка приращения сейсмической интенсивности производится по формуле [Республиканские ..., 1987; Рекомендации ..., 1985; Методическое руководство ..., 1988]:

$$\Delta I = 3.3 \lg \frac{A_i}{A_0}, \quad (5.7)$$

где A_i и A_0 – амплитуды колебаний на исследуемом и эталонном грунтах (измеренные по землетрясениям, зарегистрированным одновременно в соответствующих пунктах наблюдения), соответственно.

При этом существует несколько способов расчета амплитуд колебаний, очевидно, что на сейсмический эффект также влияет продолжительность сейсмических воздействий. Кроме того, необходимо учитывать тип используемых приборов. В данной работе рассмотрены различные способы вычисления «амплитуд колебаний» для приборов СК-1П и различные критерии статистической значимости получаемых результатов.

Согласно [Методическое руководство ..., 1988] A_i и A_0 – «максимальные амплитуды колебаний» на исследуемом и эталонном участке и «...иногда... вместо максимальных используются средние значения амплитуд колебаний». Средняя амплитуда находится по соответствующей сейсмограмме путем усреднения ряда амплитуд, полученных в результате

сложного промера на отрезке записи землетрясения от вступления волны S и до $1/3 A_{\max}$. Согласно [Республиканские ..., 1987] A_i и A_0 – «средние амплитуды колебаний». Согласно [Рекомендации ..., 1985] A_i и A_0 – «средние амплитуды колебаний в пределах отрезка записи с $A \geq A_{\max}/3$ ». Таким образом, определение средних амплитуд фактически связано с продолжительностью колебаний.

С введением новой шкалы сейсмической интенсивности ШСИ-2017 были пересмотрены инструментальные параметры. Из справочного Приложения Б ГОСТ могут быть получены следующие соотношения для расчета приращений сейсмической интенсивности:

$$\Delta I = 2.5 \lg \frac{PGA}{PGA_0} \quad (5.8)$$

$$\Delta I = 2.13 \lg \frac{PGV}{PGV_0} \quad (5.9)$$

$$\Delta I = 2.5 \lg \frac{PGA}{PGA_0} + 1.25 \lg \frac{\tau}{\tau_0} \quad (5.10)$$

$$\Delta I = 1.325 \lg \frac{PGA \cdot PGV}{PGA_0 \cdot PGV_0} \quad (5.11)$$

где PGA и PGV обозначают пиковые скорости и ускорения, а τ – продолжительность колебаний («ширину импульса»).

Очевидно, что амплитуды колебаний оценивают максимальные нагрузки, которые могут меняться в зависимости от их продолжительности. С этой точки зрения важно рассмотреть энергетические характеристики воздействий. При этом важно учитывать также спектральный состав колебаний, т.е. ту область частот в которых сосредоточена сейсмическая энергия.

При нелинейном поведении грунтов характерно расширение спектра в ВЧ и частично в НЧ области спектра. Расширение в НЧ области спектра в рыхлых грунтах, обусловленное явлением поглощения, превышает расширение, связанное с нелинейностью грунта, и, таким образом, поглощение «маскирует» нелинейность. В скальных грунтах, где величина

поглощения значительно меньше, нелинейность среды проявляется более отчетливо. В то же время оценка нелинейности с точки зрения СМР интересна именно для рыхлых грунтов. Кроме того, при использовании площади нормализованного спектра, отсутствует возможность изучать форму спектра. В связи с изложенным ранее, чтобы оценить степень нелинейности грунтов, необходимо ввести другой показатель.

В связи с этим В.Б. Заалишвили в 1996 г. [Заалишвили, 1997] было введено понятие площади «реального» спектра колебаний. Это – «виброспектр» или обыкновенный амплитудный спектр Фурье, рассчитываемый по сейсмограмме. Площадь реального спектра S_p , согласно определению, равна [Заалишвили, 1997]:

$$S_p = S_n A_0. \quad (5.12)$$

Анализ инструментальных записей землетрясений показывает, что величина S_p , тесно связана с нелинейностью грунтов. При достижении ускорений $a \approx 0,1g$ зависимость S_p от ускорения резко меняется, обретая нелинейный характер («мягкая нелинейность»). Для жестких грунтов характерна «жесткая» нелинейная зависимость [Заалишвили, 1997]:

$$S_p \sim \alpha A_0 f_{св}. \quad (5.13)$$

Таким образом, площадь реального спектра S_p – интегральная характеристика явлений поглощения и нелинейности, возникающих в грунтовой толще. Это подтверждает наблюдающееся при экспериментах подобие влияния явлений поглощения и нелинейности на форму спектра.

Отношение площади реального спектра к поглощению, даст, очевидно, т.н. «чистую» нелинейность [Заалишвили, 1997]:

$$S_p / \alpha \sim A_0 f_{св}. \quad (5.14)$$

Таким образом, произведение амплитуды спектра на средневзвешенную частоту, являясь простейшей и легко измеряемой величиной, характеризует новое качество грунта – нелинейность. Таким образом, В.Б. Заалишвили были введены новые показатели, которые тесно связаны с прямыми показателями поглощения и нелинейности грунтов [Заалишвили, 1997]. В отличие от традиционных показателей новые показатели непосредственно измеряются по спектрам колебаний грунтов.

Рассматривая выражение (5.14), можно заключить, что при постоянной величине нелинейности данного грунта (т.е. при $A_0 f_{CB} = \text{const}$) повышение поглощения приведет к пропорциональному увеличению площади реального спектра. Действительно, чем грунт рыхлее, тем больше он поглощает вводимую энергию и тем больше площадь реального спектра его колебаний. В скальных грунтах, где поглощение мало, площадь реального спектра мала.

Сопоставление показателей поглощения и нелинейности с соответствующими спектрами колебаний грунтов показывает, что при большем поглощении площадь спектра преобладает в НЧ области, а при высокой нелинейности – в ВЧ области спектра. Другими словами, присутствие поглощения проявляется в дополнительном расширении НЧ области спектра, а присутствие нелинейности – в расширении ВЧ диапазона.

Все изложенное позволило получить формулу для расчета приращения балльности на основе учета нелинейно-упругого поведения грунтов или упругой нелинейности (при использовании вибрационного источника) [Заалишвили, 2000]:

$$\Delta I = 3 \lg A_i f_{CBi} / A_0 f_{CB0}, \quad (5.15)$$

где $A_i f_i$, $A_0 f_0$ – произведение амплитуды спектра на средневзвешенную частоту колебаний исследуемого и эталонного грунтов.

Формула (5.15) характеризует нелинейно-упругое поведение грунтов в отсутствие поглощения, она использовалась при СМР территории г. Кутаиси,

а также при СМР территории Нововоронежской АЭС-1 и площадки для проектируемой АЭС-2.

Если применять при СМР импульсный источник, то формула примет вид [Заалишвили, 1996]:

$$\Delta I = 2 \lg A_{if_{свi}} / A_0 f_{св0}. \quad (5.16)$$

Дальнейшее развитие инструментальный метод получил на основе использования вибрационных источников, отличающихся определенными преимуществами по сравнению с импульсными. Основная особенность использования вибрационного источника для СМР – возможность управлять спектральным составом излучаемого сигнала.

Для данной колебательной системы амплитуда вынужденных колебаний зависит от частоты вынуждающей силы. Под действием периодических сил система (плита–грунт) совершает гармонические колебания, частота и амплитуда которых определяются частотой и величиной внешней нагрузки, а также собственной частотой и затуханием системы, которые, в свою очередь, зависят от литологического состава, строения и физико-механических свойств грунтовой толщи. В случае переменной по частоте нагрузки в системе могут наблюдаться резонансные явления.

В качестве вибрационного источника в работе использовался сейсмический вибратор типа СВ-10/100. Амплитудно-частотная характеристика источника с силой воздействия до 100 кН ограничена «столообразной» характеристикой от 4 до 100 Гц [Отчет ..., 1985].

Широкий диапазон изменения длительности посылки сигнала (до 99 сек) позволяет «раскачивать» среду, т.е. сообщать ей квазигармонический режим колебаний. При этом целесообразно использовать т.н. «свип-сигналы», характеризующиеся линейным изменением частоты колебаний во времени.

Для сопоставления показателей сейсмических свойств грунтов введено понятие «площади подспектральной области спектра колебаний» грунтов. Для расчета приращений балльности разработан способ виброспектров и была предложена следующая формула [Заалишвили, 1986]:

$$\Delta I = 2 \lg \frac{S_{pi}}{S_{p0}}, \quad (5.17)$$

где S_{pi} – площадь реального спектра колебаний исследуемого грунта;
 S_{p0} – площадь реального спектра колебаний эталонного грунта.

Вибрационные источники относительно большой мощности помогают резко повысить обоснованность выделения зон с различной интенсивностью, т.е. повысить качество работ по СМР.

Разработанный способ применяли при СМР территорий гг. Тбилиси, Кутаиси, Ткибули, отдельных участков г. Б. Сочи [Zaalishvili, 1992]. Особенность способа – он позволяет оценить сейсмическую опасность грунтов без каких-либо предварительных исследований: проведя непосредственные измерения реакции грунтовой толщи на стандартное (вибрационное или импульсное) воздействие. Позже формула с успехом использовалась при СМР площадок Нововоронежской АЭС с помощью импульсного источника [Заалишвили, 1996].

Известно, что сходимость результатов наблюдений можно оценить наиболее полно, если их распределение является нормальным, поэтому при обработке результатов наблюдений важную роль играет проверка нормальности распределения [Бурдун, Марков, 1975]. В связи с этим были вычислены оценки средней плотности распределения в интервалах $\Delta X_i = 0,5$ балла по формуле:

$$p_i^* = \frac{m_i}{n \cdot \Delta X_i}, \quad (5.18)$$

где n – число событий по которым вычислялось приращение интенсивности («число измерений»);

ΔX_i – ширина интервала;

m_i – частота, равная числу результатов, лежащих в каждом i -м интервале.

Дифференциальные функции нормального распределения вычислены по формуле:

$$P_X(x) = \frac{1}{\sigma_X \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m_X)^2}{2\sigma_X^2}}, \quad (5.19)$$

где m_X – математическое ожидание;

σ_X – среднее квадратическое отклонение результатов наблюдений.

5.5. Данные сети сейсмических наблюдений на территории г. Владикавказа

Создание системы сейсмических наблюдений, согласно рекомендациям ООН, обязательны для урбанизированных территорий, расположенных в зоне высокой сейсмической опасности. Это особенно актуально для Северного Кавказа, где такие наблюдения отсутствуют.

В связи с этим, а также необходимостью изучения и последующего анализа малоизученного проявления особенностей воздействия активных разломов на ситуацию в городе, на территории г. Владикавказа было решено развернуть локальную сеть сейсмических наблюдений [Zaalishvili et al., 2021b].

Главной задачей создания локальной сети «Владикавказ (Урбанизированная территория)» явилась необходимость оценки влияния грунтовых условий на формирование интенсивности землетрясений. В связи с этим на территории города были специально выбраны участки с типичными грунтовыми условиями. В июле 2004 г. по договоренности с руководителем работ проф. В.Б. Заалишвили с завода-разработчика для испытания были переданы 4 современные сейсмические станции Дельта-Геон.

По договоренности с главным архитектором Республики Р. Козыревым под руководством В.Б. Заалишвили была организована сеть наблюдений в г. Владикавказе, в том числе в Центральной части города в районе ул.

Куйбышева. Здесь присутствуют, практически, все типы грунтовых условий, распространенных в городе. Это сыграло определенную роль в особенностях формирования и распределения станций по территории города. На рисунке 5.13. представлены инженерно-геологические условия сейсмических станций.

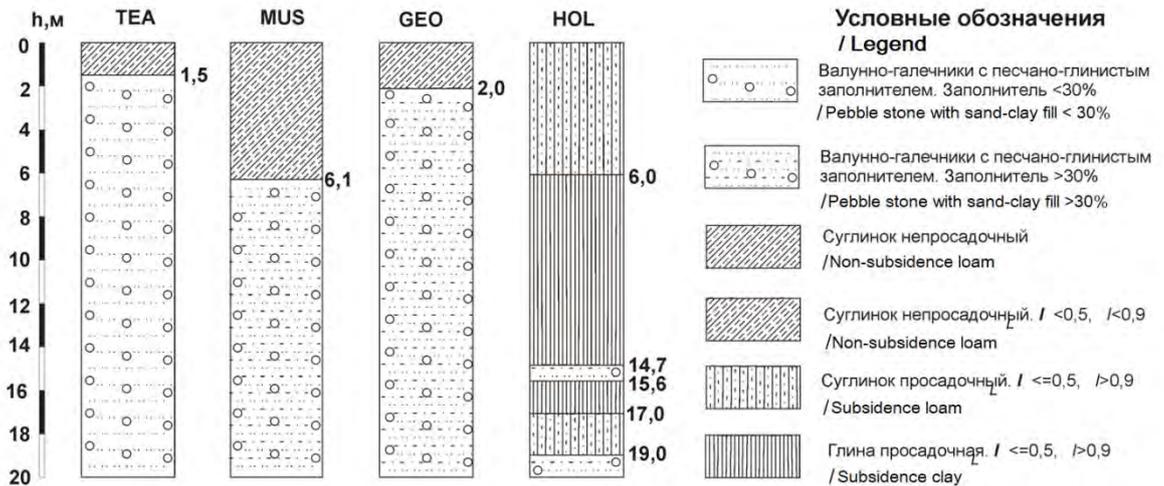


Рисунок 5.13. Грунтовые условия сейсмических станций на территории г. Владикавказа

Регистратор сейсмических сигналов (РСС) «Дельта-Геон» представляет собой регистратор следующего «поколения» после «Альфа Геон» (ООО Геон, Москва). РСС «Дельта-Геон» для записи сейсмической информации должен иметь подключенными устройство сменной памяти (Flash, подключаемый с помощью интерфейса РСМСІА тип II), сейсмоприемник СК1П и батарею с напряжением 12 В. Блок управления и синхронизации информации позволяет хранить и устанавливать точное время.

Из базы данных записей локальной городской сети сейсмологических наблюдений г. Владикавказа были отобраны записи событий, зарегистрированных одновременно всеми четырьмя станциями [Фидарова и др., 2019; Zaalishvili et al., 2021a]. Выборка событий производилась с помощью разработанного пакета программ. Общее число сейсмических событий зарегистрированных с использованием сейсмоприемников СК-1П составляет 99.

Для всех зарегистрированных землетрясений выполняется условие превышения расстояния между пунктами наблюдений 1/10 гипоцентрального расстояния.

Все записи имеют одинаковую частоту дискретизации 31,25 Гц, что упростило процесс обработки (нет необходимости передискретизации).

Вычисление приращений сейсмической интенсивности производилось по записям землетрясений, максимальные амплитуды которых лежат в диапазоне 0,0001 – 0,1 см/с (фактически максимальная зарегистрированная амплитуда равна 0,007 см/с, зарегистрирована на х-компоненте станции HOL).

На основе применения стандартной формулы (5.20) получены следующие значения приращения интенсивности, по отношению к станции MUS (в скобках указаны среднеквадратические отклонения от среднего):

1) По максимальным значениям амплитуд:

$$\text{TEA } \Delta I = -0,1 (\pm 0,4);$$

$$\text{GEO } \Delta I = 0,1 (\pm 0,5);$$

$$\text{HOL } \Delta I = 0,5 (\pm 0,6).$$

2) По средним по продолжительности амплитудам:

$$\text{TEA } \Delta I = -0,1 (\pm 0,4);$$

$$\text{GEO } \Delta I = 0,1 (\pm 0,5);$$

$$\text{HOL } \Delta I = 0,5 (\pm 0,9).$$

3) По средним значениям амплитуд:

$$\text{TEA } \Delta I = -0,1 (\pm 0,3);$$

$$\text{GEO } \Delta I = 0,1 (\pm 0,5);$$

$$\text{HOL } \Delta I = 0,5 (\pm 0,7).$$

Таким образом, по разным формулам получены идентичные значения приращений интенсивности, но с разной величиной средних отклонений, т.е. различной дисперсией распределений.

Расчеты приращений в разных диапазонах амплитуд представлены в таблицах 5.2.–5.4.

Таблица 5.2. – Приращение интенсивности по максимальным амплитудам

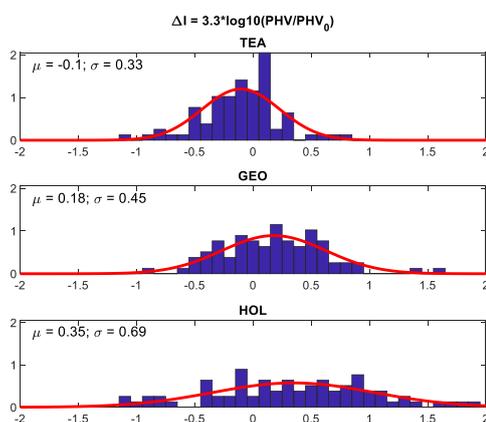
Амплитуда, м/с	TEA	GEO	HOL
0,0001– 0,0005	-0,1	0,0	0,4
0,0005 – 0,001	-0,3	-0,1	0,7
0,001 – 0,005	0,0	0,5	0,8
0,005 – 0,01	-0,1	0,2	0,9

Таблица 5.3. – Приращение интенсивности по средним по продолжительности амплитудам

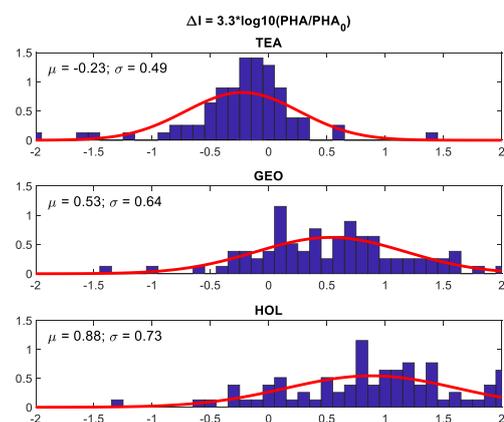
Амплитуда, м/с	TEA	GEO	HOL
0,0001– 0,0005	-0,2	0,0	0,2
0,0005 – 0,001	-0,1	0,1	0,6
0,001 – 0,005	0,1	0,5	0,9
0,005 – 0,01	-0,1	0,5	0,7

Таблица 5.4. – Приращение интенсивности по средним амплитудам

Амплитуда, м/с	TEA	GEO	HOL
0,0001– 0,0005	-0,1	0,0	0,4
0,0005 – 0,001	-0,3	-0,1	0,7
0,001 – 0,005	0,0	0,5	0,8
0,005 – 0,01	-0,1	0,1	1,1

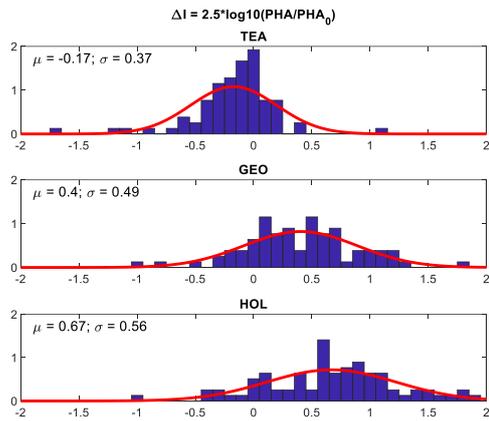


а)

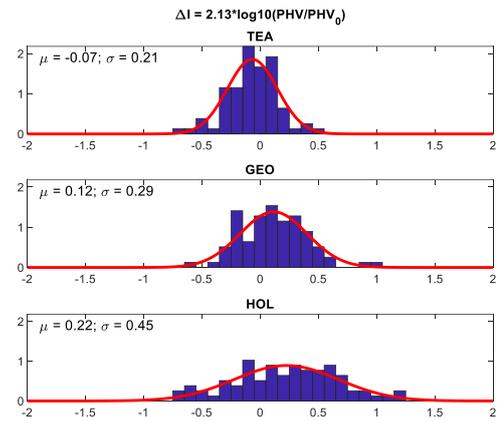


б)

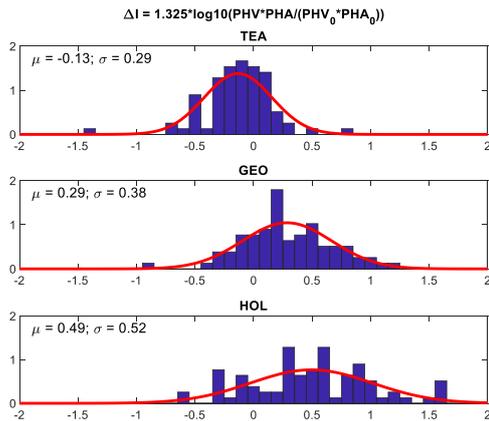
Рисунок 5.14. Расчет приращений сейсмической интенсивности по действующим формулам, по пиковым горизонтальным скоростям (а) и пиковым горизонтальным ускорениям (б)



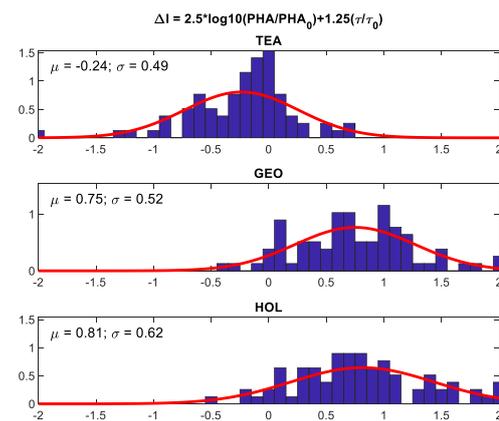
а)



б)



в)



г)

Рисунок 5.15. Расчет приращений сейсмической интенсивности по закономерностям, приведенным в ШСИ-2017 в приложении Б ГОСТ Р 57546—2017: по пиковым горизонтальным ускорениям (а), по пиковым горизонтальным скоростям (б), произведениям пиковых скоростей и ускорений (в) и ускорений с учетом продолжительности (г)

Анализ полученных гистограмм (Рисунки 5.14–5.16.) также показывает, что чем более сложными в сейсмологическом отношении являются грунтовые условия, тем больше значение дисперсии распределения – наблюдается большой разброс значений. Кроме того, на величину полученных приращений значительное влияние оказывают амплитуды колебаний. В отсутствие умеренной сейсмической активности уже имеющиеся данные могут быть дифференцированы по признаку амплитуд.

Новые регрессионные выражения приведенные, пусть в качестве справочных но в ГОСТ Р 57546–2017 обеспечивают увеличение инструментальных воздействий, которые реально наблюдаются, но

использование приведенных коэффициентов приводит к худшей дифференциации грунтовых условий по степени их опасности.

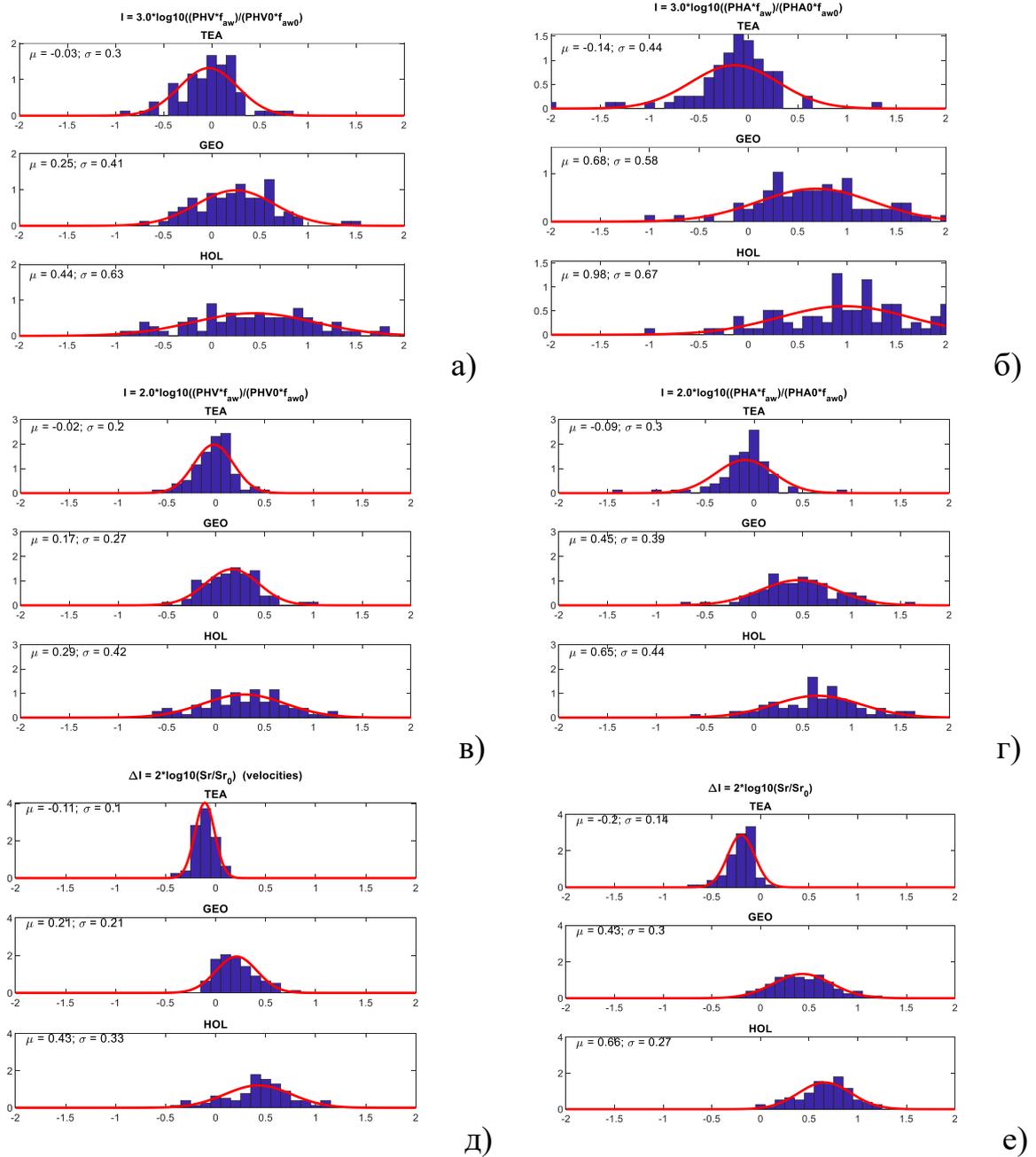


Рисунок 5.16. Расчет приращений сейсмической интенсивности по формулам, полученным для мощных источников: взрывных источников для пиковых скоростей (а) и ускорений (б); для мощных вибрационных источников для пиковых скоростей (в) и ускорений (г), для площадей спектров скоростей (д) и площадей спектров ускорений (е)

Далее рассчитывается среднее приращение интенсивности и среднеквадратическое отклонение (Таблица 5.5.).

Таблица 5.5. – Среднее приращение интенсивности и среднеквадратическое отклонение

№ п.п.	Формула	Среднее приращение интенсивности			Среднеквадратическое отклонение		
		TEA	GEO	HOL	TEA	GEO	HOL
1.	$\Delta I = 3.3 \cdot \log_{10}(PHV/PHV_0)$	-0,1	0,18	0,35	0,33	0,45	0,69
2.	$\Delta I = 3.3 \cdot \log_{10}(PHA/PHA_0)$	-0,23	0,53	0,88	0,49	0,64	0,73
3.	$\Delta I = 2.5 \cdot \log_{10}(PHA/PHA_0)$	-0,17	0,4	0,67	0,37	0,49	0,56
4.	$\Delta I = 2.13 \cdot \log_{10}(PHV/PHV_0)$	-0,07	0,12	0,22	0,21	0,29	0,45
5.	$\Delta I = 1.325 \cdot \log_{10}(PHV \cdot PHA / (PHV_0 \cdot PHA_0))$	-0,13	0,29	0,49	0,29	0,38	0,52
6.	$\Delta I = 2.5 \cdot \log_{10}(PHA/PHA_0) + 1.25 \log_{10}(\tau/\tau_0)$	-0,24	0,75	0,81	0,49	0,52	0,62
7.	$\Delta I = 3.0 \cdot \log_{10}((PHV \cdot f_{aw}) / (PHV_0 \cdot f_{aw0}))$	-0,03	0,25	0,44	0,3	0,41	0,63
8.	$\Delta I = 3.0 \cdot \log_{10}((PHA \cdot f_{aw}) / (PHA_0 \cdot f_{aw0}))$	-0,14	0,68	0,98	0,44	0,58	0,67
9.	$\Delta I = 2.0 \cdot \log_{10}((PHV \cdot f_{aw}) / (PHV_0 \cdot f_{aw0}))$	-0,02	0,17	0,29	0,2	0,27	0,42
10.	$\Delta I = 2.0 \cdot \log_{10}((PHA \cdot f_{aw}) / (PHA_0 \cdot f_{aw0}))$	-0,09	0,45	0,65	0,3	0,39	0,44
11.	$\Delta I = 2.0 \cdot \log_{10}(Sr/Sr_0)$ (velocities)	-0,11	0,21	0,43	0,1	0,21	0,33
12.	$\Delta I = 2.0 \cdot \log_{10}(Sr/Sr_0)$ (accelerations)	-0,2	0,43	0,66	0,14	0,3	0,27

Использование энергетической характеристики – площади спектра приводит к меньшему разбросу расчетных значений и, как следствие, более обоснованным результатам. При этом распределение становится ближе к нормальному, а дисперсия характеризует свойства неоднородности среды, т.е. может являться полноценной инструментальной характеристикой грунтовых условий (показателем «мутности» среды в определении А.В. Николаева [1967]).

5.6. Построение расчетных моделей по инструментальным данным

Для учета влияния верхней части грунтовой толщи на приращения сейсмической интенсивности рассматривались типичные разрезы мощностью до 30 м. Расчетные модели для различных участков были построены по данным сейморазведочных исследований (Отчет СМР Владикавказа том 3, книга 3) и данным о физико-механических свойствах по скважинам (Отчет СМР Владикавказа том 3, книга 1–2), а также исследований проведенных на территории г. Владикавказа в последующие годы.

Грунтовые условия центральной части г. Владикавказа могут быть представлены в виде 2–3-слойной грунтовой толщи. Кроме того, учитывался слой валунно-галечников, со средней скоростью поперечных сейсмических волн 1250 м/с, выделенный по ряду участков (Металлург, Галковского, Пожарского, Водная, БАМ).

Поскольку на карте инженерно-геологического районирования не выделены участки валунно-галечниковых грунтов по количеству заполнителя, при построении модели использовались данные сейсморазведки (том 3, книга 3) [Заалишвили и др., 2010].

Для подстилающих галечников с количеством заполнителя менее 30% : в интервале глубин 10–20 м была определена следующая скорость распространения поперечных сейсмических волн $V_s = 700\text{--}900$ м/с, и плотность $\rho = 2,23$ т/м³; в интервале глубин 20–30 м и глубже – $V_s = 1250$ м/с, $\rho = 2,23$ т/м³ (получено по участкам Metallurg – 1140 м/с, Галковского – 1170 м/с, Пожарского – 1150 м/с, Водная – 1230 м/с, БАМ – 1570 м/с, среднеквадратическое отклонение 130 м/с). Следует отметить, что такие высокие значения скоростей также были получены ранее [Отчет ..., 1991].

В Руководстве по безопасности РБ-06-98 [Руководство по безопасности ..., 2000] дается следующее определение термина «коренная порода» – скальные или другие породы, характеризующиеся скоростью распространения поперечных (сдвиговых) сейсмических волн не менее 700 м/с. Поскольку, по результатам геофизических исследований, в подстилающей толще получена более высокая скорость можно оценить влияние верхней части толщи, задавая воздействие на глубине 20–30 м.

В то же время, выделенные по инструментальным данным (по записям землетрясений и микросейсм) резонансные частоты в интервале 0,8–1,2 Гц свидетельствуют о влиянии мощной валунно-галечниковой толщи (мощностью 300–500 метров). Это обуславливает необходимость проведения расчетов для такой толщи. При этом полученные резонансные частоты будут общими для всех участков территории г. Владикавказа.

В результате обобщения имеющихся данных построены расчетные модели верхней части грунтовой толщи – Приложение 1.

5.7. Определение приращений сейсмической интенсивности с помощью способа сейсмических жесткостей

В соответствии с региональными строительными нормами метод сейсмических жесткостей обязателен для применения как основной на объектах сейсмического микрорайонирования всех классов [Республиканские ..., 1986].

Приращение балльности определяется с помощью известной формулы С.В. Медведева [Заалишвили, 2000; Рекомендации ..., 1985]:

$$\Delta I = 1,67 \lg \frac{\rho_0 v_0}{\rho_i v_i}, \quad (5.20)$$

где $\rho_0 v_0$ и $\rho_i v_i$ – сейсмические жесткости эталонного и исследуемого грунтов соответственно.

Для грунтовых толщ, включающих в себя несколько слоев, характеризующихся различными значениями скоростей упругих волн и плотностей, вычисляется средняя скорость и средневзвешенное значение плотности [Республиканские ..., 1987; Рекомендации ..., 1985]:

$$\bar{v} = \frac{H}{\sum \frac{h_i}{v_i}}, \quad (5.21)$$

$$\rho_{св} = \frac{\sum \rho_i h_i}{H}, \quad (5.22)$$

где $H = \sum h_i$ – мощность расчетной толщи;

v_i – пластовая скорость в i -ом слое;

h_i – мощность i -го слоя.

При проведении более ранних работ по сейсмическому микрорайонированию территории центральной части г. Владикавказа

[Заалишвили и др., 2007] для средних грунтовых условий были определены следующие характеристики грунтовой толщи: скорость распространения поперечных сейсмических волн $v_s=220$ м/с и плотность $\rho=1,85$, т/м³, что, в целом, соответствует типичным параметрам эталонного грунта. Так, согласно РСН 60–86 значения параметров эталонного грунта составляют в среднем: $v_s=250–350$ м/с и $\rho = 1,7–1,8$ т/м³ (п. 5.1., РСН 60-86).

В результате обобщения результатов исследований, выполненных для всей территории города, для средних грунтовых условий приняты следующие характеристики:

$$v_s=350 \text{ м/с и } \rho = 1,85 \text{ т/м}^3.$$

Средние скорости поперечных сейсмических волн рассчитывались по результатам сейсморазведочных работ (Отчет СМР Владикавказа том 3, книга 3). Плотности оценивались по данным инженерно-геологического районирования исследуемой территории (Отчет СМР Владикавказа том 3, книга 1–2). Следует отметить, что методом преломленных волн невозможно выделить наличие слоя грунтов со скоростью распространения сейсмических волн ниже чем в покрывающей толще. Это относится к участкам распространения просадочных грунтов. В связи с этим использовались данные карты инженерно-геологического районирования [Заалишвили и др., 2007].

Результаты расчетов по формулам (5.20–5.22) для различных диапазонов глубин рассматриваемой толщи приведены в таблицах 5.2–5.4.

Согласно данным таблиц 5.2–5.4 приращение интенсивности или балльности относительно участка со средними грунтовыми условиями составит (после округления):

- для глинистых грунтов текучей консистенции $\Delta I = + 1$ балл;
- для суглинков п/ТВ консистенции и галечников с заполнителем $>30\%$ $\Delta I = 0$ баллов;
- для галечников с заполнителем $<30\%$ $\Delta I = -1$ балл.

Далее рассчитывались приращения интенсивности по формуле сейсмических жесткостей (Рисунок 5.17). Результаты расчета приращений интенсивности по формуле сейсмических жесткостей приведены в таблице 5.6.

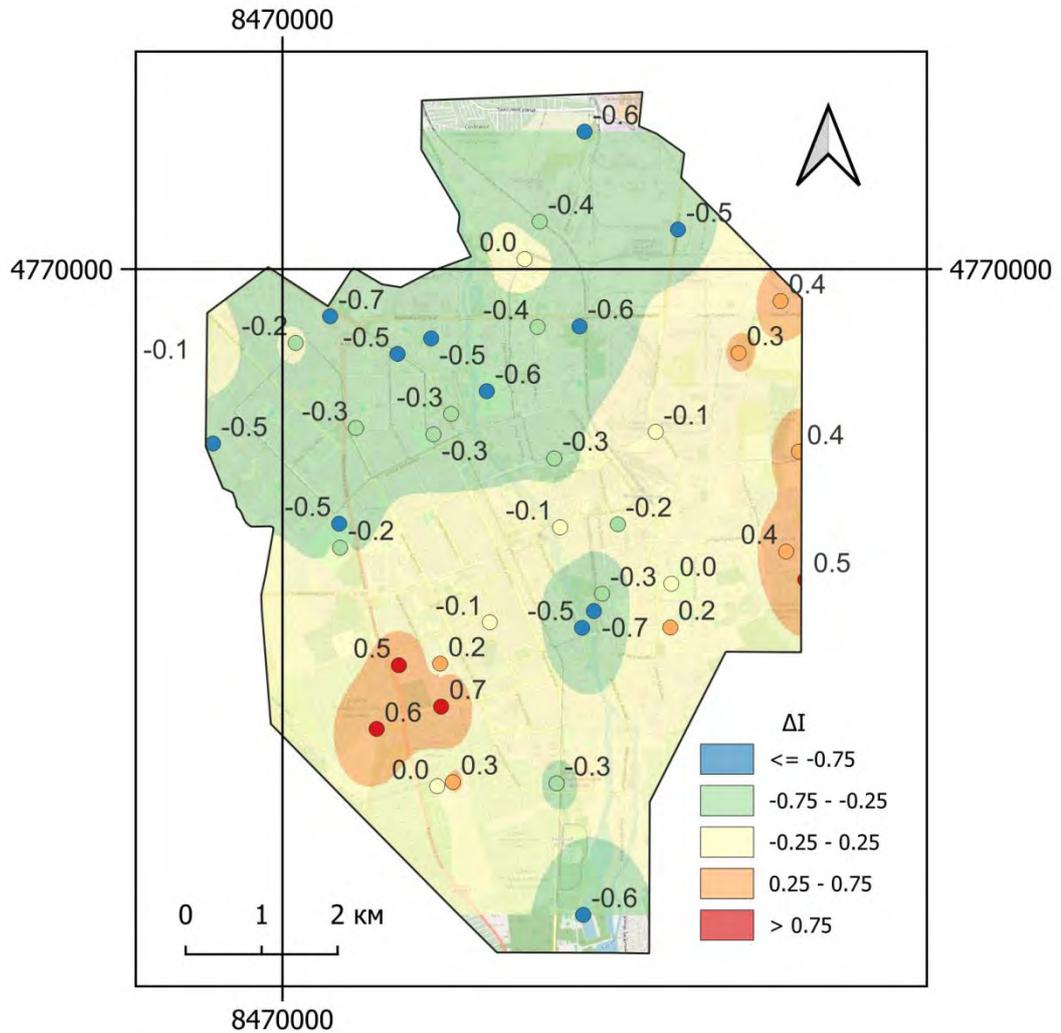


Рис.унок 5.17. Результаты расчетов приращений сейсмической интенсивности по формуле С.В. Медведева

Таблица 5.6. – Расчет приращений интенсивности по формуле сейсмических жесткостей

№№п/п	Пункт	$\rho_{ср.}$ т/м	$V_{ср.}$, м/с	$\Delta I_{гр.}$, балл
1.	Архонские сады	2120	770	-0,7
2.	БАМ	2090	660	-0,5
3.	Весна	1810	190	0,5
4.	Водная	2120	660	-0,6
5.	Гадиева 1	1830	150	0,6
6.	Гадиева 2	1800	130	0,7
7.	Газоаппарат	2000	630	-0,5
8.	Галковского	2000	500	-0,3
9.	Дарьял	2000	710	-0,6
10.	Дом печати	1980	500	-0,3
11.	Карабулакская	1950	380	-0,1
12.	Карцинское шоссе	1810	220	0,4
13.	Контакт	1970	340	0
14.	Кырджалийская	1800	280	0,2
15.	Леваневского	2180	590	-0,5
16.	Металлург	2000	790	-0,6
17.	Переезд	2140	540	-0,4
18.	Пожарского	2000	770	-0,6
19.	Собачья балка	1830	210	0,4
20.	СОГУ	1920	330	0
21.	Ставропольская	1920	230	0,3
22.	Тургеневская	1970	360	-0,1
23.	Учитель	1980	220	0,3
24.	Чкалова	2120	460	-0,3

25.	НОЛ	1900	200	0,4
26.	Ч. Баева	2260	780	-0,7
27.	Коцоева	2200	610	-0,5
28.	Дзусова	2060	400	-0,2
29.	Калоева	2100	470	-0,3
30.	Леонова	2220	580	-0,5
31.	Николаева	2040	340	0
32.	Огнева	2130	340	-0,1
33.	Тельмана	2130	500	-0,4
34.	Тамаева	2050	430	-0,2
35.	Храм Александра Невского	2050	410	-0,2
36.	Астана Кесаева	2220	600	-0,5
37.	Весенняя	2050	340	-0,1
38.	Доватора	2130	460	-0,3
39.	Училище	2090	460	-0,3
40.	Кадырова Московское	1790	180	0,5
41.	Спартак	1830	260	0,2

* Примечание: средняя скорость с учетом наличия грунтов, не выделенных КМПВ

Приращение интенсивности, обусловленное высоким уровнем стояния грунтовых вод, определяется, согласно следующей формуле [Республиканские ..., 1986; Республиканские ..., 1987]:

$$\Delta I = K e^{-0,04h^2} \quad (5.23.)$$

где $K = 0$ – для галечников с песчано-глинистым заполнителем <30%;

$K = 0,5$ – для галечников с песчано-глинистым заполнителем >30%;

$K = 1$ – для глинистых грунтов;

$h_{\text{угв}}$ – уровень стояния грунтовых вод.

Уровень грунтовых вод на территории г. Владикавказа расположен на глубине 100–150 м в галечниках с количеством заполнителя < 30%. Таким образом приращение сейсмической интенсивности, обусловленное влиянием грунтовых вод равно нулю.

В то же время на отдельных участках грунты в условиях естественного залегания могут быть обводнены, что вызвано наличием водоупорного слоя. При строительстве на таких участках должны выполняться соответствующие инженерно-геологические мероприятия. Согласно современным представлениям «верховодка» охватывающая незначительный объем толщи не оказывает заметного воздействия на сейсмический эффект.

5.8. Определение приращений интенсивности с помощью способа МОВ

Способ многократно отраженных волн [Напетваридзе, 1973] – это численный метод волновой механики. Предполагается, что для любого j -го слоя грунта справедливо волновое уравнение одномерной задачи динамической теории упругости:

$$\frac{d^2 W_j(t)}{dt^2} - c_j^2 \frac{d^2 W_j(t)}{dz^2} = 0, \quad (5.24.)$$

где $W_j(t)$ – ускорение частиц слоя грунта; t – время; z – координата частицы грунта (в вертикальном направлении); c_j – скорость распространения сейсмической волны в j -ом грунтовом слое.

В случае одного слоя мощностью H_1 , согласно теории многократно отраженных волн, сейсмическое ускорение на дневной поверхности грунтового слоя может быть выражено в виде:

$$W\left(t + \frac{H_1}{c_1}\right) = \alpha_{0,1} \left[W_0(t) + \sum_{j=1}^{\infty} \beta_{1,0}^j W_0\left(t - 2j \frac{H_1}{c_1}\right) \right], \quad (5.25)$$

где $W_0(t)$ – акселерограмма, задаваемая в основание грунтовой толщи; $\alpha_{0,1}$ и $\beta_{1,0}$ – коэффициенты преломления и отражения на границах раздела сред:

$$\alpha_{0,1} = 2 / \left(1 + \frac{\rho_1 c_1}{\rho_0 c_0} \right), \quad (5.26)$$

$$\beta_{1,0} = \left(1 - \frac{\rho_0 c_0}{\rho_1 c_1} \right) / \left(1 + \frac{\rho_0 c_0}{\rho_1 c_1} \right). \quad (5.27)$$

Для двуслойной грунтовой среды сейсмические колебания на поверхности могут быть получены по следующей формуле: [Сейсмическое микрорайонирование ..., 1970]:

$$F(t) = 2x_{2,1} \sum_{m=1}^{n>t/2\tau_1} \beta_{1,2}^{m-1} \left\{ \alpha_{3,2} \sum_{i=1}^{\lambda>t/2\tau_2} (\beta_{2,3} \beta_{2,1})^{i-1} F_3 x e^{-(2m-1)\tau_1 - (2i-1)\tau_2} + \frac{1}{2} \alpha_{1,2} \beta_{2,1} \sum_{j=1}^{k>(t-\tau_1)/2\tau_2} (\beta_{2,3} \beta_{2,1})^{j-1} F_1 x e^{-2m\tau_1 - 2j\tau_2} \right\} \quad (5.28)$$

где

$$\tau = H_1 / V_{S_1}, \quad \tau_2 = H_2 / V_{S_2}, \quad \alpha_{1,2} = \frac{2}{1 + \gamma_2 V_{S_2} / \gamma_1 V_{S_1}},$$

$$\alpha_{3,2} = \frac{2}{1 + \gamma_2 V_{S_2} / \gamma_3 V_{S_3}}, \quad \beta_{2,3} = \frac{\gamma_2 V_{S_2} / \gamma_3 V_{S_3} - 1}{\gamma_2 V_{S_2} / \gamma_3 V_{S_3} + 1}.$$

В последнее время разработан новый алгоритм способа МОВ сейсмического микрорайонирования [Заалишвили, Мельков, 2010].

Процесс распространения сейсмических волн через грунтовые слои моделируется в виде временных задержек, определяемых мощностью слоя и скоростью волны в нем, т.е. фактически времени пробега волны через слой. Рассмотрим принцип на примере двухслойной модели грунтовой среды (Рисунок 5.18). Каждый из грунтовых слоев характеризуется мощностью H , плотностью ρ , скоростью распространения поперечной волны V_s и коэффициентом поглощения α .

Коэффициенты отражения и преломления сейсмических волн на границах сред рассчитываются по формулам:

$$\alpha_{ij} = \frac{2}{1 + \frac{\rho_j V_{s_j}}{\rho_i V_{s_i}}}, \quad \beta_{ij} = \frac{1 - \frac{\rho_j V_{s_j}}{\rho_i V_{s_i}}}{1 + \frac{\rho_j V_{s_j}}{\rho_i V_{s_i}}}, \quad (5.29)$$

где сейсмическая волна распространяется из i -го слоя в j -й.

В данной модели каждый слой представляется в виде некоторого элемента, имеющего два входа и два выхода (Рисунок 5.18). Процесс распространения проходящей через слой сейсмической волны моделируется подачей соответствующего сигнала на вход элемента и подачей его на выход с временной задержкой

$$\tau_i = H_i / V_{s_i} \quad (5.30)$$

Явление затухания учитывается умножением выходного сигнала на величину $e^{-\alpha_i H_i}$.

Элементы соединены таким образом, что на каждый из входов элемента подается сумма выходных сигналов предыдущего элемента и соответствующего выходного сигнала данного элемента, умноженные соответственно на коэффициент преломления и отражения. Входная сейсмограмма $f(t)$ подается на вход нижнего слоя, выходная $g(t)$ получается на выходе поверхностного.

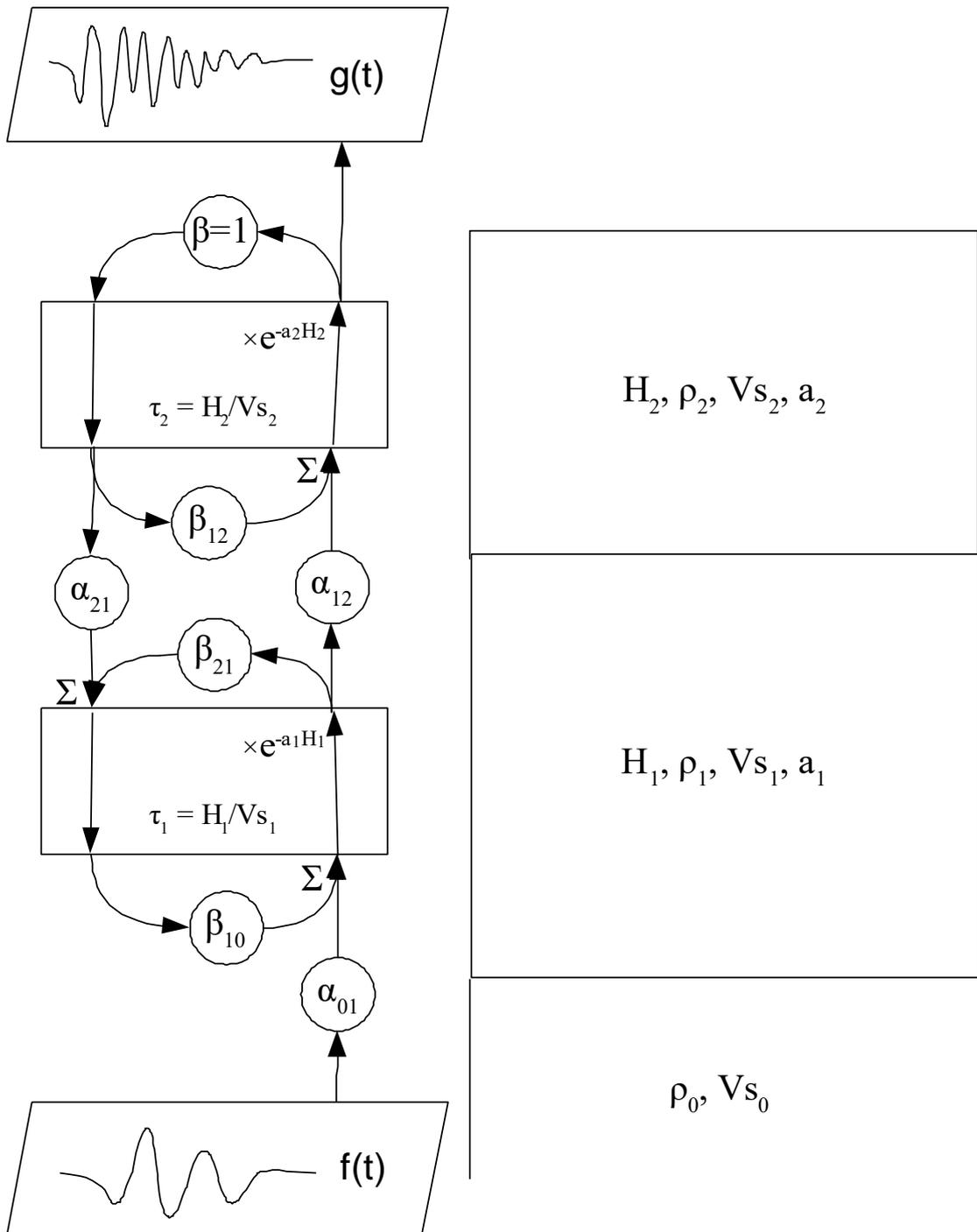


Рисунок 5.18. Схематическое представление алгоритма

В некотором смысле рассмотренный нами элемент, представленный на рис. 5.18 аналогичен нейрону в нейронных сетях. При этом каждый коэффициент отражения и преломления представляет собой весовой коэффициент – вес синапса. Синаптические связи с положительными весами

называют возбуждающими, с отрицательными – тормозящими. Функция активации имеет особый вид, являясь линейной с задержкой ($f(s)=s-\tau$).

Программная реализация алгоритма осуществляется следующим образом. Каждый из элементов имеет два массива хранения данных $S\uparrow$ и $S\downarrow$, для хранения отсчетов амплитуд волн распространяющихся вверх и вниз соответственно. Размер массива определяется следующим образом:

$$N_s = \text{round}\left(\frac{H_i}{V_{s_i} \cdot dt}\right), \quad (5.31)$$

где round означает округление до целого, dt – шаг по времени.

На каждом временном шаге из массива извлекается первый в очереди элемент и в конец очереди ставится новый. Иллюстрация процедуры дается на рисунке 5.19. В массиве S хранятся отсчеты d, на текущий элемент указывает указатель, обозначенный стрелкой. На каждом последующем временном шаге текущий элемент извлекается из массива и на его место ставится новый, одновременно указатель смещается на единицу. Таким образом обеспечивается цикличность считывания данных без необходимости перемещения элементов в массиве. Процедура продолжается в цикле до достижения конца входного сигнала или же до определенного момента времени, считая что на вход подаются нулевые отсчеты. Алгоритм реализован на языке MATLAB.

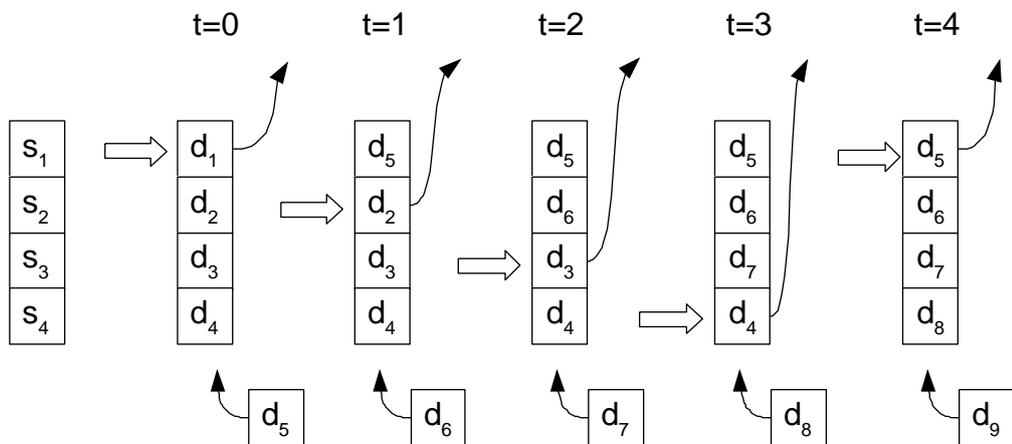


Рисунок 5.19. Принцип хранения данных в массиве S

Для каждой и рассмотренных моделей и воздействий были рассчитаны спектральные характеристики (Приложение 2) и соответствующие акселерограммы на поверхности толщи. Максимальные амплитуды расчетных акселерограмм представлены в таблице 5.7. По максимальным амплитудам колебаний определены приращения сейсмической интенсивности (Таблица 5.7).

В качестве средних грунтовых условий выбран пункт номер 11 поскольку по методу сейсмических жесткостей приращение составило близкое к нулю значение -0.1 и данная точка по всем предварительным данным находится в 8-балльной зоне.

Результаты расчетов средних приращений сейсмической интенсивности по различным формулам, среднеквадратические отклонения и соответствующие доверительные интервалы для вероятности 95% представлены в таблицах 5.7–5.9 и на рисунках 5.20–5.26.

Таблица 5.7. – Расчет приращений сейсмической интенсивности по результатам моделирования сопособом МОВ

NN	Name	ΔI PGA	ΔI PGV	ΔI PGAPGV	ΔI PGAtd	ΔI _PGAfw	ΔI _PGVfw	ΔI _Sr
1	Архонские сады	-0.77	-0.31	-0.43	-0.61	-0.92	-0.52	-0.5
2	БАМ	-0.82	-0.35	-0.47	-0.65	-0.88	-0.52	-0.49
3	Весна	0.47	0.83	0.52	0.38	0.11	0.43	0.21
4	Водная	-0.89	-0.37	-0.51	-0.72	-0.9	-0.56	-0.52
5	Гадиева 1	1.02	1.13	0.86	0.89	0.75	0.86	0.53
6	Гадиева 2	0.9	1.11	0.81	0.79	0.58	0.73	0.43
7	Газоаппарат	-0.44	-0.16	-0.24	-0.33	-0.59	-0.32	-0.32
8	Галковского	-0.24	-0.04	-0.11	-0.18	-0.38	-0.19	-0.2
9	Дарьял	-0.67	-0.28	-0.38	-0.52	-0.8	-0.45	-0.43
10	Дом печати	-0.45	-0.2	-0.26	-0.36	-0.39	-0.28	-0.24
11	Карабулакская	0	0	0	0	0	0	0
12	Карцинское шоссе	0.52	0.78	0.52	0.41	0.11	0.43	0.12
13	Контакт	0.23	0.27	0.2	0.17	0.03	0.14	0.07
14	Кырджалийская	0.45	0.43	0.35	0.33	0.26	0.32	0.17
15	Леваневского	-0.62	-0.25	-0.35	-0.48	-0.65	-0.41	-0.37
16	Металлург	-0.91	-0.37	-0.52	-0.72	-1.06	-0.6	-0.57
17	Переезд	-0.5	-0.22	-0.29	-0.39	-0.41	-0.29	-0.25
18	Пожарского	-0.73	-0.31	-0.42	-0.58	-0.86	-0.49	-0.46
19	Собачья балка	0.86	0.87	0.69	0.63	0.62	0.72	0.45
20	СОГУ	0.25	0.23	0.19	0.19	0.13	0.16	0.08
21	Ставропольская	0.89	0.89	0.71	0.67	0.55	0.69	0.35
22	Тургеневская	0.06	0	0.02	0.04	0.14	0.05	0.06
23	Учитель	0.7	0.78	0.59	0.54	0.38	0.57	0.28
24	Чкалова	-0.4	-0.19	-0.23	-0.3	-0.34	-0.24	-0.21
25	НОЛ	0.31	0.71	0.41	0.38	-0.12	0.25	0.02
26	Ч. Баева	-0.92	-0.38	-0.52	-0.73	-1	-0.59	-0.56
27	Коцоева	-0.89	-0.37	-0.5	-0.73	-0.95	-0.57	-0.53
28	Дзусова	-0.19	-0.08	-0.11	-0.14	-0.2	-0.13	-0.12
29	Калоева	-0.93	-0.38	-0.53	-0.74	-0.98	-0.6	-0.56
30	Леонова	-0.99	-0.4	-0.56	-0.77	-1.02	-0.63	-0.59
31	Николаева	-0.21	-0.14	-0.14	-0.14	-0.2	-0.15	-0.13
32	Огнева	0.18	0.01	0.08	0.2	0.21	0.07	0.06
33	Тельмана	-0.93	-0.38	-0.53	-0.73	-0.96	-0.59	-0.55
34	Тамаева	-0.97	-0.4	-0.55	-0.77	-1.04	-0.62	-0.59
35	Храм Александра Невского	-0.49	-0.22	-0.28	-0.35	-0.55	-0.33	-0.3
36	Астана Кесаева	-0.85	-0.36	-0.49	-0.67	-0.84	-0.53	-0.49
37	Весенняя	0.27	0.08	0.14	0.21	0.29	0.15	0.14
38	Доватора	-0.82	-0.35	-0.47	-0.64	-0.78	-0.5	-0.45
39	Училище Кадырова	-0.54	-0.25	-0.32	-0.4	-0.59	-0.36	-0.33
40	Московское	-0.5	0.46	-0.01	-0.2	-0.92	-0.25	-0.47
41	Спартак	-0.15	0.17	0.01	-0.13	-0.41	-0.09	-0.18

Таблица 5.8. – Среднеквадратические отклонения приращений сейсмической интенсивности по результатам моделирования сопособом МОВ

NN	Name	Std PGA	Std PGV	StdPGAPG V	StdPGAt d	StdPGAf w	StdPGVfw	StdSr
1	Архонские сады	0.17	0.14	0.1	0.14	0.16	0.14	0.03
2	БАМ	0.16	0.16	0.1	0.17	0.15	0.15	0.03
3	Весна	0.29	0.26	0.19	0.21	0.25	0.24	0.06
4	Водная	0.18	0.17	0.11	0.17	0.16	0.16	0.03
5	Гадиева 1	0.25	0.25	0.17	0.23	0.22	0.22	0.04
6	Гадиева 2	0.26	0.32	0.2	0.23	0.23	0.27	0.05
7	Газоаппарат	0.13	0.09	0.07	0.13	0.12	0.09	0.02
8	Галковского	0.15	0.1	0.08	0.14	0.14	0.1	0.03
9	Дарьял	0.15	0.13	0.09	0.14	0.13	0.12	0.02
10	Дом печати	0.12	0.1	0.06	0.13	0.11	0.09	0.01
11	Карабулакская	0	0	0	0	0	0	0
12	Карцинское шоссе	0.38	0.35	0.26	0.19	0.33	0.31	0.07
13	Контакт	0.16	0.16	0.11	0.12	0.15	0.15	0.02
14	Кырджалийская	0.25	0.25	0.18	0.17	0.23	0.24	0.04
15	Леваневского	0.15	0.12	0.09	0.14	0.14	0.11	0.02
16	Металлург	0.19	0.17	0.11	0.15	0.17	0.16	0.03
17	Переезд	0.13	0.11	0.08	0.14	0.12	0.1	0.02
18	Пожарского	0.15	0.13	0.09	0.15	0.13	0.13	0.03
19	Собачья балка	0.26	0.28	0.19	0.16	0.24	0.25	0.04
20	СОГУ	0.15	0.15	0.1	0.13	0.14	0.14	0.03
21	Ставропольская	0.33	0.3	0.23	0.23	0.3	0.29	0.06
22	Тургеневская	0.06	0.02	0.03	0.08	0.06	0.02	0.01
23	Учитель	0.3	0.29	0.2	0.2	0.27	0.28	0.06
24	Чкалова	0.13	0.1	0.07	0.14	0.12	0.09	0.01
25	НОЛ	0.41	0.31	0.27	0.35	0.36	0.3	0.08
26	Ч. Баева	0.18	0.17	0.11	0.18	0.16	0.16	0.03
27	Коцоева	0.18	0.17	0.11	0.2	0.16	0.16	0.03
28	Дзусова	0.08	0.06	0.04	0.11	0.08	0.05	0.01
29	Калоева	0.19	0.17	0.11	0.17	0.17	0.16	0.03
30	Леонова	0.2	0.18	0.12	0.16	0.18	0.17	0.03
31	Николаева	0.15	0.09	0.08	0.19	0.14	0.09	0.02
32	Огнева	0.22	0.12	0.11	0.19	0.2	0.12	0.03
33	Тельмана	0.19	0.17	0.11	0.17	0.17	0.16	0.03
34	Тамаева	0.2	0.17	0.12	0.18	0.18	0.17	0.03
35	Храм Александра Невского	0.09	0.1	0.06	0.15	0.09	0.09	0.01
36	Астана Кесаева	0.18	0.16	0.11	0.15	0.16	0.15	0.03
37	Весенняя	0.14	0.1	0.07	0.17	0.13	0.09	0.02
38	Доватора	0.18	0.16	0.1	0.16	0.16	0.15	0.02
39	Училище Кадырова	0.11	0.12	0.06	0.15	0.1	0.11	0.01
40	Московское	0.54	0.41	0.37	0.3	0.41	0.35	0.13
41	Спартак	0.28	0.21	0.17	0.22	0.25	0.2	0.05

Таблица 5.9. – Доверительные интервалы для вероятности 95% для приращений сейсмической интенсивности по результатам моделирования сопособом МОВ

NN	Name	Conf PGA	Conf PGV	ConfPGAP G	ConfPGAt d	ConfPGAf w	ConfPGVf w	Conf Sr
1	Архонские сады	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.01
2	БАМ	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.01
3	Весна	0.07	0.07	0.05	0.05	0.06	0.06	0.01
4	Водная	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.01
5	Гадиева 1	0.06	0.06	0.04	0.06	0.06	0.05	0.01
6	Гадиева 2	0.07	0.08	0.05	0.06	0.06	0.07	0.01
7	Газоаппарат	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.01
8	Галковского	0.04	0.03	0.02	0.04	0.04	0.02	0.01
9	Дарьял	0.04	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.01
10	Дом печати	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0
11	Карабулакская	0	0	0	0	0	0	0
12	Карцинское шоссе	0.09	0.09	0.07	0.05	0.08	0.08	0.02
13	Контакт	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04	0.01
14	Кырджалийская	0.06	0.06	0.04	0.04	0.06	0.06	0.01
15	Леваневского	0.04	0.03	0.02	0.04	0.04	0.03	0.01
16	Металлург	0.05	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.01
17	Переезд	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0
18	Пожарского	0.04	0.03	0.02	0.04	0.03	0.03	0.01
19	Собачья балка	0.07	0.07	0.05	0.04	0.06	0.06	0.01
20	СОГУ	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04	0.01
21	Ставропольская	0.08	0.08	0.06	0.06	0.07	0.07	0.02
22	Тургеневская	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0
23	Учитель	0.07	0.07	0.05	0.05	0.07	0.07	0.01
24	Чкалова	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0
25	НОЛ	0.1	0.08	0.07	0.09	0.09	0.07	0.02
26	Ч. Баева	0.05	0.04	0.03	0.05	0.04	0.04	0.01
27	Коцоева	0.04	0.04	0.03	0.05	0.04	0.04	0.01
28	Дзусова	0.02	0.01	0.01	0.03	0.02	0.01	0
29	Калоева	0.05	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.01
30	Леонова	0.05	0.04	0.03	0.04	0.05	0.04	0.01
31	Николаева	0.04	0.02	0.02	0.05	0.03	0.02	0
32	Огнева	0.05	0.03	0.03	0.05	0.05	0.03	0.01
33	Тельмана	0.05	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.01
34	Тамаева	0.05	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.01
35	Храм Александра Невского	0.02	0.03	0.01	0.04	0.02	0.02	0
36	Астана Кесаева	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.01
37	Весенняя	0.04	0.02	0.02	0.04	0.03	0.02	0
38	Доватора	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.01
39	Училище Кадырова	0.03	0.03	0.02	0.04	0.02	0.03	0
40	Московское	0.13	0.1	0.09	0.07	0.1	0.09	0.03
41	Спартак	0.07	0.05	0.04	0.06	0.06	0.05	0.01

Пространственное распределение величин сейсмической интенсивности будет иметь следующий вид (Рисунки 5.20–5.26).

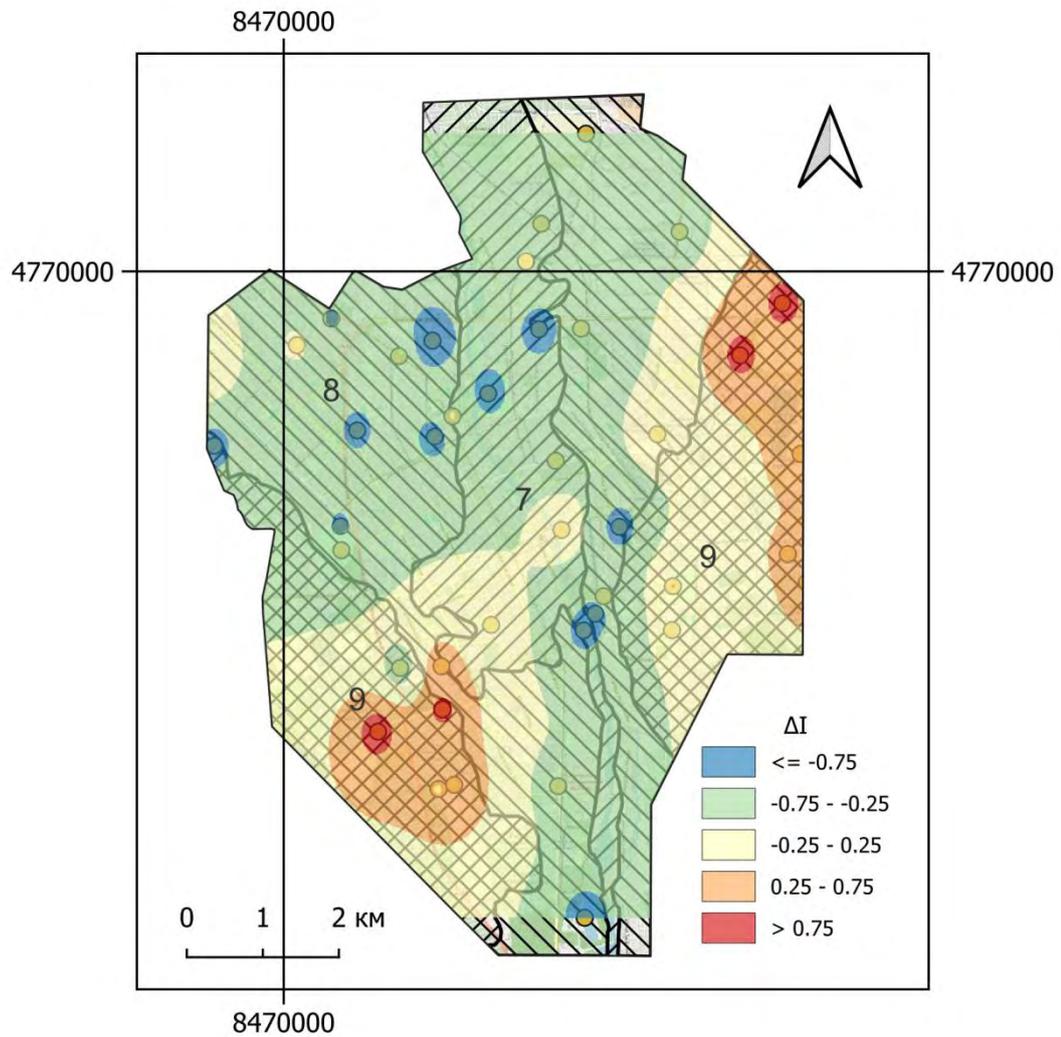


Рисунок 5.20. Приращения по пиковым горизонтальным ускорениям

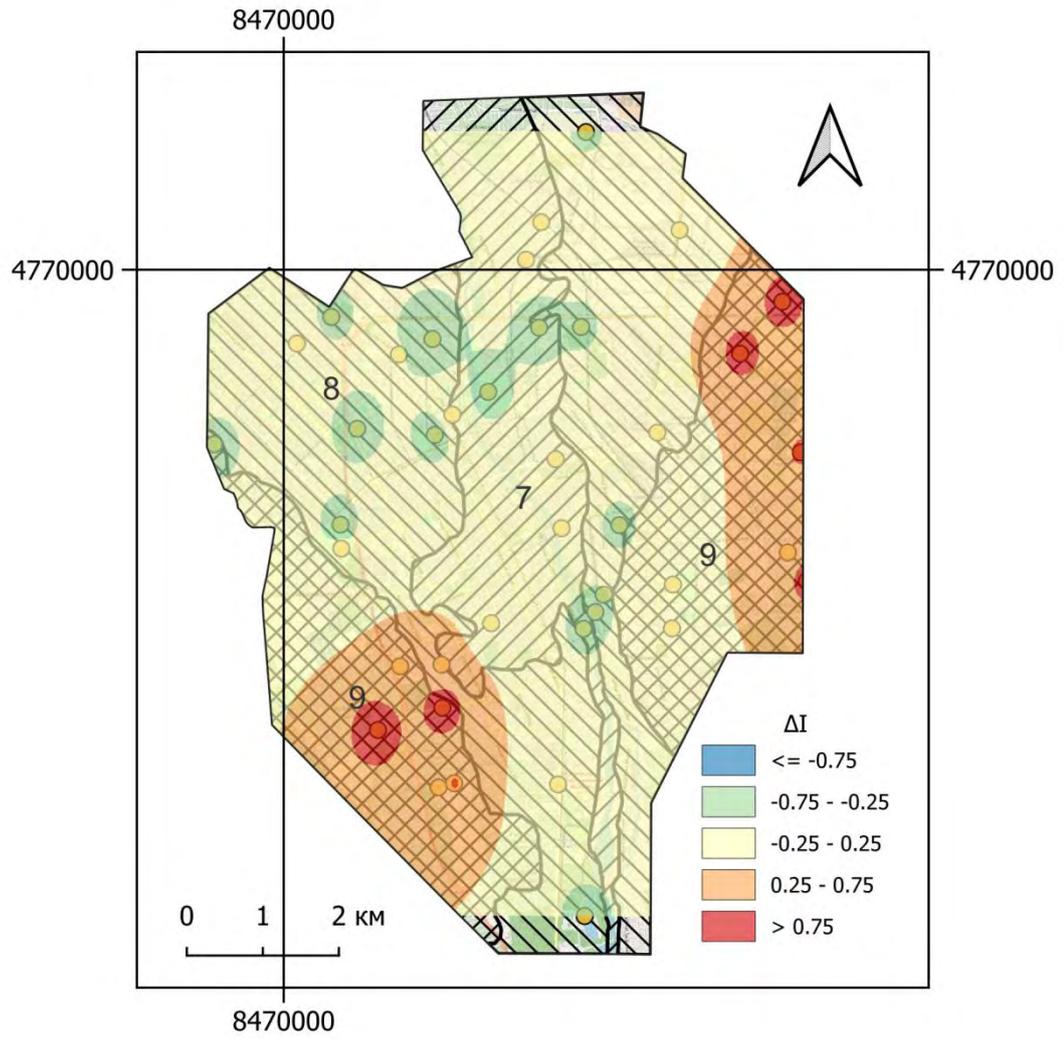


Рисунок 5.21. Приращения сейсмической интенсивности по пиковым скоростям

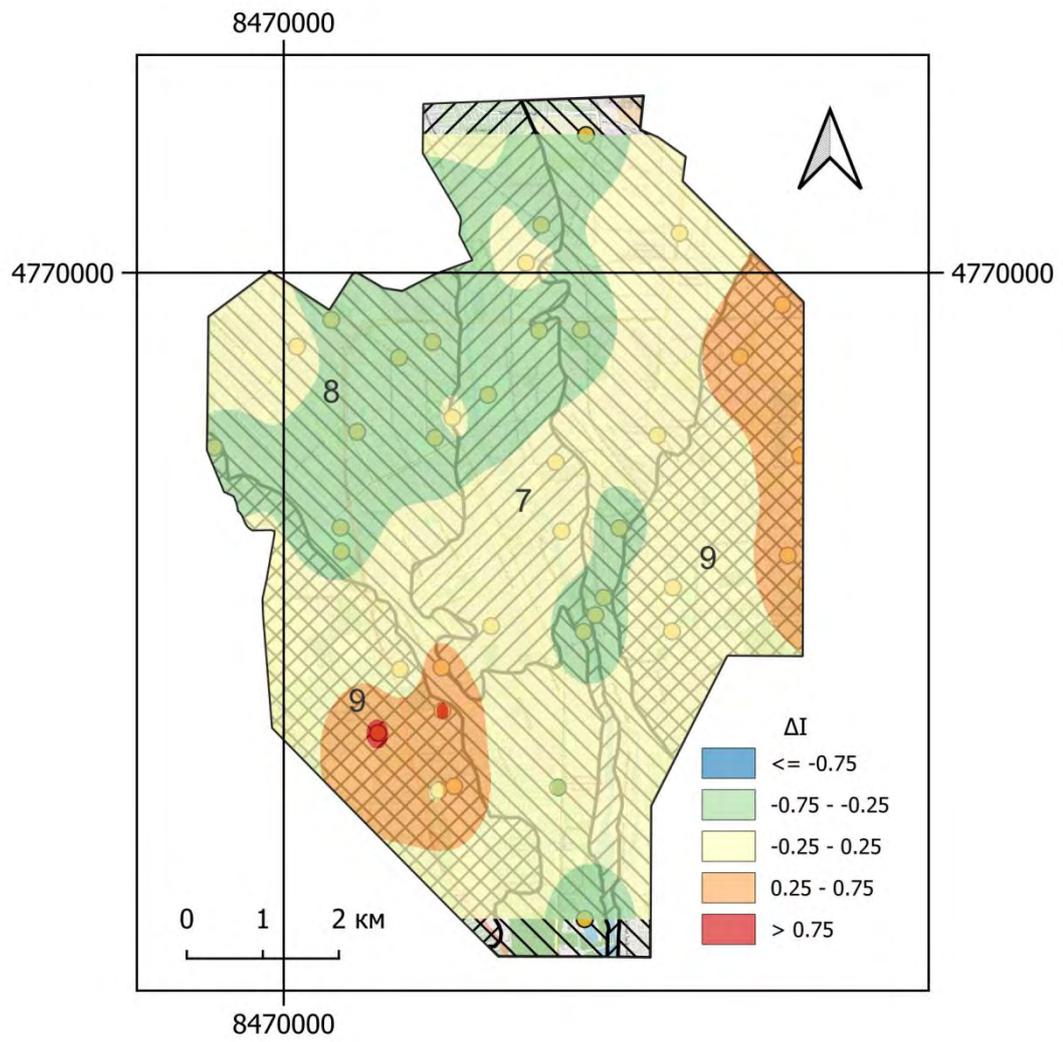


Рисунок 5.22. Приращения по произведению скорости на ускорение

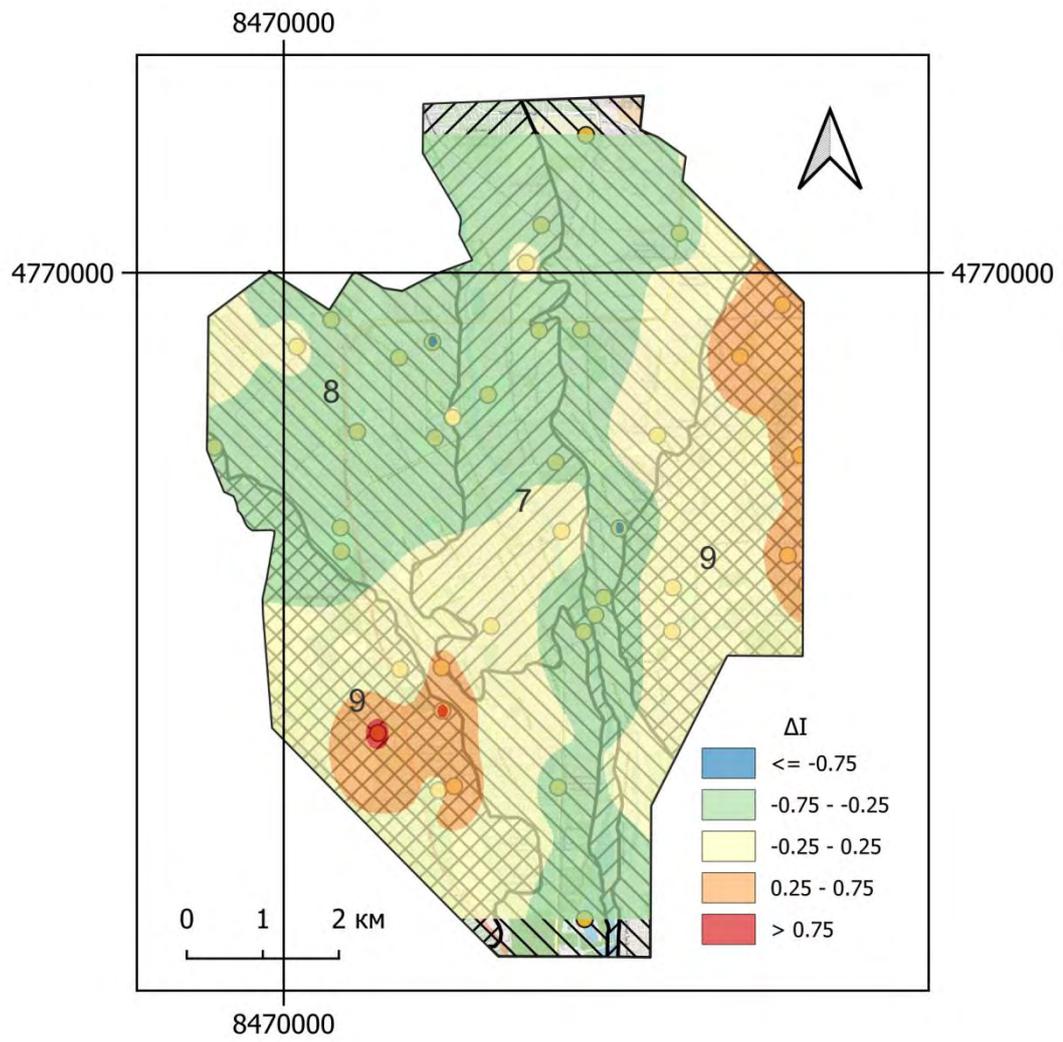


Рисунок 5.23. Приращения по ускорениям и продолжительности колебаний

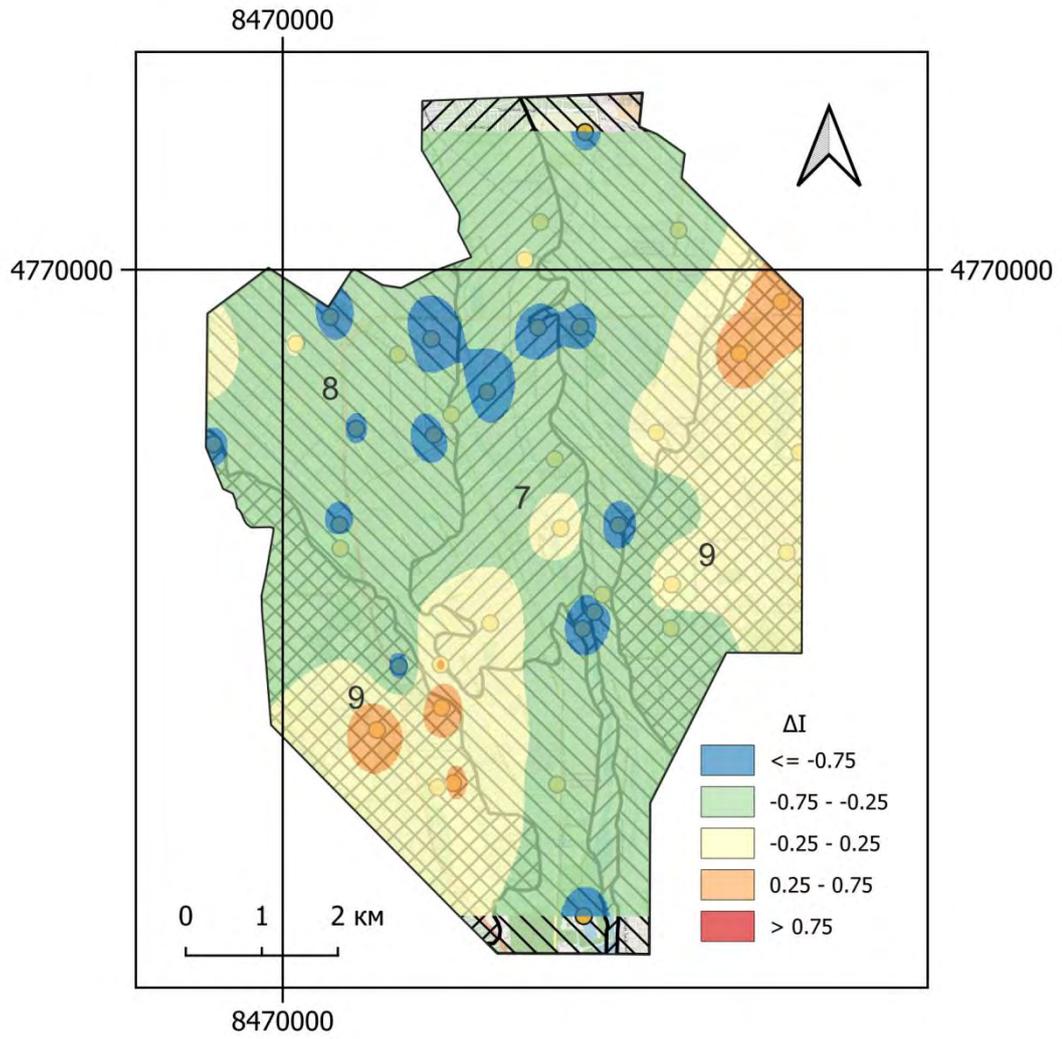


Рисунок 5.24. Приращения по ускорениям и средневзвешенной частоте колебаний

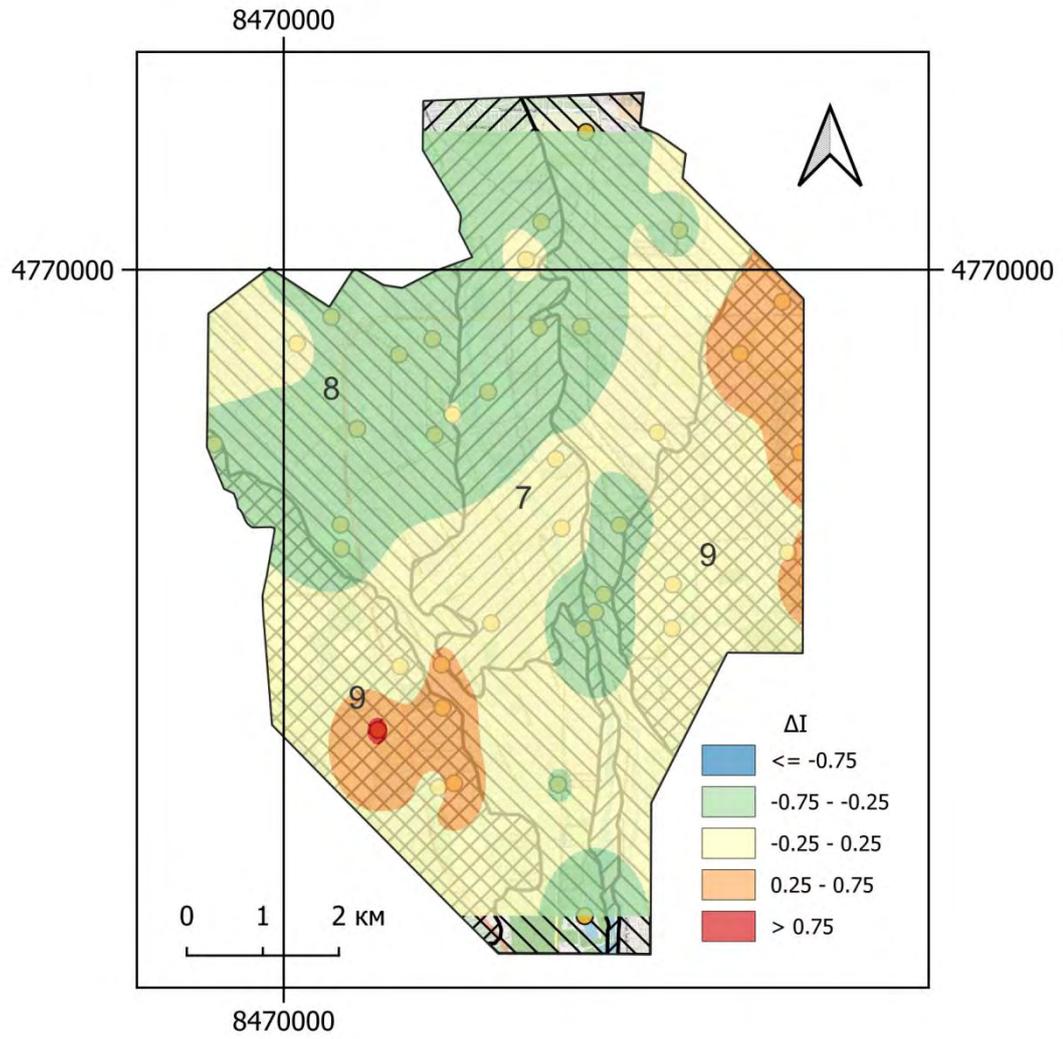


Рисунок 5.25. Приращения по скорости и средневзвешенной частоте колебаний

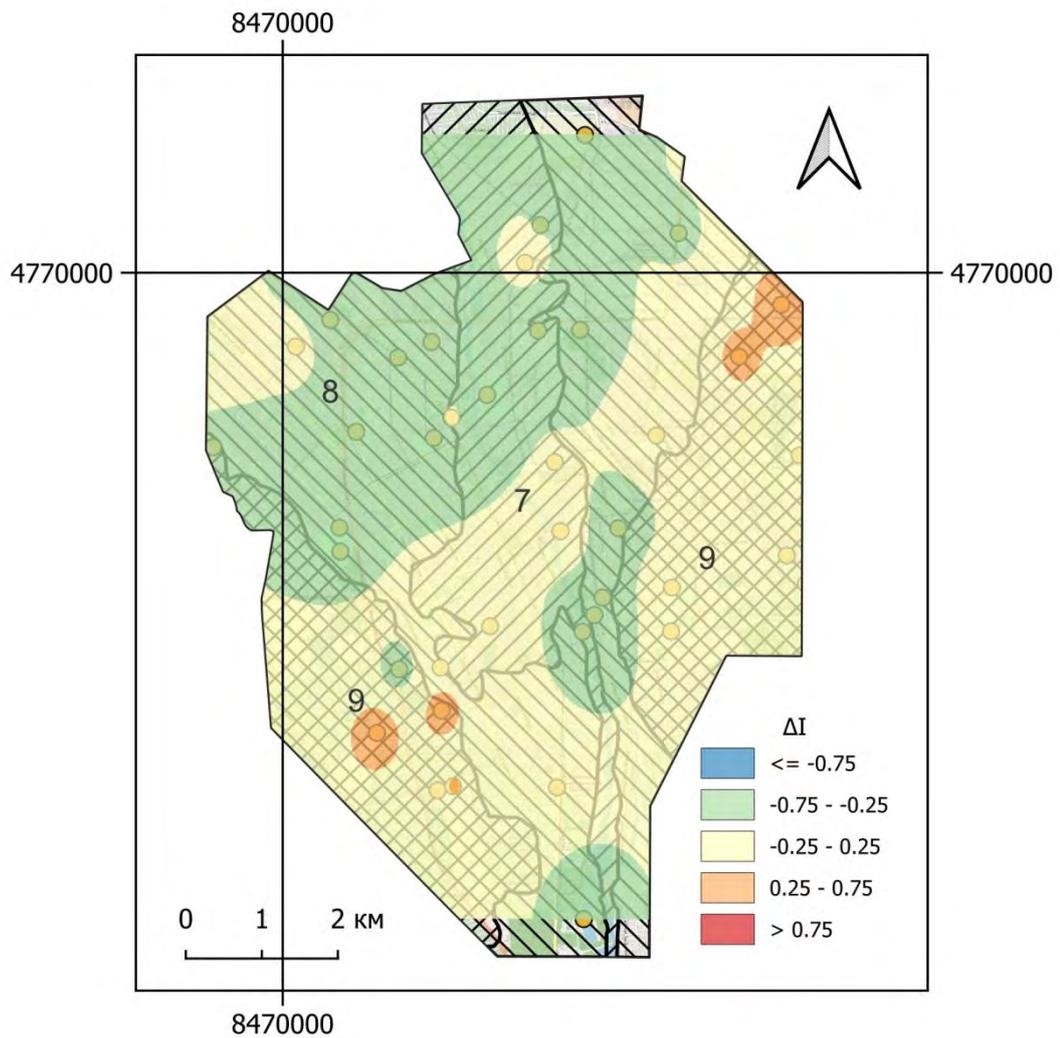


Рисунок 5.26. Приращения по площади спектра (ускорений) колебаний

Таким образом, характер вариации приращений по территории, полученный с использованием различных методов, в целом, совпадает. «Контрастность» данного распределения определяется коэффициентом перед логарифмом в соответствующих формулах.

5.9. Различия полученных результатов с данными карты СМР. Дисперсия как характеристика грунтовых условий

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 категории 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 [Заалишвили и др., 2007].

В качестве нового критерия оценки приращений сейсмической интенсивности использована дисперсия разброса значений около среднего (в таблице 5.10 приведены примеры расчетов для участков, представленных на рисунке 5.27) [Заалишвили и др., 2024б]. На рисунке 5.27 показаны гистограммы и соответствующие плотности вероятности, в предположении, что распределение является нормальным.

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.

В связи с необходимостью оценки максимальных воздействий с определенной вероятностью неперевышения, 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 рисунке 5.28.

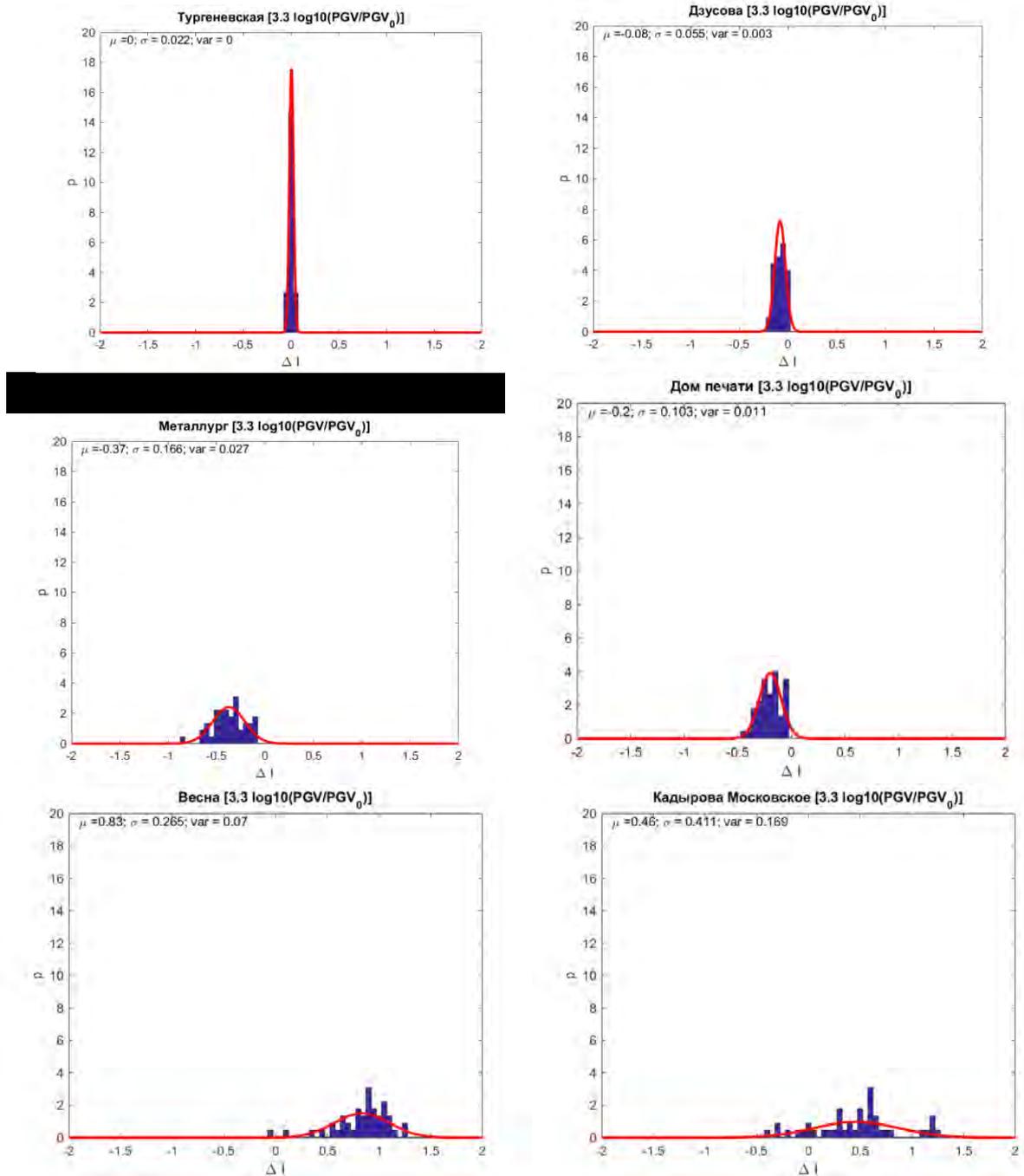


Рисунок 5.27. Гистограммы распределения приращений сейсмической интенсивности для различных участков территории

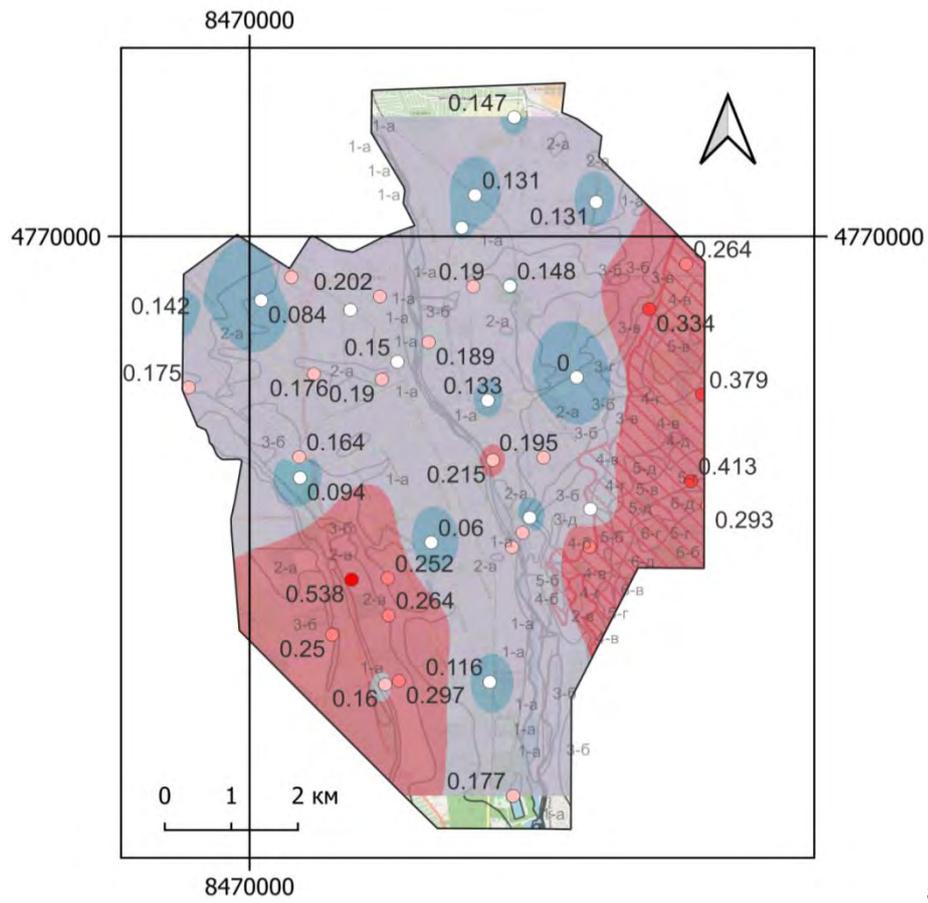
Таблица 5.10. – Расчет приращений сейсмической интенсивности ΔI (средние значения) и соответствующие среднеквадратические отклонения σ

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

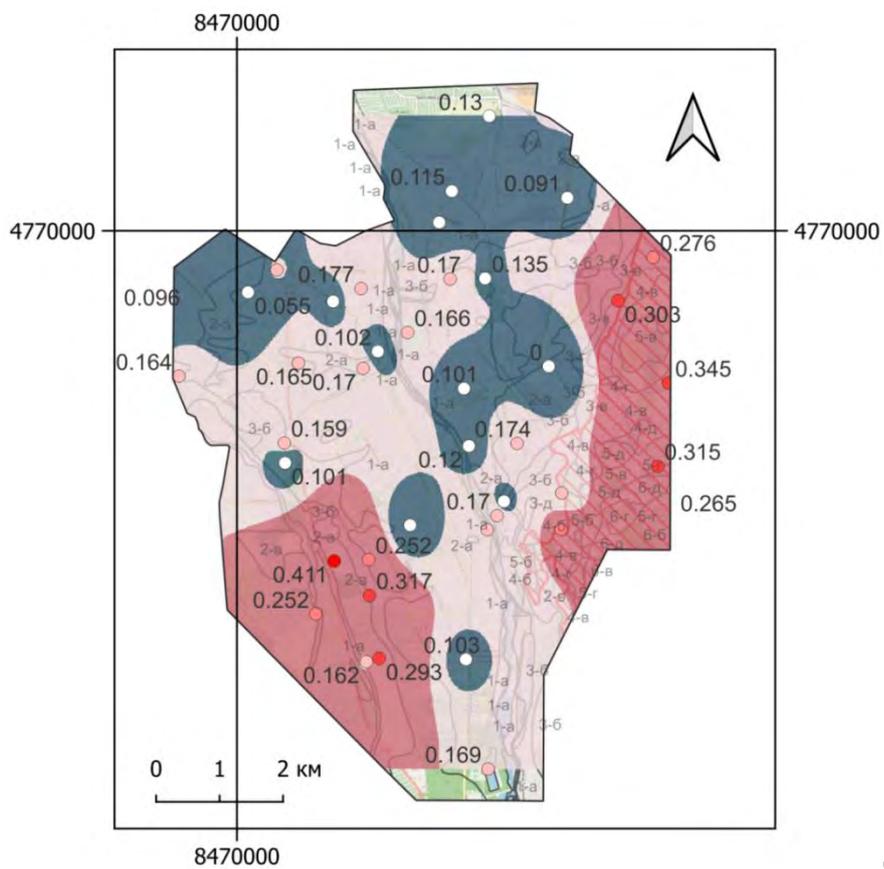
В результате выполнено районирование территории г. Владикавказа по комплексу критериев в рамках предложенных формул с учетом доверительных интервалов для вероятностей 5% и 1% неперевышения указанных значений (Таблица 5.11) и районирования в пределах каждой категории грунтов, исходя из уточненных данных 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 происходит следующим образом: деление схемы инженерно-геологического районирования на подобласти диаграммой Вороного (Рисунок 5.29) и дифференциация внутри каждой категории комплекса ИГЭ (Рисунок 5.30). Если точка не попадает в категорию комплекса ИГЭ, то соответствующая зона на схеме не представлена, и в качестве подложки показана интерполяция данных между точками.

Распределение участков по типу ИГЭ представлено в таблице 5.12.



a)



б)

Рисунок 5.28. Среднеквадратические отклонения приращений сейсмической интенсивности по пиковым горизонтальным ускорениям (а) и скоростям (б)

Таблица 5.11 – Приращения сейсмической интенсивности на городских участках для вероятностей неперевышения 95% и 99%

№ пп	Формула	Весна		Дом печати		Металлург		Тургеневская		Дзусова		Кадырова Московское	
		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.	$\Delta I = 2.5 \cdot \lg(\text{PHA}/\text{PHA}_0) + 1.25 \cdot \log_{10}(\tau/\tau_0)$	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.	$\Delta I = 3.0 \cdot \lg((\text{PHA} \cdot f_{aw}) / (\text{PHA}_0 \cdot f_{aw0}))$	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.	$\Delta I = 2.0 \cdot \lg(\text{Sr}/\text{Sr}_0)$	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.	$\Delta I = 2.11 \cdot \lg(\text{Sr}/\text{Sr}_0) - 3.54 \cdot \lg(\text{faw}/\text{faw}_0)$	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.	$\Delta I = 0.59 \cdot \lg(\text{PHA}/\text{PHA}_0) + 2.11 \cdot \lg(\text{PHV}/\text{PHV}_0)$	0,67	0,69	-0,19	-0,18	-0,37	-0,36	0,02	0,02	-0,08	-0,07	0,29	0,33

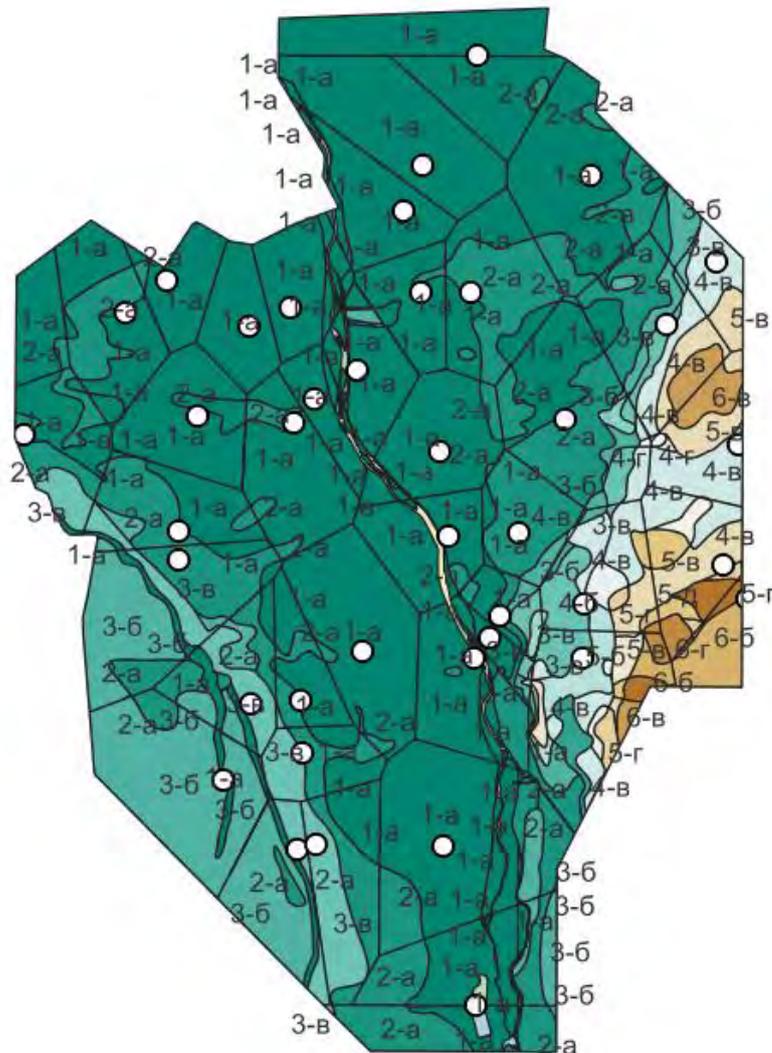


Рисунок 5.29. Деление схемы инженерно-геологического районирования на подобласти диаграммой Вороного

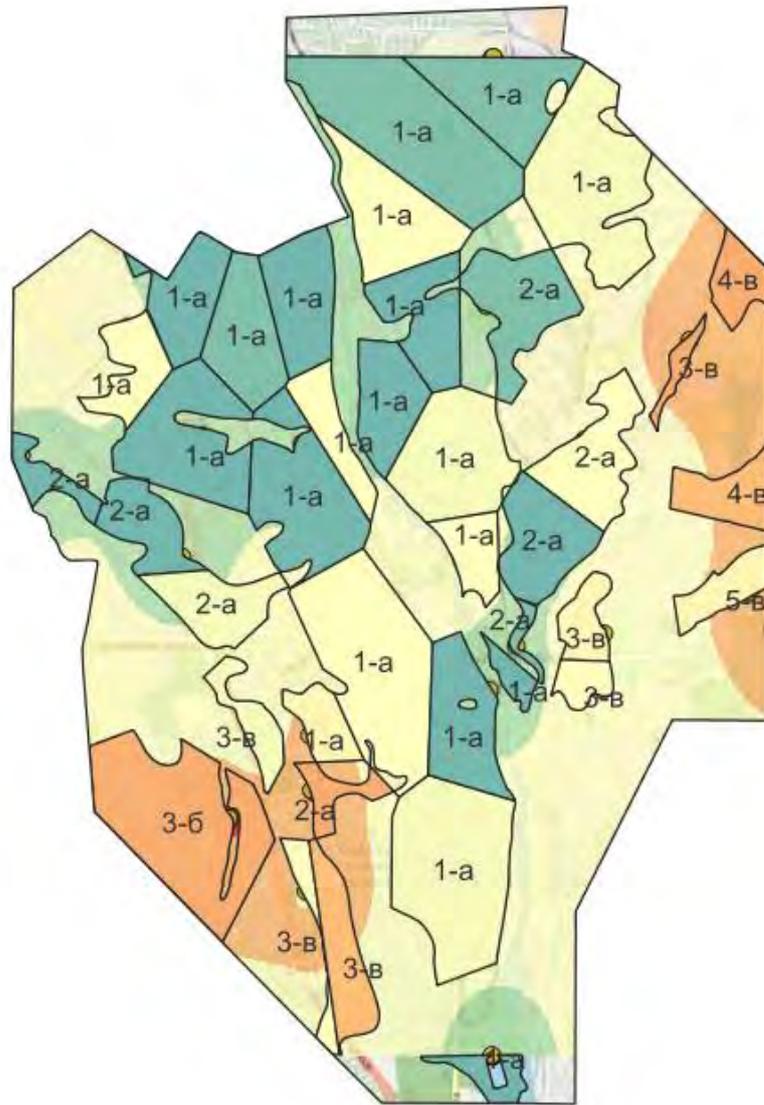


Рисунок 5.30. Дифференциация внутри каждой категории комплекса ИГЭ

Таблица 5.12. – Распределение участков по типу ИГЭ

№ п/п	Индекс	Название участка
1	1а	Архонские сады
2		Весенняя
3		Водная
4		Газоаппарат
5		Галковского
6		Дарьял

7		Дзусова
8		Доватора
9		Дом печати
10		Калоева
11		Коцоева
12		Кырджалийская
13		Леваневского
14		Леонова
15		Металлург
16		Николаева
17		Огнева
18		Переезд
19		Тельмана
20		Тургеневская
21		Ч. Баева
22		Чкалова
23	2а	Астана Кесаева
24		БАМ
25		Гадиева 2
26		Карабулакская
27		Пожарского
28		Тамаева
29		Училище

30		Храм Александра Невского
31	3б	Гадиева 1
32	3в	Кадырова/Московская
33		Контактор
34		СОГУ
35		Спартак
36		Ставропольская
37		Учитель
38	4в	Карцинское шоссе
39	5в	Собачья балка
40	6б	НОЛ (Весна)

5.10. К вопросу соответствия карты инженерно-геологического районирования по результатам геофизических исследований на территории г. Владикавказа. Выделение зон с различной сейсмичностью

Результаты проведенных геофизических исследований позволили внести 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, рисунок 5.31.) 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.

На территории г. Владикавказа подлежащего сейсмическому микрорайонированию валунно-галечниковые отложения, залегающие под суглинистым покровом мощностью до 5 м, в основном, флювиогляциального генезиса. Это подтверждается наличием на поверхности многочисленных крупных (до 5–7 м в диаметре) валунов изверженных пород, а также по горным выработкам (скважины, шурфы, траншеи). В связи с этим заполнитель в валунно-галечниковых образованиях, в основном, представлен глинистым материалом (глины песчанистые, суглинки), а их содержание в породе превышает 30–35%. Содержания заполнителя в валунно-галечниковых отложениях более 30–35% отмечаются по скважинам №№ 13, 425, 237, 248, 249, 250, 304, 315, 427, 428, 438, 485, 487 и 488; менее 30% – №№ 128, 150, 198, 199, 141, 145, 146, 144, 222, 140, 161, 219, 508, 490, 484, 478, 441, 445, 440, 403, 409, 412, 419, 353, 351, 354, 381 и 328.

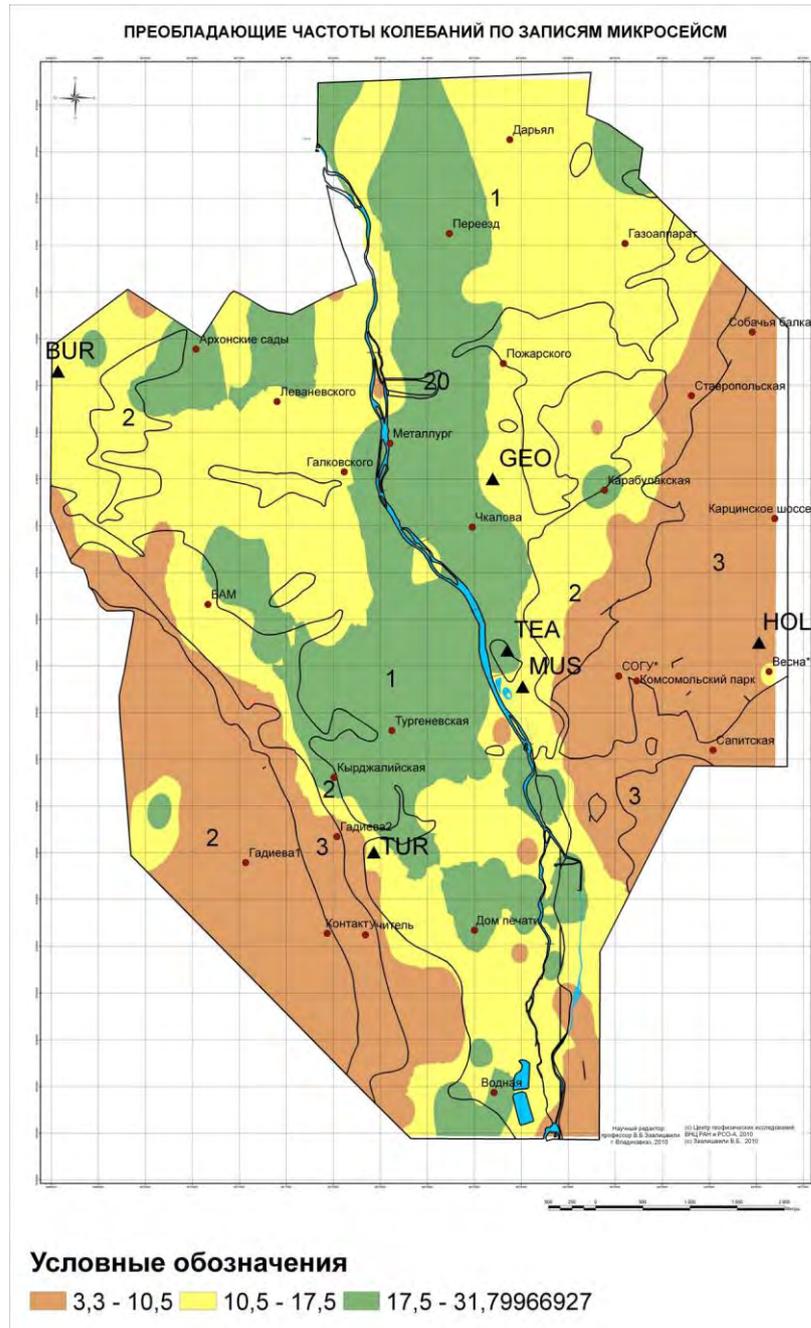


Рисунок 5.31. Результаты дифференциации грунтов по признаку преобладающих частот колебаний и границы зон по карте инженерно-геологического районирования

На отдельных локальных участках, ближе к пойме реки Терек, и в ее пойменной части материал заполнителя представлен песчаными образованиями.

Исходя из вышеизложенного, валунно-галечниковые грунты, распространенные в западной части территории СМР, по сейсмическим

свойствам согласно СНиП II-7-81*, отнесены ко II категории. Позже отнесение указанных грунтов ко II категории было подтверждено инструментально.

Установлено, что галечники на глубинах от 5 до 10 метров представляют собой галечники с песчано-глинистым заполнителем $> 30\%$, которые на глубине > 10 метров, как правило, сменяются галечниками с песчано-глинистым заполнителем $< 30\%$. На отдельных участках имеются выходы указанных грунтов (галечники с песчано-глинистым заполнителем $< 30\%$) непосредственно на дневную поверхность.

Учитывая, что величина приращений интенсивности относительно эталонных, необводненных глинистых грунтов т/пластичной консистенции к которым отнесена исходная сейсмичность или интенсивность равная 8 баллам, ожидаемая интенсивность землетрясений составит:

- 1) для глинистых грунтов (мягкопластичные, текучей консистенции и т.д.) – + 1 балл;
- 2) для галечников с песчано-глинистым заполнителем $> 30\%$ – 0 баллов;
- 3) для галечников с песчано-глинистым заполнителем $< 30\%$ – -1 балл.

Таким образом, сейсмичность галечников с песчано-глинистым заполнителем $> 30\%$, имеющих приращения равные 0 баллов, составит 8 баллов; сейсмичность галечников с песчано-глинистым заполнителем $< 30\%$, характеризуемых приращением в -1 балл, составит 7 баллов. И, наконец, сейсмичность глинистых грунтов (мягкопластичные, текучей консистенции и т.д.), характеризуемых приращением в +1 балл, составит 9 баллов (Рисунок 5.32).

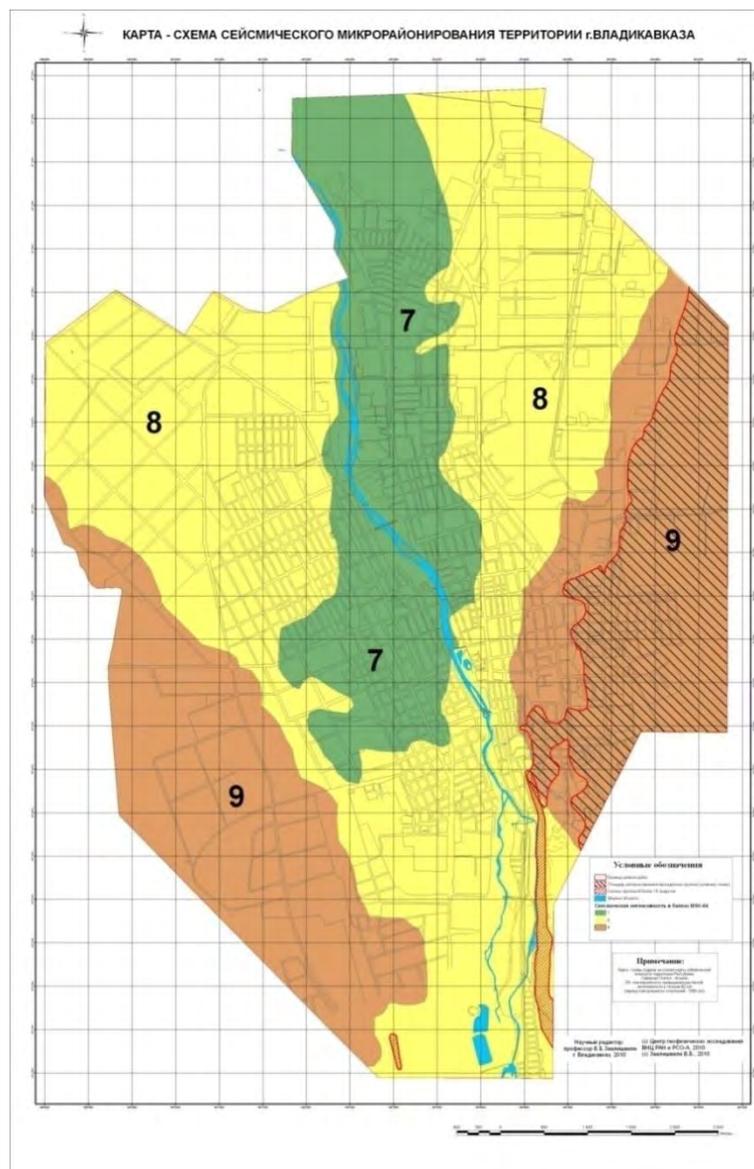


Рисунок 5.32. Карта-схема сейсмического микрорайонирования территории г. Владикавказа

Территория старой части города, на которой проявились землетрясения 1915 и 1929 годов расположена в юго-восточной части современных границ города. Эта часть площади города сложена глинистыми твердо-пластичными или туго/пластичными грунтами мощностью 3–20 метров. Исходная сейсмичность или балльность территории города равная 8 баллам должна быть отнесена к указанным глинистым грунтам. В связи с этим, зоны 8 балльной сейсмичности, отнесенные к этим грунтам, расположены как на правобережной, так и, на левобережной частях города. На правобережье эти зоны расположены в юго-восточной части города, где мощность глинистых

грунтов меняется в пределах 3–20 метров, а на левобережье – в юго-западной части – их мощность варьирует в пределах 3–15 метров. Таким образом, участки сложенные глинистыми грунтами п/твердой консистенции определены как средние грунтовые условия для территории г. Владикавказа и отнесены к 8-балльным.

Участки, сложенные сухими галечниковыми и галечниковыми грунтами с песчано-глинистым заполнителем < 30%, которые для г. Владикавказа являются преобладающими подстилающими грунтами (достигают 200–500 м мощности и лишь на локальных участках выходят на поверхность), отнесены к 7-балльной сейсмической зоне. Такими грунтами сложены участки как левобережной, так и правобережной частей города, как правило, начиная с глубины превышающей 5–10 м.

Согласно инженерно-геологическим и гидрогеологическим условиям территории г. Владикавказа в верхних слоях галечников, часто встречаются грунтовые воды типа «верховодки». Согласно современным воззрениям сейсмичность указанных участков зависит от количества заполнителя в галечниках. Наличие подобной «верховодки» в толще галечниковых грунтов с песчано-глинистым заполнителем < 30%, не меняет сейсмичность, и указанные участки относятся к 7-балльной зоне.

Хотя сейсмичность может несколько повышаться для галечников с заполнителем > 30%, по результатам наблюдений сейсмичность не меняется даже для наиболее высокого возможного уровня стояния грунтовых вод.

На территории г. Владикавказа на отдельных пониженных участках города, в юго-восточной его части в глинистых грунтах встречаются грунтовые воды типа «верховодки», с глубины 1,0–3,0 метра от дневной поверхности. Грунты указанных участков могут быть отнесены к 9-балльной сейсмической зоне, если только их мощность превышает 5 м.

На основе вышеизложенного была составлена карта-схема сейсмического микрорайонирования центральной части территории г. Владикавказа в масштабе 1:10 000. На указанной карте-схеме были выделены

обширная зона с 8-балльной интенсивностью и более меньшая зона с 9-балльной интенсивностью.

Таким образом, на карте сейсмического микрорайонирования выделены зоны с 7, 8 и 9-балльными интенсивностями (сейсмичностью). К 7-балльной зоне отнесены участки, сложенные галечниками с песчано-глинистым заполнителем $< 30\%$. К 8-балльной зоне отнесены участки, сложенные глинистыми необводненными грунтами (п/тв. консистенции и т.д.) и галечниками с песчано-глинистым заполнителем $> 30\%$; к 9-балльной зоне отнесены участки, сложенные глинистыми обводненными грунтами (текучей консистенции и т.д.) и участки с наклоном превышающим 15° .

Необходимо отметить, что при фундировании на галечники с песчано-глинистым заполнителем $< 30\%$ сейсмичность участка составит 7 баллов. Такие участки из-за малого их распространения и сложности выделения точных границ по данным фондовых материалов были выделены в пойменной северной части города, но также могут присутствовать на отдельных участках 8-балльной зоны.

В процессе работы было выявлено отсутствие детальности в основе данных для построения карты инженерно-геологического районирования, в частности, содержание песчано-глинистого заполнителя было указано только для ряда скважин. Уточнение инженерно-геологической карты территории в задачи работы не входило. Тем не менее, была проведена большая работа по уточнению свойств грунтов современными геофизическими методами и оборудованием.

В связи с тем, что при проектировании и строительстве современных зданий и сооружений обязательным условием является проведение детальных инженерно-геологических изысканий на конкретной площадке строительства, результаты настоящего исследования вполне достаточны для сейсмостойкого строительства.

По результатам выполненной оценки построена уточненная карта-схема СМР территории г. Владикавказа – рисунок 5.33 [Заалишвили и др.,

2024в]. Наблюдается различие в двух областях – рисунок 5.34: 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).

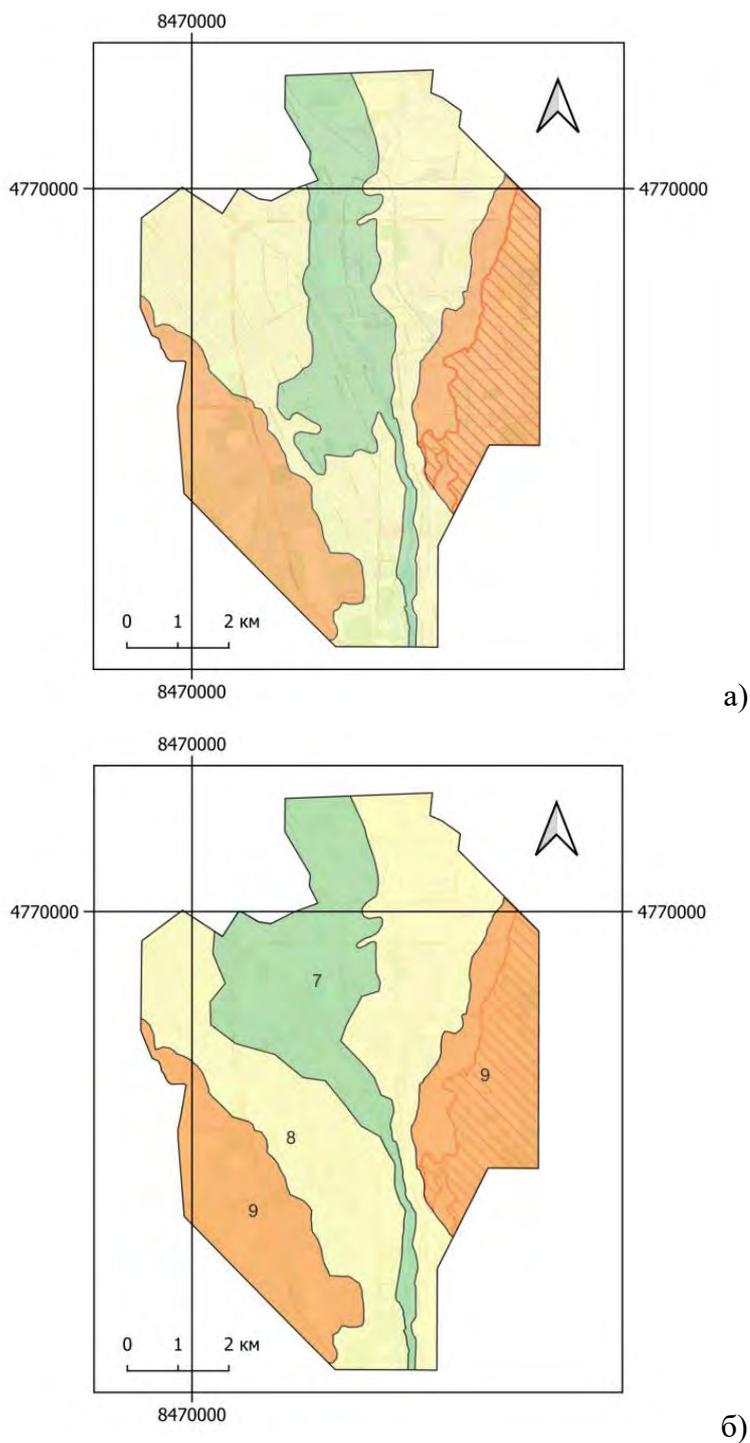


Рисунок 5.33. Исходная (а) и уточненная (б) карты СМР территории г.Владикавказа



Рисунок 5.34. Зоны с изменившейся сейсмичностью и их площади

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.

Таким образом, на основе детальных исследований по критерию дисперсии разработана оригинальная 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 геозкологической опасности, в свою очередь, формирующее различный геозкологический риск.

5.11. Практические рекомендации по сейсмическому микрорайонированию на основе инструментальной меры сейсмической интенсивности и учета геозкологических процессов

На основе вышеизложенного были разработаны практические Рекомендации по сейсмическому микрорайонированию на основе инструментальной меры сейсмической интенсивности и учета геозкологических процессов (реакции различных объектов и инженерно-геологических комплексов на сейсмические воздействия) (Приложение 3).

ВЫВОДЫ

1. Рассчитаны приращения сейсмической интенсивности с использованием различных существующих способов для целей сейсмического микрорайонирования. Все полученные данные согласуются с предположением о нормальности распределения.

2. Анализ полученных гистограмм показал, что более сложным в сейсмическом отношении грунтовым условиям, соответствуют большие значения дисперсии распределения, т.е. наблюдается больший разброс значений.

3. Выявлено, что неоднородность среды определяет разброс значений параметров, описывающих сейсмический эффект, около математического ожидания, и является дополнительной характеристикой грунтового комплекса, т.к. даже при одних и тех же величинах средней скорости поперечной волны в толще V_{s30} , участки могут относиться к разным сейсмическим категориям.

4. В целом, все способы расчета амплитуд колебаний показали близкие закономерности, однако ряд формул не дает достаточных значений для увеличения интенсивности на 1 балл, там где это, по сути, исходя из грунтовых условий, должно иметь место (участок НОЛ-Весна).

5. Оценка параметров, формирующих сейсмическую интенсивность, может быть выполнена с учетом различной вероятности превышения приведенных значений на основе доверительных интервалов в дробных значениях сейсмической интенсивности, определяющей геоэкологическое состояние территории.

6. Наилучшие результаты расчета приращений получены для меры Заалишвили – площадей спектров скоростей и ускорений, при этом площади спектров ускорений дают лучшую дифференциацию грунтовых условий по степени опасности (при одинаковом коэффициенте перед логарифмом).

7. Таким образом, задача совершенствования инструментального метода сейсмического микрорайонирования состоит в уточнении коэффициентов перед логарифмическим масштабом рассматриваемых величин, уменьшение которых может приводить к уточнению уровня воздействий для заданных интенсивностей (это важный вывод, если опасность выражена в баллах, в которых задается соответствующее воздействие), но с другой стороны, меньшие коэффициенты приводят к худшей дифференциации грунтовых условий при расчете приращений сейсмической интенсивности. Оптимальное решение, очевидно, может иметь место на стыке обоих этих подходов.

8. Разработана методика геоэкологического районирования территории, основанная на эмпирических регрессионных соотношениях и оценках статистических характеристик получаемых величин, позволяющих непосредственно учитывать факторы и закономерности развития опасных природно-техногенных процессов и оценку их геоэкологического риска.

9. Разработаны практические Рекомендации по сейсмическому микрорайонированию на основе инструментальной меры сейсмической интенсивности и учета геоэкологических процессов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В практику геоэкологических оценок состояния среды введены сейсмические методы инструментальной оценки состояния грунтовых условий. Массовое исследование и анализ, в частности, групповых записей микросейсмических колебаний или микросейсм позволили установить возможность выполнения геоэкологического районирования территории по признакам параметров сейсмических колебаний, являющегося основой обнаружения и прогноза катастрофических природно-техногенных процессов. Способ регистрации слабых землетрясений не позволяет набрать статистически надежный набор данных в сжатые сроки. В связи с этим в работах В.Б. 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 связи с различной ориентацией плоскости разлома и разным удалением 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. Для решения задачи исследования слоистости среды и установления параметров пространственного распределения на основе базы данных сейморазведочных работ, проведенных ГФИ ВНЦ 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 непревышения, 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, формирующих геоэкологический риск территории, в ГИС-технологиях.

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 геэкологический риск. При этом поправки к значениям сейсмической интенсивности рассчитывались в форме доверительных интервалов.

8. Разработаны практические Рекомендации по сейсмическому микрорайонированию на основе инструментальной меры сейсмической интенсивности и учета геэкологических процессов.

9. Результаты работы могут быть использованы в научно-практических исследованиях при геэкологическом районировании территории, создании учебных пособий и в преподавательской деятельности, а также в деятельности государственных ведомств, а именно в Министерстве природных ресурсов и экологии и Министерстве строительства и архитектуры РСО-А и аналогичных структур РФ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аптикаев Ф.Ф. О вероятности превышения воздействий в строительных нормах / Ф.Ф. Аптикаев // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. – № 3. – С. 55–62. – DOI: 10.46698/VNC.2021.11.83.005.
2. Аптикаев Ф.Ф. Российская сейсмическая шкала нового поколения / Ф.Ф. Аптикаев, О.О. Эртелева // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2016. – Т. 43. – № 2. – С. 43–52.
3. Аптикаев Ф.Ф. Уточнение корреляций между уровнем макросейсмического эффекта и динамическими параметрами движения грунта / Ф.Ф. Аптикаев, Н.В. Шебалин // Вопросы инженерной сейсмологии. – 1988. – Вып. 29. – С. 98–108.
4. Аптикаев Ф.Ф. Учет длительности колебаний при инструментальной оценке сейсмической интенсивности / Ф.Ф. Аптикаев // Сейсмическая шкала и методы измерения сейсмической интенсивности. – Москва: Наука, – 1975. С. 234–239.
5. Блюм А.В. Природные и техногенные катастрофы: история, физика, информационные технологии в прогнозировании ЧС / А.В. Блюм, А.А. Дик, В.М. Дмитриев, Ж.Е. Зимнухова, В.Н. Макарова. – Тамбов: ТГТУ, – 2015. 78 с.
6. Бурдун Г.Д. Основы метрологии / Г.Д. Бурдун, Б.Н. Марков. – Москва: Издательство стандартов. – Издание второе, дополненное. – 1975. 336 с.
7. Вапник В.Н. Теория распознавания образов (статистические проблемы обучения) / В.Н. Вапник, А.Я. Червоненкис. – Москва: Наука, 1974. – 416 с.
8. Габеева И.Л. Механизмы формирования интенсивности землетрясений в горных районах / И.Л. Габеева, О.Г. Бурдзиева // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2008. – № 3. – С. 53–56.

9. Горяинов Н.И. Сейсмические методы в инженерной геологии / Н.И. Горяинов, Ф.М. Ляховицкий. – Москва: Недра, – 1979. 144 с.
10. ГОСТ Р 57546-2017 "Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности" (утв. и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 19 июля 2017 г. N 721-ст). – Москва: Стандартинформ, 2017. – 32 с.
11. Ершов И.А. Проблема конструкции шкалы интенсивности землетрясений с позиций сейсмологов / И.А. Ершов, Н.В. Шебалин // Вопросы инженерной сейсмологии. –1984. – Вып. 25. – С. 78–95.
12. Заалишвили В.Б. Анализ параметров для разработки инструментальной меры сейсмической интенсивности: коллективная монография / В.Б. Заалишвили, Д.А. Мельков, М.И. Фидарова, К.С. Харебов // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа (ГЕОКАВКАЗ 2022). – Том XIII. – Москва: ИИЕТ РАН, – 2022д. – С. 255–260.
13. Заалишвили В.Б. Взаимосвязь величины макросейсмической интенсивности с показателями инструментальных записей Губанского землетрясения 2000 г. и Тбилисских землетрясений 2002 г. / В.Б. Заалишвили, Д.А. Мельков, М.И. Фидарова // Геология и геофизика Юга России. – 2022а. – Т. 12. – № 1. – С. 89–108. DOI: 10.46698/VNC.2022.74.23.007.
14. Заалишвили В.Б. Влияние геодинамических процессов на геоэкологическое состояние высокогорных территорий (на примере туристско-рекреационного комплекса «Мамисон» в Северной Осетии): монография / В.Б. Заалишвили, Х.О. Чотчаев. – Владикавказ: ГФИ ВНЦ РАН, 2022. – 263 с.
15. Заалишвили В.Б. Геоэкологические аспекты формирования интенсивности землетрясения на основе изучения инструментальных данных / В.Б. Заалишвили, Д.А. Мельков, М.И. Фидарова, Г.В. Шманатов // Геология и геофизика Юга России. – 2024в. – Т. 14. – № 2. – С. 45–60.

16. Заалишвили В.Б. Инженерное макросейсмическое обследование эпицентральной зоны землетрясения 14 декабря 2000 г. / В.Б. Заалишвили, А.В. Одишария, И.Э. Тимченко, М.Г. Отинашвили, С.А. Гогмачадзе, З.В. Заалишвили // Теория сооружений и сейсмостойкость. – 2001. – № 2. – С. 51–59.

17. Заалишвили В.Б. Инженерное макросейсмическое обследование эпицентральной зоны землетрясения 14 декабря 2000 г. / В.Б. Заалишвили, А.В. Одишария, И.Э. Тимченко, М.Г. Отинашвили, С.А. Гогмачадзе, З.В. Заалишвили // Геология и Геофизика Юга России. – 2014. – Т. 4. – № 1. С. 30–38 .

18. Заалишвили В.Б. Инструментальная мера сейсмической интенсивности по данным сети K-NET / В.Б. Заалишвили, Д.А. Мельков, М.И. Фидарова, К.С. Харебов // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022б. – Т. 14. – № 2 (52). – С. 331–340.

19. Заалишвили В.Б. Инструментальный метод сейсмического микрорайонирования: научная монография / В.Б. Заалишвили. – Владикавказ: Изд-ие гос. научн. центра РСО-А, 1997. – 76 с.

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

21. Заалишвили В.Б. К вопросу пересчета сейсмической интенсивности шкалы Японского метеорологического агентства (JMA) в макросейсмическую шкалу MSK / В.Б. Заалишвили, Д.А. Мельков, М.И. Фидарова, К.С. Харебов // Геология и геофизика Юга России. – 2024а. – Т. 14. – № 1. – С. 19–35.

22. Заалишвили В.Б. К вопросу установления взаимосвязей протекания явлений на атомно-молекулярном и макроуровне: коллективная монография / В.Б. Заалишвили, Т.Т. Магкоев, Г.Э. Туаев, Д.К. Карапетя., И.Г. Архиреева, М.И. Фидарова (Читишвили) // Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии. Под редакцией А.В. Николаева, В.Б. Заалишвили. – Владикавказ: ГФИ ВНЦ РАН, 2019б. – С. 384–392.

23. Заалишвили В.Б. Комплекс вычислительных программ «НСВ-2» для обработки инструментальных записей природных и техногенных катастроф / В.Б. Заалишвили, А.К. Харебов, К.С. Харебов // Труды Международной конференции «Информационные технологии и системы: наука и практика». – Владикавказ, 2002. – С. 399–401.

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

25. Заалишвили В.Б. Нелинейные эффекты в геологических объектах по данным математического моделирования: коллективная монография / В.Б. Заалишвили, Д.А. Мельков, А.Ф. Габараев, Т.И. Мерзликин, М.И. Фидарова // Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии. Научный редактор В.Б. Заалишвили. – Владикавказ: ГФИ ВНЦ РАН, – 2022г. – С. 329–336.

26. Заалишвили В.Б. Особенности динамического поведения грунтов при сейсмических воздействиях / В.Б. Заалишвили. – Тбилиси, 1995. – Деп.СИФ, Техинформ 20.08.95 г., No. 1030-95.

27. Заалишвили В.Б. Оценка сейсмической опасности (сейсмическое микрорайонирование) территорий городов и населенных пунктов Республики Северная Осетия–Алания (первый этап). 3.2. Сейсмическое

микрорайонирование территории центральной части г.Владикавказа: отчет о НИР / В.Б. Заалишвили, А.К. Джгмадзе, Д.А. Мельков, Х.О. Чотчаев, Б.В. Дзеранов и др. – Владикавказ: ГФЦЭД ВНИЦ РАН и РСО-А. – Том 3, Книга 1, Книга 3, Книга 4, Том 6. – 2007. 268 с.

28. Заалишвили В.Б. Сейсмический риск территории современного города / В.Б. Заалишвили, Д.А. Мельков, А.С. Кануков, И.Г. Архиреева, М.И. Фидарова: коллективная монография // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа (ГЕОКАВКАЗ 2021). – Москва: ИИЕТ РАН, – 2021. – С. 234–237.

29. Заалишвили В.Б. Сейсмическое микрорайонирование по данным искусственного возбуждения колебаний грунтовой толщи: автореф. дис. ...канд. физ.-мат. наук: 04.00.22 / Заалишвили Владислав Борисович. – Тбилиси, 1986. – 21 с.

30. Заалишвили В.Б. Сейсмическое микрорайонирование правобережной и левобережной части г.Владикавказа (полевые исследования): отчет о НИР / В.Б. Заалишвили, Д.А. Мельков, Х.О. Чотчаев, А.С. Кануков и др. – Владикавказ: ЦГИ ВНИЦ РАН и РСО-А. – Том 3, Книга 3. – 2010. 327 с.

31. Заалишвили В.Б. Способ сейсмического микрорайонирования / В.Б. Заалишвили, Д.А. Мельков. – Патент Российской Федерации №2389044 от 10 мая 2010 г.

32. Заалишвили В.Б. Сравнение применения регрессионного анализа и нейронных сетей для прогноза сейсмических воздействий в сборнике: современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа / В.Б. Заалишвили, Д.А. Мельков, М.И. Фидарова // В книге: Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа в 2-ух частях. – Том X. Грозный: Формат, – 2020. – С. 110–115.

33. Заалишвили В.Б. Статистические характеристики расчета приращений сейсмической интенсивности при сейсмическом микрорайонировании / В.Б. Заалишвили, Д.А. Камболов, Д.А. Мельков, М.И.

Фидарова // Устойчивое развитие горных территорий. – 2024б. – Т.16. – № 1 (59). – С. 345–357.

34. Заалишвили В.Б. Статистический анализ параметров базы данных сильных грунтовых движений / В.Б. Заалишвили, К.С. Харебов, А.К. Харебов // Геология и геофизика Юга России. – 2013. – № 4. – С. 17–22.

35. Заалишвили В.Б. Уточнение сейсмическими методами неупругих деформационных свойств грунтов в натуральных условиях на площадке проектируемой Нововоронежской АЭС-2: отчет о НИР / Заалишвили В.Б., Тимошук Е.П., Куранова О.И. и др. – Москва: АО ИСГИ. Фонды института «Атомэнергопроект», 1996.

36. Заалишвили В.Б. Физические основы сейсмического микрорайонирования: монография / В.Б. Заалишвили. – Москва: ОИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН, 2000. – 367 с.

37. Исследование полей импульсных и вибрационных источников для целей сейсмического микрорайонирования: отчет о НИР / Заалишвили В.Б., Гогмачадзе С.А., Гулиташвили С.А. – Тбилиси: ИСМИС АН ГССР, 1989. – 127 с.

38. Материалы Тбилисского землетрясения 25 апреля 2002 года. Академия наук Грузии. – Тбилиси: Институт строительной механики и сейсмостойкости им. К.С. Завриева, 2005. – 268 с.

39. Мельков Д.А. Влияние нелинейных свойств среды на сейсмический эффект сильных землетрясений / Д.А. Мельков, А.Ф. Габараев, М.И. Фидарова, Т.И. Мерзликин, З.В. Персаева // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. – № 4. – С. 72–84.

40. Методическое руководство по сейсмическому микрорайонированию. – М.: Наука, 1988. – 280 с.

41. Напетваридзе Ш.Г. Некоторые задачи инженерной сейсмологии / Ш.Г. Напетваридзе. – Тбилиси: Мецниереба, 1973. – 162с.

42. Николаев А.В. Сейсмическая мутность реальных сред и возможность ее исследования / А.В. Николаев // Доклады академии наук СССР. – 1967. –

Т. 177. – № 5. – С.1071–1074.

43. Ньюмарк Н. Основы сейсмостойкого строительства / Н. Ньюмарк, Э. Розенблют. – М.: Госстройиздат, 1980. – 344 с.

44. Основы сейсмического микрорайонирования: учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлениям подготовки 130300 «Прикладная геология» и 130200 «Технология геологической разведки» по горно-геологическим специальностям / В.Б. Заалишвили. – Владикавказ: ВНЦ РАН и РСО-А, 2006. – 242 с.

45. Отчет о полевых испытаниях модернизированных источников СВ-10/100. – Гомель, 1985, – 46 с.

46. Отчет о сейсмическом микрорайонировании территории г. Владикавказа. – Пятигорск: ТИСИЗ, Машинопись, 1991. – 127 с.

47. Полтавцев С.И. Сейсмическая опасность и сейсмостойкое строительство в Российской Федерации. Сейсмическое районирование и сейсмостойкое строительство: монография / С.И. Полтавцев, Я.М. Айзенберг, Г.Л. Кофф, А.М. Мелентьев, В.И. Уломов, В.М. Горпинченко, А.А. Петров, В.И. Смирнов, А.В. Черкашин, Ю.И. Баулин, И.Г. Миндель, В.Б. Заалишвили, Р.М. Лабацкая, С.А. Несмеянов, В.Г. Гитис. – Москва: Минстрой РФ, 1998, – 350 с.

48. Поляков С.В. Последствия сильных землетрясений / С.В. Поляков. – М.: Стройиздат, 1978. – 311 с.

49. Попова Е.В. Остаточные сейсмодетекции в грунтах и возможность их прогнозирования / Е.В. Попова // Сейсмическое районирование. – 1977. – С. 114–121.

50. Рекомендации по сейсмическому микрорайонированию при инженерных изысканиях для строительства. – М.: Госстрой СССР, 1985. – 72 с.

51. Республиканские строительные нормы. Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Технические требования к производству работ. РСН 65-87. Госстрой РСФСР. – М.: МосЦТИСИЗ

Госстроя РСФСР, 1987. – 26 с.

52. Республиканские строительные нормы. Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Нормы производства работ. РСН 60-86. Госстрой РСФСР. – М.: МосЦТИСИЗ Госстроя РСФСР, 1986. – 32 с.

53. Рихтер Ч.Ф. Элементарная сейсмология / Ч.Ф. Рихтер. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1963. – 670 с.

54. Руководство по безопасности. РБ-006-98. Определение исходных сейсмических колебаний грунта для проектных основ: нормативный документ. – М.: НТЦ ЯРБ, 2000. – 76 с.

55. Сейсмическое микрорайонирование территории Ordzhonikidze: отчет о НИР. – Тбилиси: Институт строительной механики и сейсмостойкости им. К. Завриева АН Грузии, Машинопись, 1970. – 182 с.

56. Сейсмическое микрорайонирование территорий городов, населенных пунктов и больших строительных площадок: учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлениям подготовки 130300 «Прикладная геология» и 130200 «Технология геологической разведки» по горно-геологическим специальностям / В.Б. Заалишвили. – М.: Наука, 2009. – 350 с.

57. Уздин А.М., Дмитровская Л.Н., Тумель И.А. К вопросу о концепции оценки интенсивности сейсмического воздействия / А.М. Уздин, Л.Н. Дмитровская, И.А. Тумель // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2008. – № 3. – С. 57–59.

58. Фидарова М.И. Связь величины макросейсмической интенсивности с различными показателями инструментальных записей колебаний грунтовой толщи / М.И. Фидарова, В.Б. Заалишвили, Д.А. Мельков // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. – № 1. – С. 59–75. – DOI: 10.46698/VNC.2023.17.83.005.

59. Фидарова М.И. Создание базы данных записей локальной городской сети сейсмологических наблюдений / М.И. Фидарова, Д.А. Мельков, З.В. Персаева // Материалы IX Международной научно-практической

конференции "Молодые ученые в решении актуальных проблем науки", 12–14 декабря 2019г., г.Владикавказ. – Владикавказ: Веста, 2019. – С. 277–281.

60. Фремд В.М. Инструментальное изучение сильных землетрясений / В.М. Фремд, В.В. Штейнберг // Вопросы инженерной сейсмологии. – 1973. – Вып.15. – С. 139–150.

61. Хачиян Э.Е. Прикладная сейсмология / Э.Е. Хачиян. – Ереван: Гитутюн, 2008. – 523 с.

62. Чернов Ю.К. Модели сильных движений грунта для вероятностного детального сейсмического районирования территории РСО-Алания. Часть I / Ю.К. Чернов, А.Ю. Чернов, М.И. Читишвили // Геология и геофизика Юга России. – 2019а. – Т. 9. – № 2. – С. 95–108.

63. Чернов Ю.К. Модели сильных движений грунта для вероятностного детального сейсмического районирования территории РСО-Алания. Часть 2 / Ю.К. Чернов, А.Ю. Чернов, М.И. Читишвили // Геология и геофизика Юга России. – 2019б. – Т. 9. – № 3. – С. 161–178.

64. Чотчаев Х.О. Сейсмическая обстановка на территории г. Алагир (Республика Северная Осетия-Алания) / Х.О. Чотчаев, А.М. Колесникова, М.И. Фидарова, С.А. Гогмачадзе // Устойчивое развитие горных территорий. – 2019. – Т. 11. – № 4 (42). – С. 505–518.

65. Шебалин Н.В. О неравномерности шкалы балльности / Н.В. Шебалин // Сейсмическая шкала и методы измерения сейсмической интенсивности. – 1975а. – С. 222–233.

66. Шебалин Н.В. Об оценке сейсмической интенсивности / Н.В. Шебалин // Сейсмическая шкала и методы оценки сейсмической интенсивности. – 1975б. – С. 87–109.

67. Akansel V. The 23 October 2011 Mw7.0 Van (Eastern Turkey) earthquake / V. Akansel, G. Ameri, A. Askan, A. Caner, B. Erdil, Ö. Kale, D. Okuyucu // Interpretations of recorded strong ground motions and post-earthquake conditions of nearby structures. – Earthq. Spectra. – 2014. – Vol. 30. – pp. 657–682.

68. Aki K. Scaling law of seismic spectrums / K. Aki // Journal of Geophysical Research. – 1967. – Vol. 73. – pp. 1217–1231.

69. Alvarez D.A. Prediction of modified Mercalli intensity from PGA, PGV, moment magnitude, and epicentral distance using several nonlinear statistical algorithms / D.A. Alvarez, J.E. Hurtado, D.A. Bedoya-Ruíz // Journal of Seismology. – 2012. – Vol. 16. – 489–511.

70. Ambraseis N.N. Dynamics and Response of foundation materials in epicentral regions of strong earthquakes / N.N. Ambraseis // Proceedings 5-th World Conference Earthquake Engineering, Rome, 1973. – pp. 115–119.

71. Ambraseys N.N. Notes on historical seismicity / N.N. Ambraseys, E. Banda, J. Irving, D. Mallard, C.P. Melville, T. Morse, W.R. Muir, D. Munoz, L. Serva, D. Shilston, E. Surinach, J. Vogt // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1983. – Vol. 73. – pp. 1917–1920.

72. Androutselis T. Real-Time Seismic Damage Assessment of Various Bridge Types Using a Nonlinear Three-Stage Least Squares Approach / T. Androutselis, M.T. Sarwar, U. Eker, P.C. Anastasopoulos, L. Sakellariadis, A. Agalianos, I. Anastasopoulos // Journal of Infrastructure Systems. – 2020. – Vol. 26. – Issue 3. – DOI: 10.1061/(asce)is.1943-555x.0000551.

73. Ang A.H.-S. Reliability bases for seismic safety assessment and design / A.H.-S. Ang // Proceedings 4th U.S. National Conf. Earth Eng., EERI, Palm Spring. – 1990. – Vol. 1. – pp. 29–45.

74. Aptikaev F.F. A New Generation Russian Seismic Scale / F.F. Aptikaev, O.O. Erteleva // Seismic Instruments. – 2017. – Vol. 53. – Issue 2. – pp. 146–154. DOI: 10.3103/s0747923917020025.

75. Aptikaev F.F. Correlation between the Points of Different Seismic Intensity Scales / F.F. Aptikaev, O.O. Erteleva, G.M. Tokmulina // Seismic Instruments. – 2021. – Vol. 57. Issue 1. – pp. 75–87. DOI: 10.3103/s0747923921010035.

76. Arias A.A. A measure of earthquake intensity, in *Seismic Design for Nuclear Power Plants* / A.A. Arias; editor R.J. Hansen. – Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1970. – pp. 438–483.

77. Barnhar T.P. The usefulness of ground duration in predicting the severity of seismic shaking / T.P. Barnhar, K.Mc Guire Robin // *Proceedings 2nd, U.S. National Conference on Earthquake Engineering*. – California: Stanford, 1979. – pp. 713–722.

78. Barosh P.J. Use of seismic intensity data to predict the effects of earthquakes and underground nuclear explosions in various geologic settings / P.J. Barosh // *Geological Survey Bulletin*. – 1969. – Issue 1279. – 93 p.

79. Bekkerman R. Distributional word clusters vs. words for text categorization / R. Bekkerman, R. El-Yaniv, N. Tishby, Y. Winter // *Journal of Machine Learning Research*. – 2003. – Vol 3. – pp. 1183–1208.

80. Bender B. Incorporating acceleration variability into Seismic Hazard Analysis / B. Bender // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1984. – Vol. 74. – No. 4. – pp. 1451–1462.

81. Beresnev I.A. FINSIM – a FORTRAN Program for Simulating Stochastic Acceleration Time Histories from Finite Faults / I.A. Beresnev, G.M. Atkinson // *Seismological Research Letters*. – 1998. – Vol. 69. Issue 1. pp. 27–32. DOI: 10.1785/gssrl.69.1.27.

82. Bermingham M.L. Application of high-dimensional feature selection: evaluation for genomic prediction in man / M.L. Bermingham, R. Pong-Wong, A. Spiliopoulou, C. Hayward, I. Rudan, H. Campbell, A.F. Wright, J.F. Wilson, F. Agakov, P. Navarro, C.S. Haley // *Scientific Reports*. – 2015. – Vol. 5. – DOI: 10.1038/srep10312.

83. Bilal M. Relationships between felt intensity and recorded ground-motion parameters for Turkey / M. Bilal, A. Askan // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 2014. – Vol. 104. – pp. 484–496.

84. Boser B.E. A Training Algorithm for Optimal Margin Classifiers / B.E. Boser, I.M. Guyon, V.N. Vapnik // Proceedings of the 5th Annual Workshop on Computational Learning Theory (COLT'92), Pittsburgh, 1992, – pp. 144–152
85. Brown G. Conditional Likelihood Maximisation: A Unifying Framework for Information Theoretic Feature Selection / G. Brown, A. Pockock, M.-J. Zhao, M. Luján // Journal of Machine Learning Research. – 2012. – Vol. 13. – pp. 27-66.
86. Campbell K.W. Empirical analysis of strong ground motion from the 1992 Landers, California, earthquake / K.W. Campbell, Y. Bozorgnia // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1994. – Vol. 84. – No. 3. – pp. 573–588.
87. Caprio M. Ground motion to intensity conversion equations (GMICEs): A global relationship and evaluation of regional dependency / M. Caprio, B. Tarigan, C.B. Worden, S. Wiemer, D.J. Wald // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2015. – Vol. 105. – pp. 1476–1490.
88. Caruana R. Benefitting from the variables that variable selection discards / R. Caruana, V. de Sa. // Journal of Machine Learning Research. – 2003. – Vol. 3. – pp. 1245–1264.
89. Castellany A. Research Activity on Design Response Spectra for Italian Sites / A. Castellany, V. Petrini // Proceedings 5-th World Conference on Earthquake Engineering, Rome, 1973. – pp. 1210–1213.
90. Chernov Yu.K. Correlation of seismic intensity with Fourier acceleration spectra / Yu.K. Chernov, V.Yu. Sokolov // Physics and Chemistry of the Earth. – 1999. – Vol. 24. – Issue 6. – pp. 523–528.
91. Chiauzzi L. Building damage scenarios based on exploitation of Housner intensity derived from finite faults ground motion simulations / L. Chiauzzi, A. Masi, M. Mucciarelli, M. Vona, F. Pacor, G. Cultrera, A. Emolo // Bulletin of the Earthquake Engineering. – 2012. – Vol. 10. – pp. 517–545.
92. Constantin A.P. Correlations between macroseismic intensity values and ground motion measures of Vrancea (Romania) subcrustal earthquakes / A.P. Constantin, I.A. Moldovan, R. Partheniu, B. Grecu, C. Ionescu // Romanian Journal of Physics. – 2021. – Vol. 66. – Nos. 5-6. – Article 808.

93. Dibike Y.B. Model induction with support 528 vector machines: Introduction and applications / Y.B. Dibike, S. Velickov, D. Solomatine, M.B. Abbott // *Journal of Computing in Civil Engineering*. – 2001. – Vol. 15. – No. 3. – pp. 208–216.
94. Drucker H. Support vector regression machines. / H. Drucker, C.J.C. Burges, L. Kaufman, A. Smola, V. Vapnik // *Advances in Neural Information Processing Systems* 9. – 1997. – pp. 155–161.
95. Du K. Relationship between peak ground acceleration, peak ground velocity, and macroseismic intensity in western China / K. Du, B. Ding, H. Luo, J. Sun // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 2018. – Vol. 109. – No. 1. – pp. 284–297.
96. European Macroseismic Scale 1998 EMS-98: book / editor G. Grunthal. – Luxembourg: 1998 Cahiers du Centre Europeen de Geodynamique et de Seismologie. Conseil de l'Europe, 1998. – Vol. 15. – 99 p.
97. Evernden, J.F. Interpretation of seismic intensity data / J.F. Evernden, R.R. Hibbard, J. F. Schneider // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1973. – Vol. 63. – pp. 399–422.
98. Faenza L. Regression analysis of MCS intensity and ground motion parameters in Italy and its application in ShakeMap / L. Faenza, A. Michelini // *Geophysical Journal International*. – 2010. – Vol. 180. – No. 3. – pp. 1138–1152.
99. Fajfar P. Elastic and Inelastic Design Spectra / P. Fajfar // *Proceedings 10-th European Conference on Earthquake Engineering, Vienna*, – 1995. – Vol.2. – pp. 1169–1178.
100. Finn Liam W.D. Effect of Site Conditions of Ground Motions: abstract / W.D. Finn Liam, S. Iai, Y. Matsunavga // *Proceedings 10-th European Conference on Earthquake Engineering, Vienna, 1994*. – Vol. 2.
101. Foody G.M. A Relative Evaluation of Multiclass Image Classification by Support Vector Machines / G.M. Foody, A. Mathur // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2004 – Vol. 42. – pp. 1335–1343. DOI: 10.1109/TGRS.2004.827257.

102. Forman G. An extensive empirical study of feature selection metrics for text classification / G. Forman // *Journal of Machine Learning Research*. – 2003. – Vol. 3. – pp. 1289–1306.

103. Fukushima I. A new attenuation relation for Peak Horizontal Acceleration of Strong Earthquake Ground Motion in Japan / I. Fukushima, T. Tanaka // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1990. – Vol. 80. – No. 4. – pp. 757–783.

104. Furey T.S. Support vector machine classification and validation of cancer tissue samples using microarray expression data / T.S. Furey, N. Cristianini, N. Duffy, D.W. Bednarski, M. Schummer, D. Haussler // *Bioinformatics*. – 2000. – Vol. 16. – No. 10. – pp. 906–914.

105. Gabrichidze G. April 2002 epicentral earthquake in Tbilisi, Georgia / G. Gabrichidze, G. Lomidze, T. Mukhadze, A. Odisharia, I. Timchenko // *13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada. August 1-6, 2004*. – Paper No. 1063. – 15 p.

106. Gutenberg B. Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration / B. Gutenberg, C.F. Richter // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1942. – Vol. 32. – No. 3. – pp. 163–191.

107. Gutenberg B. Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration / B. Gutenberg, C.F. Richter // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1956. – Vol. 46. – pp. – 105–145.

108. Guyon I. An Introduction to Variable and Feature Selection / I. Guyon, A. Elisseeff // *Journal of Machine Learning Research*. – 2003. – Vol. 3. pp. 1157–1182.

109. Hastie T. *The Elements of Statistical Learning: book* / T. Hastie, R. Tibshirani, J. Friedman. – New York: Springer, 2009. – 745 p. – DOI: 10.1007/978-0-387-84858-7.

110. Hirono T. MSK Intensity Scale as Compared with JMA Intensity Scale / T. Hirono, K. Sato // *Papers in Meteorology and Geophysics*. – 1971. – Vol. 22. – pp. 177–193. – DOI: 10.2467/mripapers1950.22.3-4_177.

111. Housner G.W. Behavior of structures during earthquakes / G.W. Housner // *Journal of the Engineering Mechanics Division*. – 1959. – Vol. 85. – No. SM4. – pp. 109–129.
112. Housner G.W. Spectrum analysis of strong-motion earthquakes / G.W. Housner, R. Martel, L. Alford // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1953. – Vol. 43. – pp. 97–119.
113. Idriss I.M. An Analysis of Ground Motions During the 1957 San Francisco Earthquake / I.M. Idriss, H.B. Seed // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1968. – 58. – pp. 2013–2032.
114. Javahishvili Z. The Tbilisi earthquake of April 25, 2002 in the context of the seismic hazard of the Tbilisi urban area / Z. Javakhishvili, T. Godoladze, M. Elashvili, T. Mukhadze, I. Timchenko // *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*. – 2004. – Vol. 45. – No. 3. – pp. 169–185.
115. Kaka S.I. Relationships between instrumental ground-motion parameters and modified Mercalli intensity in eastern North / S.I. Kaka, G.M. Atkinson // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 2004. – Vol. 94. – pp. 1728–1736.
116. Karim K.R. Correlation of JMA instrumental seismic intensity with strong motion parameters / K.R. Karim, F. Yamazaki // *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. – 2002. – Vol. 31. – No. 5. – 1191–1212. – DOI: 10.1002/eqe.
117. Karimzadeh S. Collection of microseismic intensity data: a model for Turkey / S. Karimzadeh, A. Askan // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2021. – Vol. 14. – No. 5. – Article 396. DOI: 10.1007/s12517-021-06812-1.
118. Kawasumi H. Intensity and intensity scale / H. Kawasumi // *Zisin (Journal of the Seismological Society of Japan)*. – 1943. – Vol. 15. – pp. 6–12.
119. Kawasumi H. Measures of earthquake danger and expectancy of maximum intensity throughout Japan as inferred from the seismic activity in historical times / H. Kawasumi // *Bulletin of the Earthquake Research Institute*. – 1951. – Vol. 29. – pp. 469–482.

120. Kharebov K.S. Influence of soils on impact parameters of seismic effect / K.S. Kharebov, V.B. Zaalishvili, T.V. Zaks, A.N. Baskaev, I.G. Arkhireeva, R.R. Gogichev, M.V. Maisuradze, M.I. Chitishvili // Proceedings of the VIII Science and Technology Conference "Contemporary Issues of Geology, Geophysics and Geo-ecology of the North Caucasus" (CIGGG 2018). Ser. "Advances in Engineering Research", 2019. – pp. 164–168.

121. Kinoshita S. Kyoshin Net (K-NET) / S. Kinoshita; eds. W.H.K. Lee, H. Kanamori, P.C. Jennings, C. Kisslinger. – Amsterdam: Academic Press. International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology. – 2003. – Part B. – pp. 1049–1056.

122. Kiremidjian A. Probabilistic Site-Dependent Response Spectra / Kiremidjian A., Shah H.C. // Structural Division Proceedings of Society Civil Engineering. – 1980. – Vol. 106. – No. 1. – pp. 69–86.

123. Klugel J.-U. Problems in the application of the SSHAC probability method for assessing earthquake hazards at Swiss nuclear power plants / J.-U. Klugel // Engineering Geology. – 2005. – Vol. 78. – Issue 3-4. – pp. 285–307. DOI: 10.1016/j.enggeo.2005.01.007.

124. Kramer S.L. Geotechnical Earthquake Engineering: book / S.L. Kramer. – USA: Prentice Hall, 1996. – pp. 65–84.

125. Kudo K. Topics of Effects of Surface Geology on Strong-Ground Motion from the Recent Earthquakes in Japan and the activity of Japanes Working Group on Effects on Surface Geology / K. Kudo // Proceedings 10-th European Conference on Earthquake Engineering, Vienna. – 1995. – Vol. 4. – pp. 2635–2641.

126. Masi A. Correlations between macroseismic intensity estimations and ground motion measures of seismic events / A. Masi, L. Chiauzzi, G. Nicodemo, V. Manfredi // Bulletin of Earthquake Engineering. – 2020. – Vol. 18. – pp. 1899–1932. – DOI: 10.1007/s10518-019-00782-2.

127. McCann M.W. A technical note on PGA-intensity relations with applications to damage estimation / M.W. McCann, F. Sauter, H.C. Shah //

Bulletin of the Seismological Society of America. – 1980. – Vol. 70. – Issue 2. – pp. 631–637.

128. Moinfar A.A. Strong Motion Characteristics and Acceleration Distribution During the Manjil, IRAN Earthquake of 20 June 1990 / A.A. Moinfar, A. Nadersadeh // Proceedings 10-th European Conference on Earthquake Engineering, Vienna, 1994. – Vol. 1.

129. Murphy J. Analysis of a worldwide strong motion data sample of develop and improved correlation between peak acceleration, seismic intensity and other physical parameters / J. Murphy, L. O'Brien // Technical Report, US Nuclear Regul. Gomm.USA, – 1977. 73 p.

130. Musson R.M.W. The comparison of macroseismic intensity scales / R.M.W. Musson, G. Grünthal, M. Stucchi // Journal of Seismology. – 2009. – Vol. 14. – pp. 413–428.

131. Muzaev I.D. Mathematical modeling of seismic vibrations of system: tailings dam and soil foundations / I.D. Muzaev, K.S. Kharebov, N.I. Muzaev, E.N. Kozyrev, V.D. Makiev, A.F. Gabaraev, F.S. Morozov, M.I. Chitishvili // Proceedings of the VIII Science and Technology Conference "Contemporary Issues of Geology, Geophysics and Geo-ecology of the North Caucasus" (CIGGG 2018). Ser. "Advances in Engineering Research", 2019. – pp. 206–210.

132. 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.

133. Ohtahi K. The Relation Between The Buildings Damages and the Vibration Properties of Ground (in the case of Spitak Earthquake) / K. Ohtahi, H. Kobayashi // Nist Special Publication. – 1990, – No. 796. – pp. 234–252.

134. Omote S. Considerations on Earthquake Force Evaluation / Omote S., Yoshimura K. // Proceedings 5-th World Conference Earthquake Engineering, Rome, 1973. – pp. 1688–1691.

135. Panza G.F. Correlation between macroseismic intensities and seismic ground motion parameters / G.F. Panza, R. Cazzaro, F. Vaccari // *Annali di Geophysica*. – 1997. – Vol. 40. – No. 5. – pp. 1371–1382.

136. Rathje E.M. Simplified frequency content estimates of earthquake ground motions / E.M. Rathje, N.A. Abrahamson, J.D. Bray // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. – 1998. – Vol. 124. – pp. 150–159.

137. Reed J.W. A criterion for determining exceedance of the operating basis earthquake / J.W. Reed // *Nuclear Engineering and Design*. – 1990. – Vol. 123. – Issue 2. – pp. 387–396. DOI: 10.1016/0029-5493(90)90259-Z.

138. Reiter L. *Earthquake Hazard Analysis: book* / L. Reiter. – New York: Columbia University Press, – 1991. 245 p.

139. Richter C.F. *Elementary seismology: book* / C.F. Richter. – San Francisco: W.H. Freeman and Co., 1958. – 768 p.

140. Seed H.B. The Mexico Earthquake of September 19, 1985 – Relationships Between Soil Conditions and Earthquake Ground Motion / H.B. Seed, M.P. Romo, J.I. Sun, A. Jaime, J. Lysmer // *Earthquake Spectra*. – 1988. – Vol. 4. – Issue 4. – pp. 687–789.

141. Shabestani T.K. A proposal of instrumental seismic intensity scale compatible with the MMI evaluated from three-component acceleration records / T.K. Shabestani, F. Yamazaki // *Earthquake Spectra*. – 2001. – Vol. 17. – Issue 4. – pp. 711–723.

142. Shabestari K.T. Proposal of instrumental seismic intensity scale compatible with MMI evaluated from three-component acceleration records / T.K. Shabestani, F. Yamazaki // *Earthquake Spectra*. – 2019. – Vol. 17. – Issue 4. – pp. 711–723.

143. Silva P.G. ESI-07 ShakeMaps for instrumental and historical events in the Betic Cordillera (SE Spain): An approach based on geological data and applied to seismic hazard / P.G. Silva, J. Elez, J.L. Giner-Robles, M.A. Rodriguez-Pascua, R. Perez-Lopez, E. Roquero, A. Martinez-Grana // *Quaternary International*. – 2017. – Vol. 451. – pp. 185–208.

144. Smola A.J. A Tutorial on Support Vector Regression / A.J. Smola, B. Schölkopf // *Statistics and Computing*. – 2004. – Vol. 14. – Issue 3. – pp. 199–222.
145. Smola A.J. Regression estimation with support vector learning machines / A.J. Smola. – Diplomarbeit, Technische Universität München, – 1996. 79 p.
146. Sokolov V. Comparative Analysis of two methods for instrumental intensity estimations using the database accumulated during recent large earthquakes in Japan / V. Sokolov, T. Furumura // *Earthquake Spectra*. – 2008. – Vol. 24. – Issue 2. – pp. 513. – DOI: 10.1193/1.2923918.
147. Sokolov V. Three techniques for estimation of Instrumental Intensity: a comparison / V. Sokolov // *Proceedings of the 2013 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM13)*, 8-12 September 2013, Jeju, Korea, – 2013 – pp. 574–591.
148. Sun B.T. The development of macroseismic intensity and the evolution of its use / B.T. Sun, J.Q. Yan, S.Y. Li // *Earthquake Engineering and Engineering Dynamic*. – 2019. Vol. 39. pp. 1–8.
149. Tao D. Support Vector Regression for the Relationships between Ground Motion Parameters and Macroseismic Intensity in the Sichuan–Yunnan Region/ D. Tao, Q. Ma, S. Li, Z. Xie, D. Lin, S. Li // *Applied Sciences*. – 2020. – Vol. 10. – Issue 9. – DOI: 10.3390/app10093086.
150. Tocher D. A Comparizon of the Spectra of Small and Moderato Earthquakes / D. Tocher, M.A. Bakun // *Proceedings 5-th World Conference Earthquake Engineering, Rome, 1973*. – pp. 1294–1297.
151. Tocher D. Earthquake Energy and Cround Breakage / D. Tocher // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1958. – Vol. 48. – pp. 147–153.
152. Tong H. A relationship between seismic ground motion severity and house damage ratio / H. Tong, F. Yamazaki // *Proceedings 4th U.S. Conference on Lifeline Earthquake Engineering, San Francisco, 10–12 August 1995*.
153. Trifunac M.D. characterization of response spectra by parameters governing. The cross nanure of earthquake source mechanisms / M.D. Trifunac //

Proceedings 5-th World Conference Earthquake Engineering, Rome, 1973. – pp. 1688–1691.

154. Trifunac M.D. On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of recorded strong ground motion / M.D. Trifunac, A.G. Brady // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1975. – Vol. 65. – pp. 139–162.

155. Tselentis G.A. Empirical relationships between modified Mercalli intensity and engineering ground-motion parameters in Greece / G.A. Tselentis, L. Danciu // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 2008. – Vol. 98. – pp. 1863–1875.

156. Vapnik V. *The Nature of Statistical Learning Theory: book* / V. Vapnik. – New York: Verlag, 1995. – 189 p.

157. Wald D.J. Relationships between peak ground acceleration, peak ground velocity, and modified Mercalli intensity in California / D.J. Wald, V. Quitoriano, T.H. Heaton, H. Kanamori // *Earthquake Spectra*. – 1999. – Vol. 15. – pp. 557–564.

158. Wang Y.S. A new instrumental measure of epicentral shaking intensity in Western China / Y.S. Wang, X.J. Li, Z.H. Zhou // *Bulletin of Earthquake Engineering*. – 2013. – Vol. 11. – Issue 4. – pp. 913–924. DOI: 10.1007/s10518-013-9428-5.

159. Wei Li. *Computational Research on Seismic Intensity Based on Ground Motion Parameters* / Wei Li, Shanyou Li, Liang Li, and Jinglong Han // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vols 838-841. – pp. 1595–1599.

160. Weston J. Use of the zero norm with linear models and kernel methods / J. Weston, A. Elisseeff, B. Schoelkopf, M. Tipping // *Journal of Machine Learning Research*. – 2003. – Vol. 3. – pp. 1439–1461.

161. Wong H.L. *Generation of Artificial Strong Motion Accelerograms* / H.L. Wong, M.D. Trifunac // *Earthquake Engineering Structure Dynamic*. – 1979. – Vol. 7. – pp. 509–527.

162. Worden C.B. Probabilistic relationships between ground-motion parameters and modified Mercalli intensity in California / C.B. Worden, M.C.

Gerstenberger, D.A. Rhoades, D.J. Wald // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2012. – Vol. 102. – pp. 204–221.

163. Wu Y.M. Relationship between peak ground acceleration, peak ground velocity, and intensity in Taiwan / Y.M. Wu, T.L. Teng, T.C. Shin, N.C. Hsiao // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2003. – Vol. 93. – pp. 386–396.

164. Yamazaki F. Developments of early earthquake damage assessment systems in Japan / F. Yamazaki, S. Noda, K. Meguro // Proceedings of 7th International Conference on Structural Safety and Reliability. (ICOSSAR '97). Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 1998. – pp. 1573 – 1580.

165. Yazgan U. Empirical seismic fragility assessment with explicit modeling of spatial ground motion variability / U. Yazgan // Engineering Structures. – 2015. – Vol. 100. – pp. 479–489. – DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.06.027.

166. Yodgorov Sh.I. Geoinformational basis of estimation of the modern status of geocological factor of seismic risk in the territory of Bukhara / Sh.I. Yodgor // International Journal of Geology, Earth & Environmental Sciences. – 2018. – Vol. 8. – Issue 2. – pp. 36–43.

167. Zaalishvili V.B. GIS simulation of the geological objects soil conditions: strong motion banks and databases / V.B. Zaalishvili, A.S. Kanukov, D.A. Melkov, K.S. Kharebov, M.I. Fidarova // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019. Ser. "Advances in Intelligent Systems and Computing", 2021b. – pp. 492–501.

168. Zaalishvili V.B. GIS-technologies in geophysical information databases processing / V.B. Zaalishvili, A.S. Kanukov, M.I. Fidarova // IOP Conference Series. (CATPID-2020). – 2020b.

169. Zaalishvili V.B. Issues of seismic risk assessment of Vladikavkaz city / V.B. Zaalishvili, A. Pinar, M. Erdik, O.G. Burdzieva, D.A. Melkov // Geology and Geophysics of Russian South. – 2020a. – Vol. 10 – No. 3. – pp. 94–113. – DOI: 10.46698/VNC.2020.47.51.006.

170. Zaalishvili V.B. Seismic microzoning of the town territory / V.B. Zaalishvili // Proceedings 2th Russian-Chines Regional Seminar on Earthquake Engineering. – 1992. – pp. 58–64.

171. Zaalishvili V.B. Vladikavkaz city seismological network database / V.B. Zaalishvili, D.A. Melkov, A.S. Kanukov, M.I. Fidarova, Z.V. Persaeva // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019. Ser. "Advances in Intelligent Systems and Computing", 2021a. – pp. 57–63.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

**РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ УЧАСТКОВ ТЕРРИТОРИИ
Г.ВЛАДИКАВКАЗА**

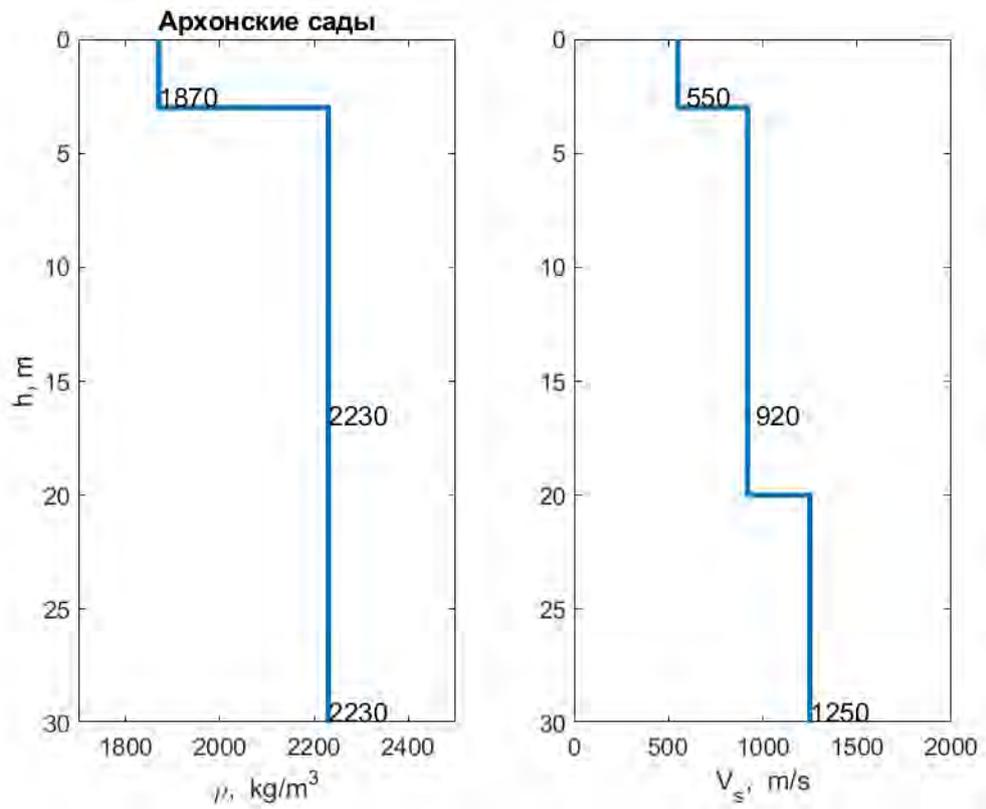


Рисунок П1.1. Модель грунта участка Архонские сады

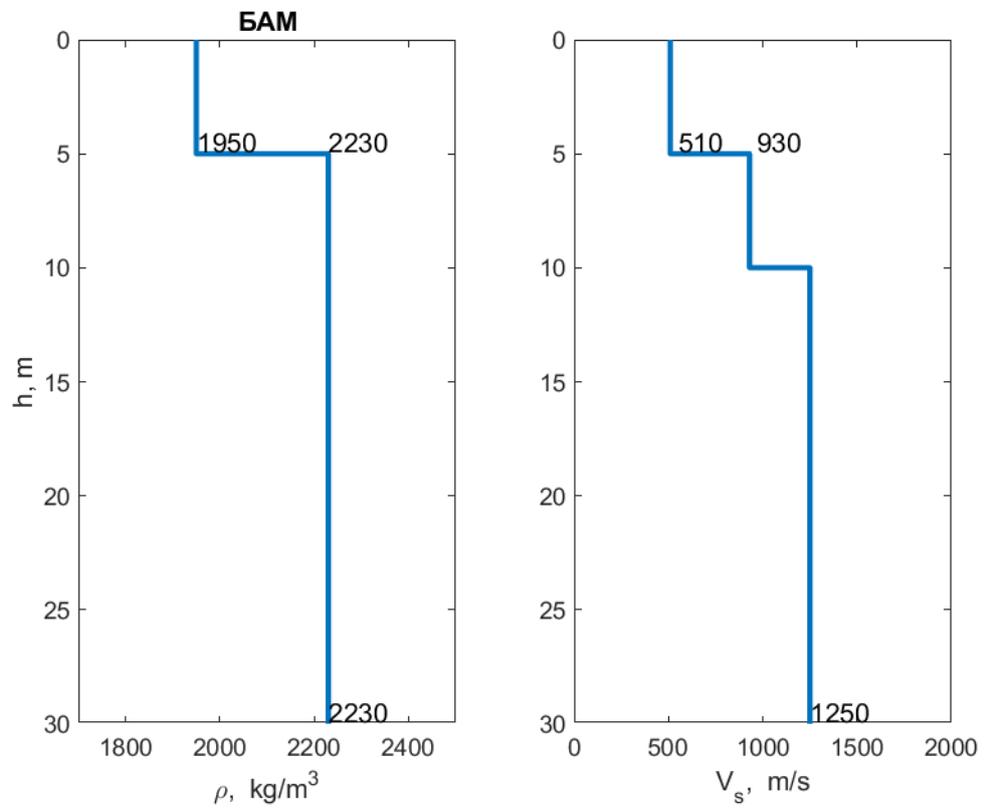


Рисунок П1.2. Модель грунта участка БАМ

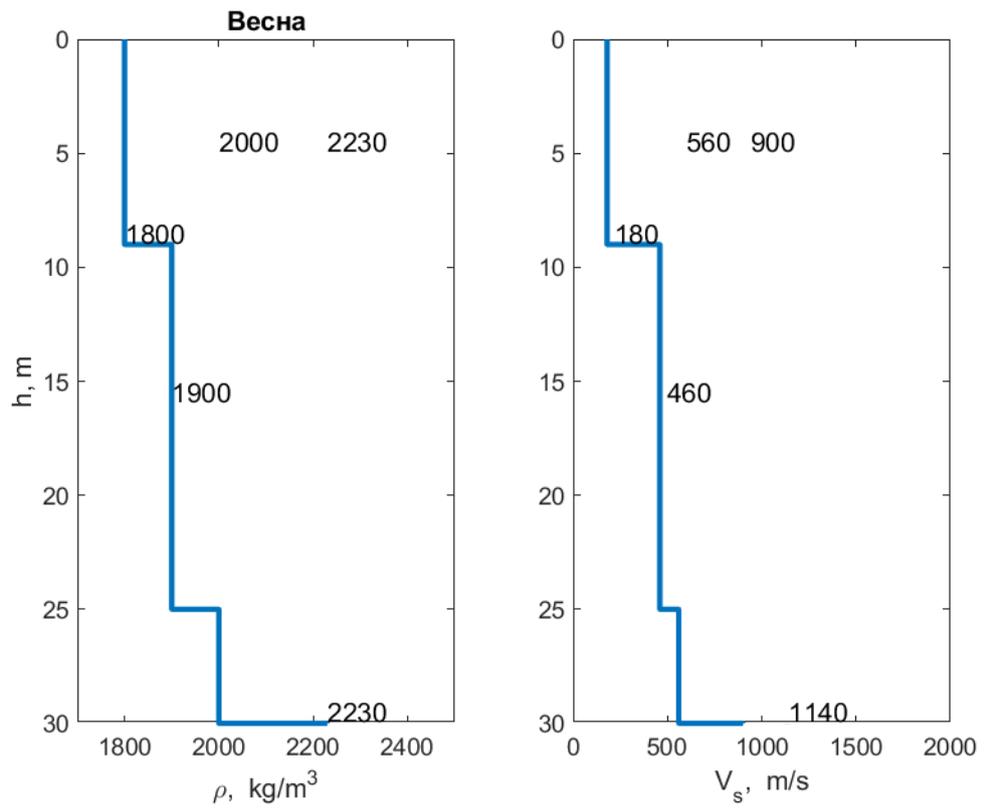


Рисунок П1.3. Модель грунта участка Весна

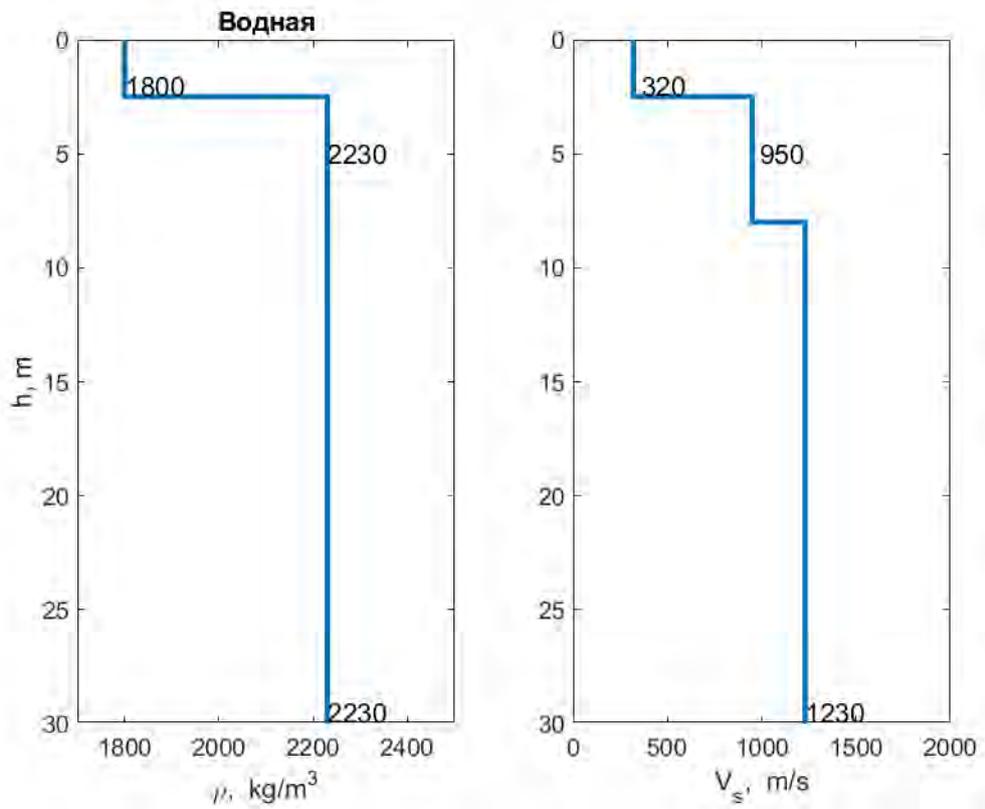


Рисунок П1.4. Модель грунта участка Водная

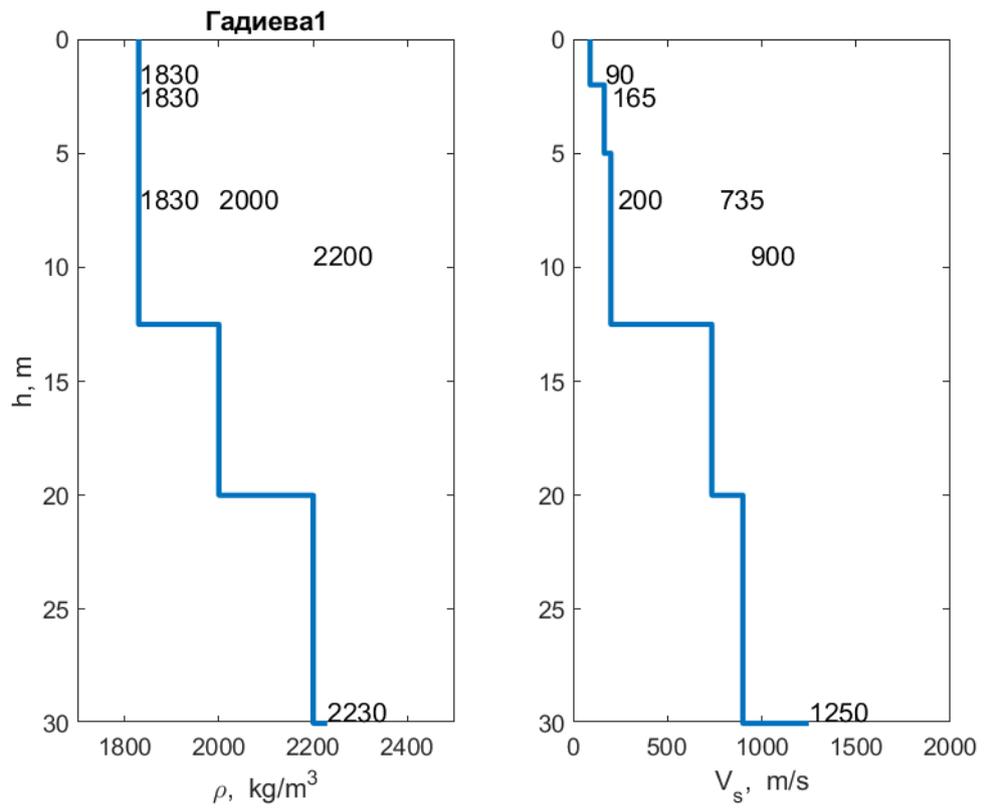


Рисунок П1.5. Модель грунта участка Гадиева 1

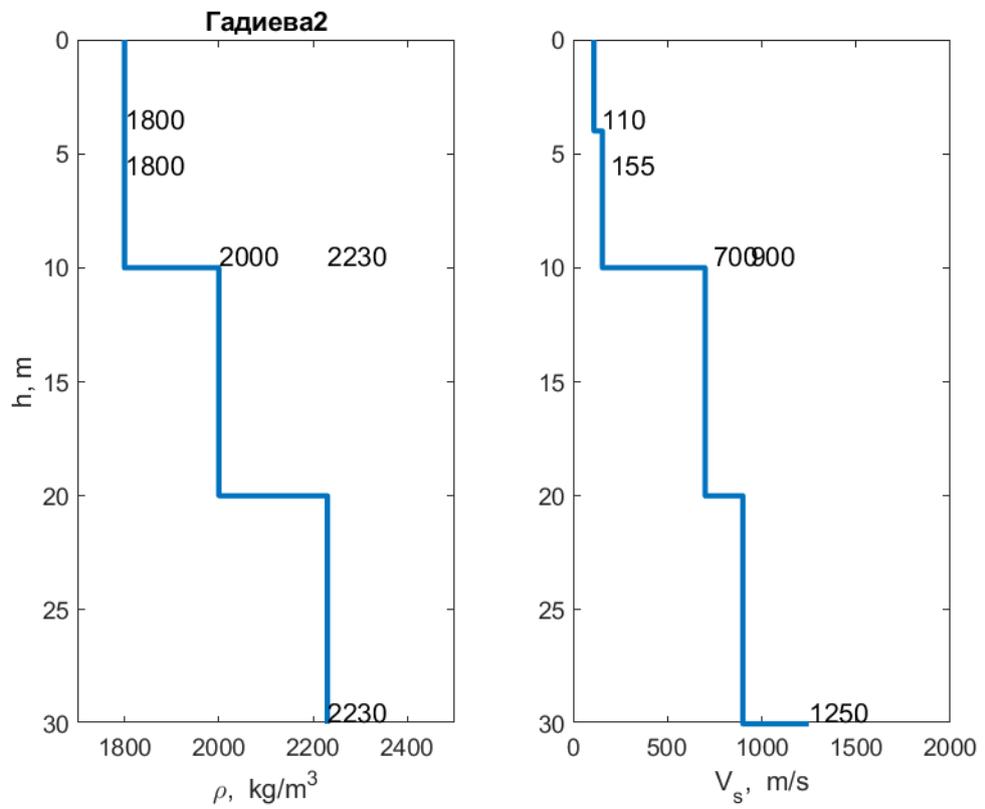


Рисунок П1.6. Модель грунта участка Гадиева 2

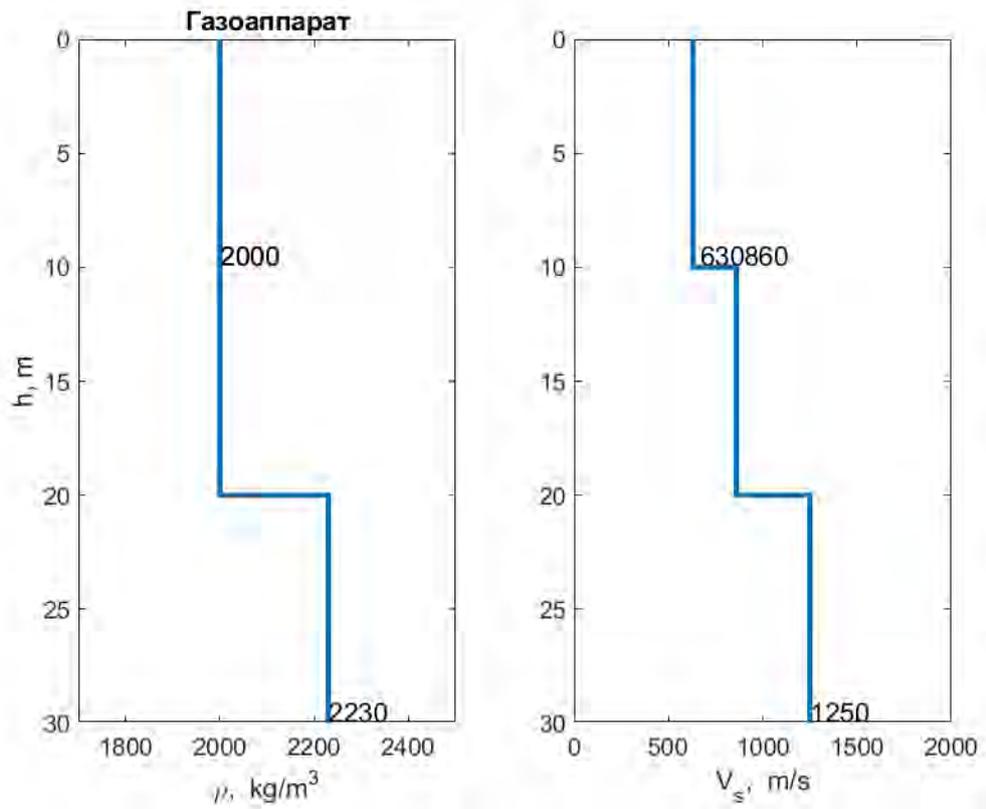


Рисунок П1.7. Модель грунта участка Газоаппарат

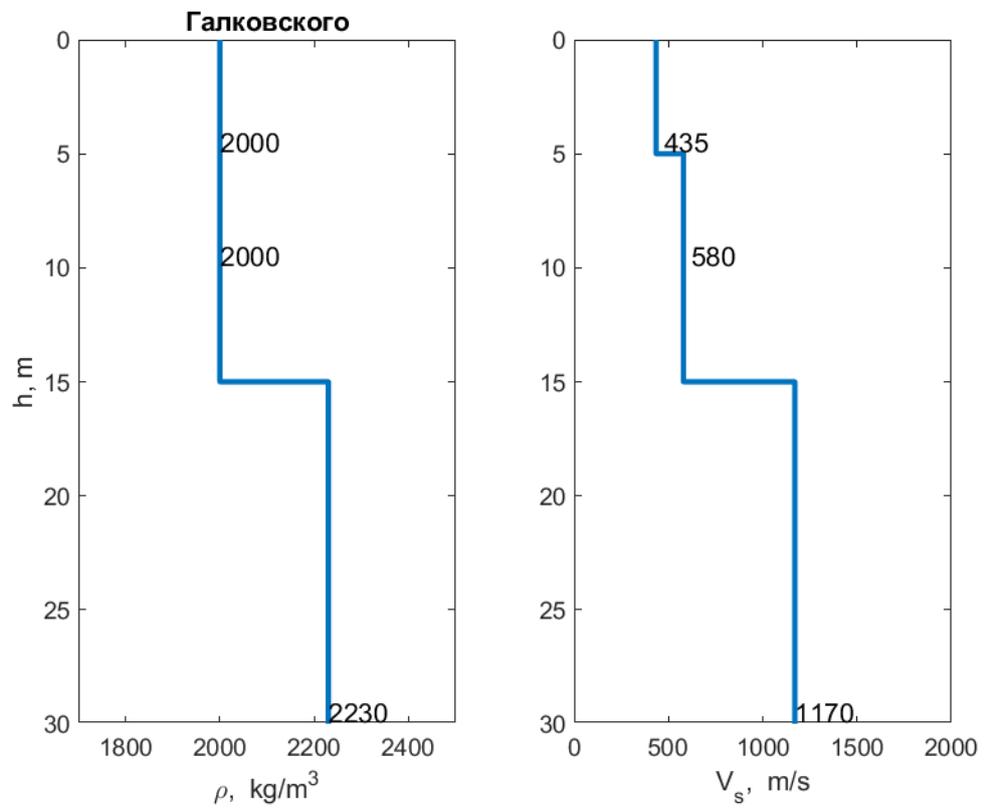


Рисунок П1.8. Модель грунта участка Галковского

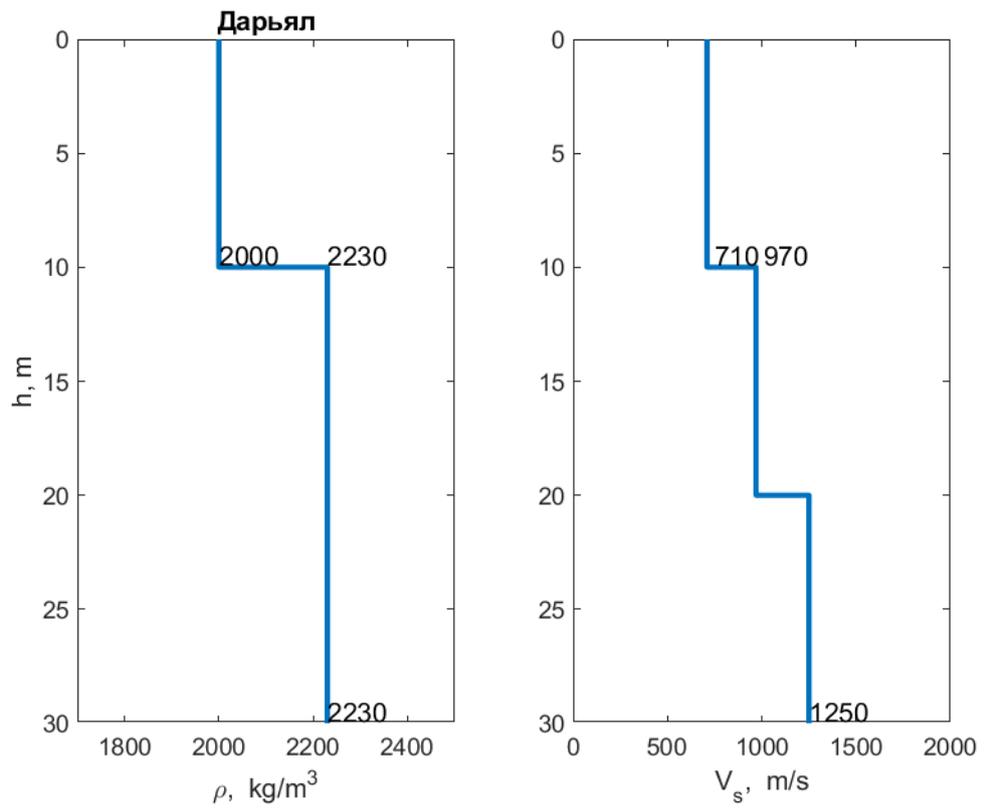


Рисунок П1.9. Модель грунта участка Дарьял

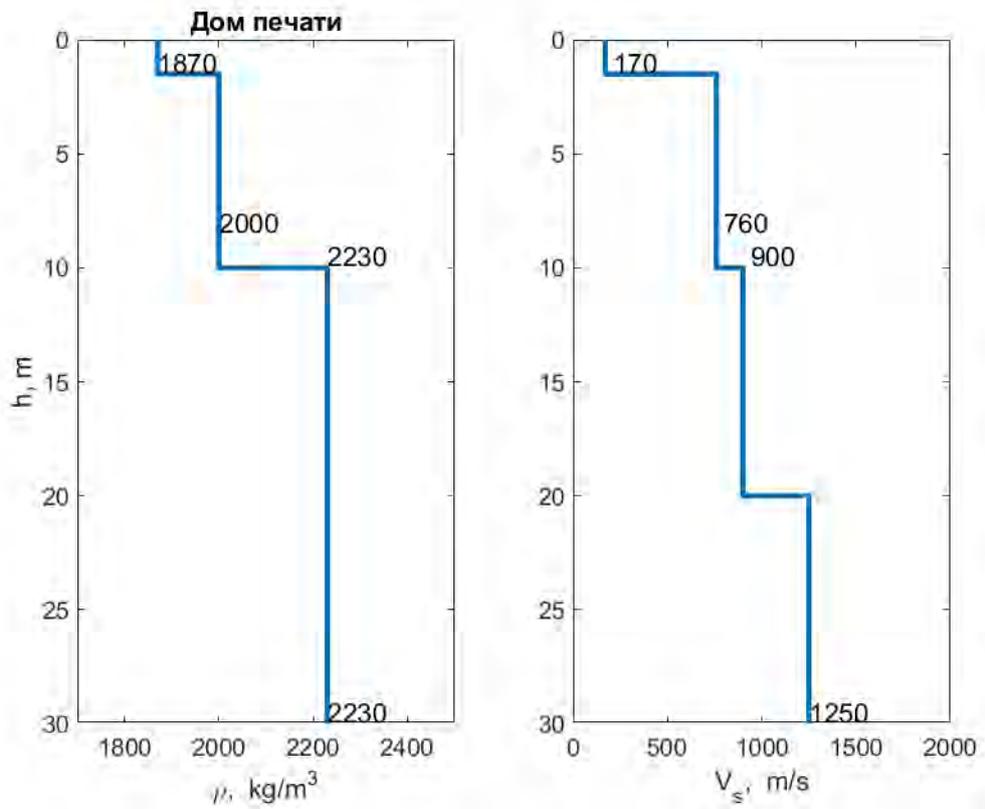


Рисунок П1.10. Модель грунта участка Дом Печати

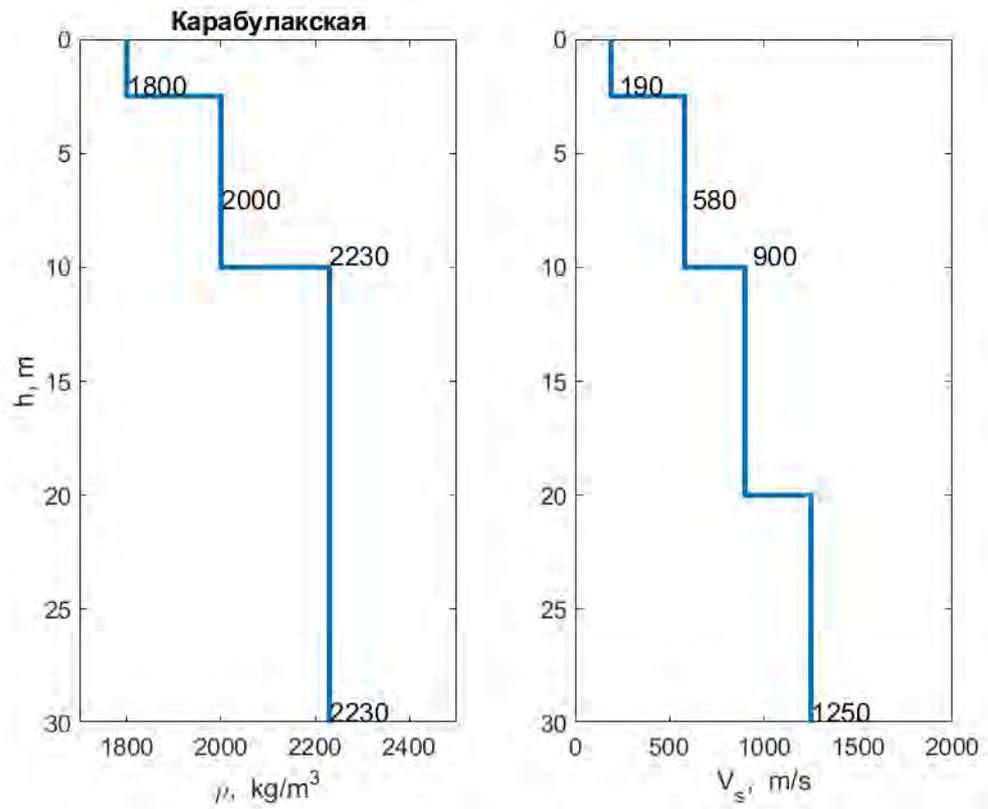


Рисунок П1.11. Модель грунта участка Карабулакская

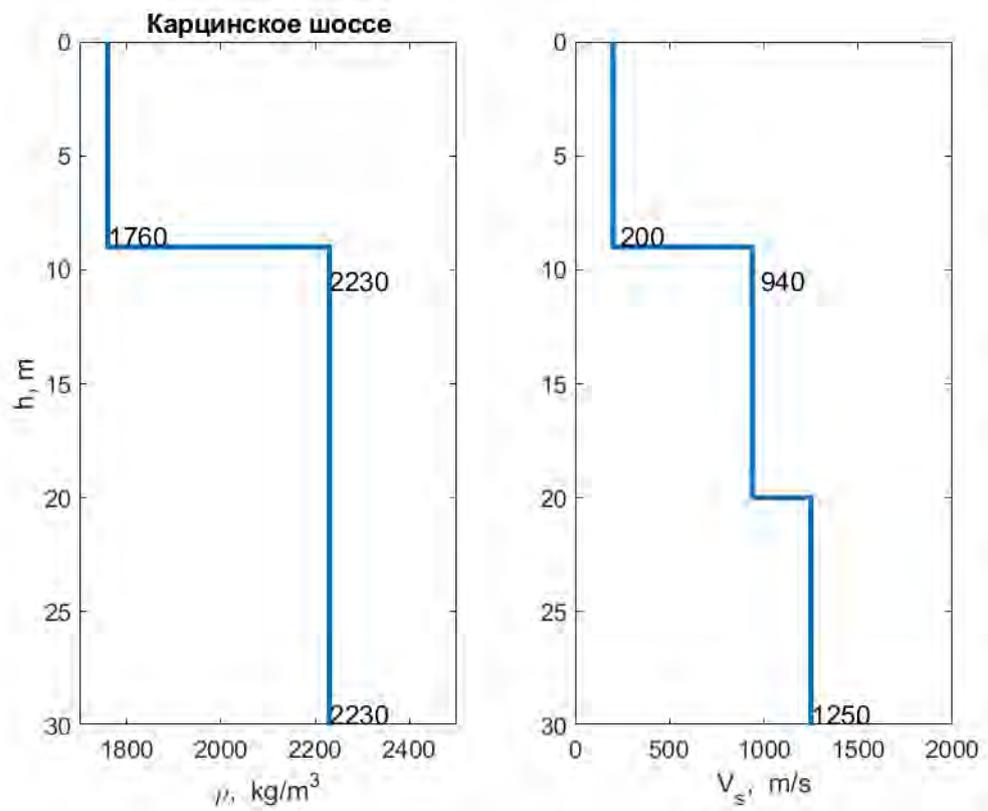


Рисунок П1.12. Модель грунта участка Карцинское шоссе

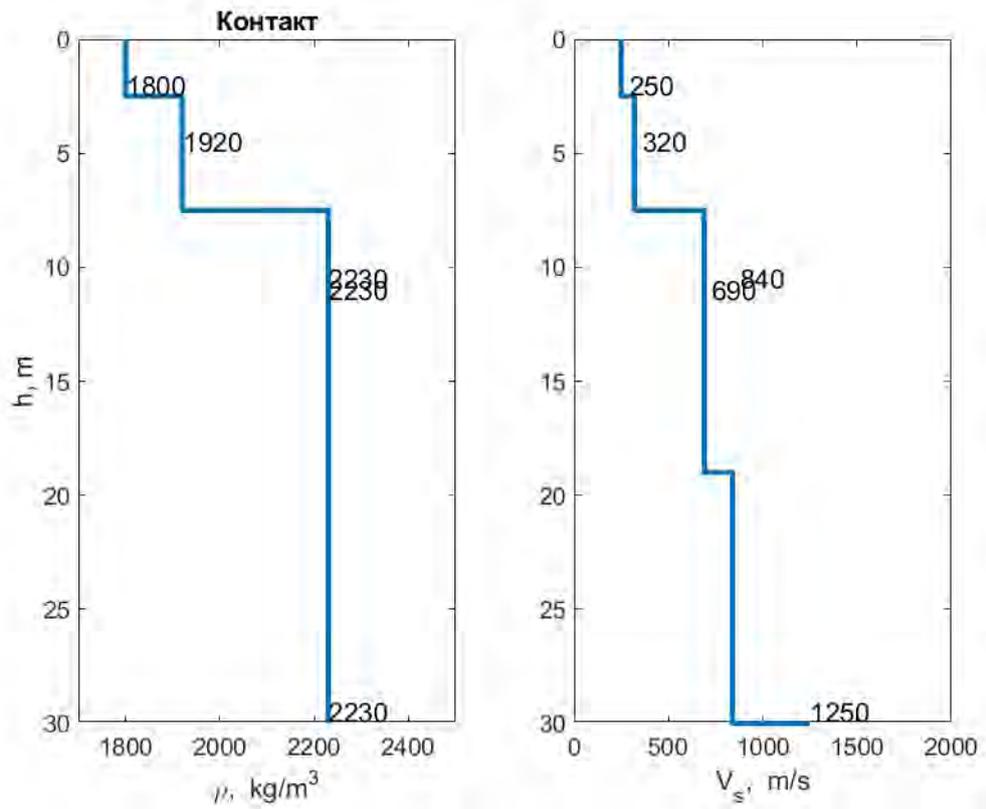


Рисунок П1.13. Модель грунта участка Контакт

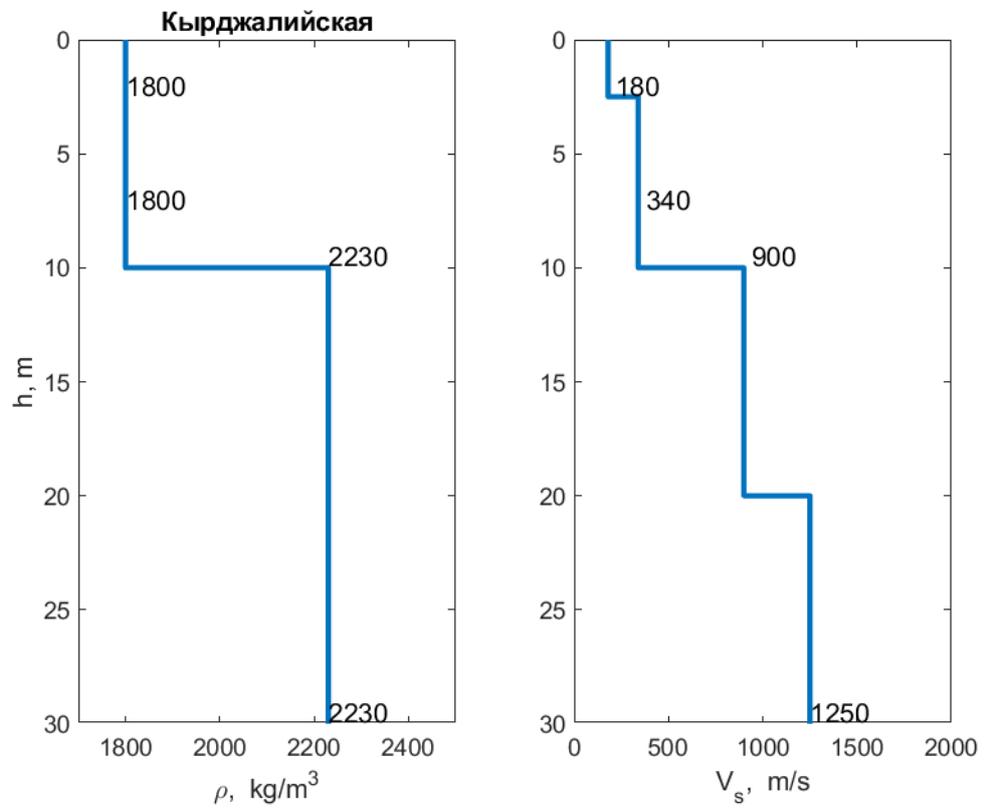


Рисунок П1.14. Модель грунта участка Кырджалийская

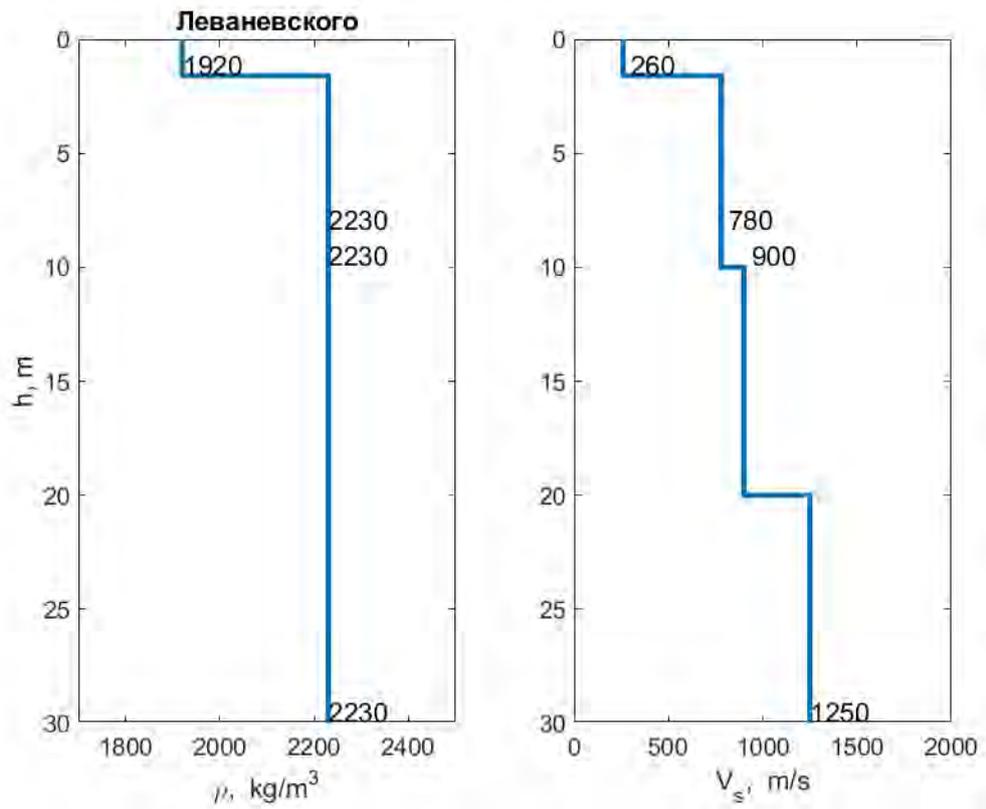


Рисунок П1.15. Модель грунта участка Леваневского

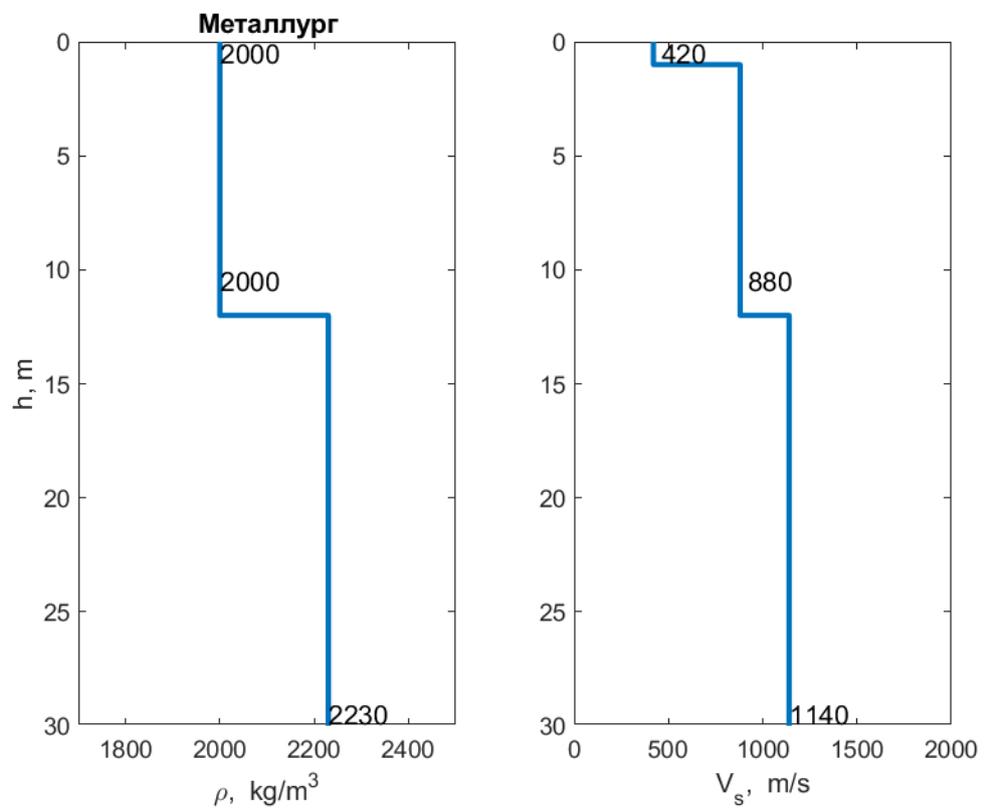


Рисунок П1.16. Модель грунта участка Metallurg

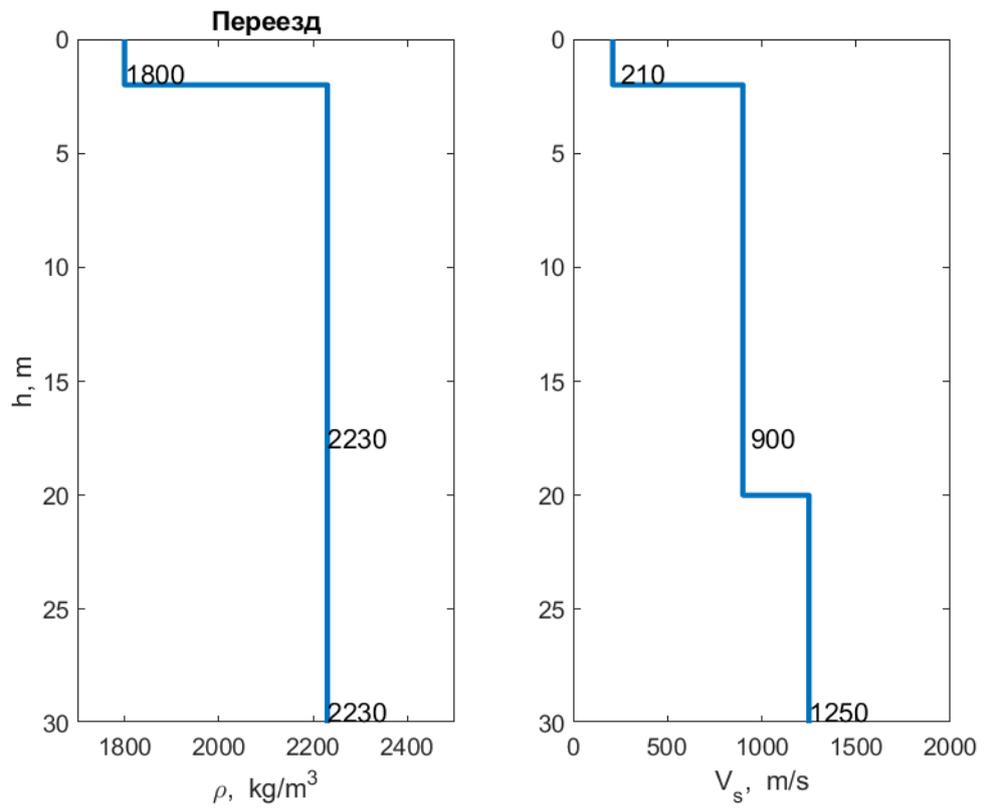


Рисунок П1.17. Модель грунта участка Переезд

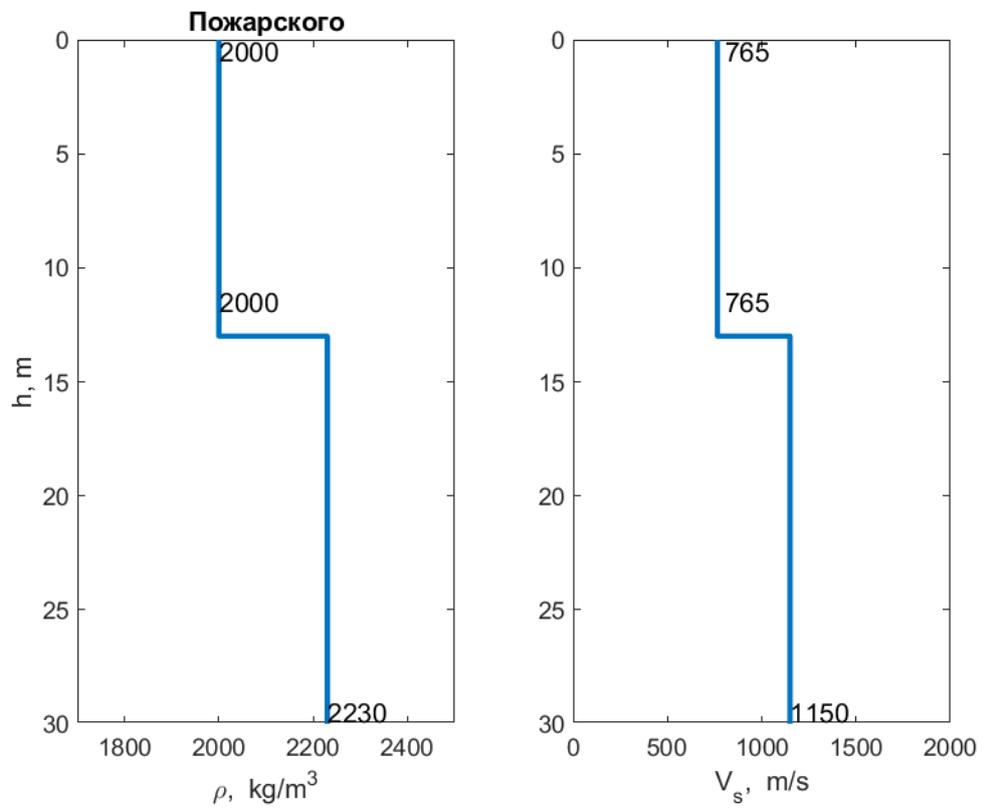


Рисунок П1.18. Модель грунта участка Пожарского

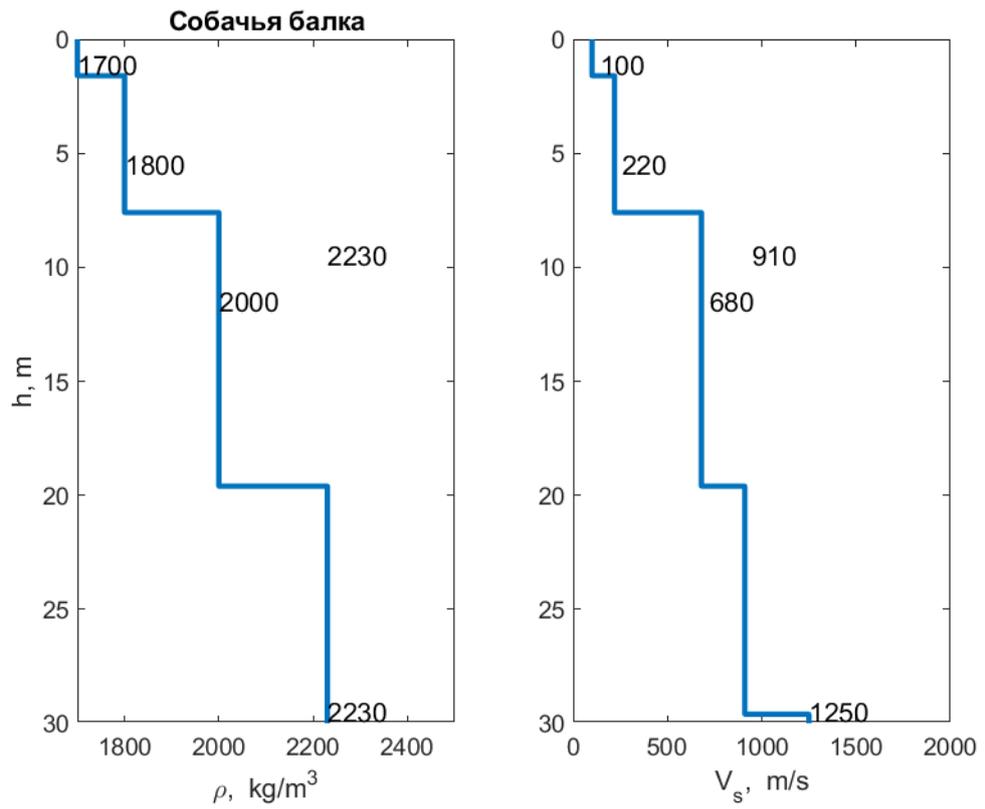


Рисунок П1.19. Модель грунта участка Собачья балка

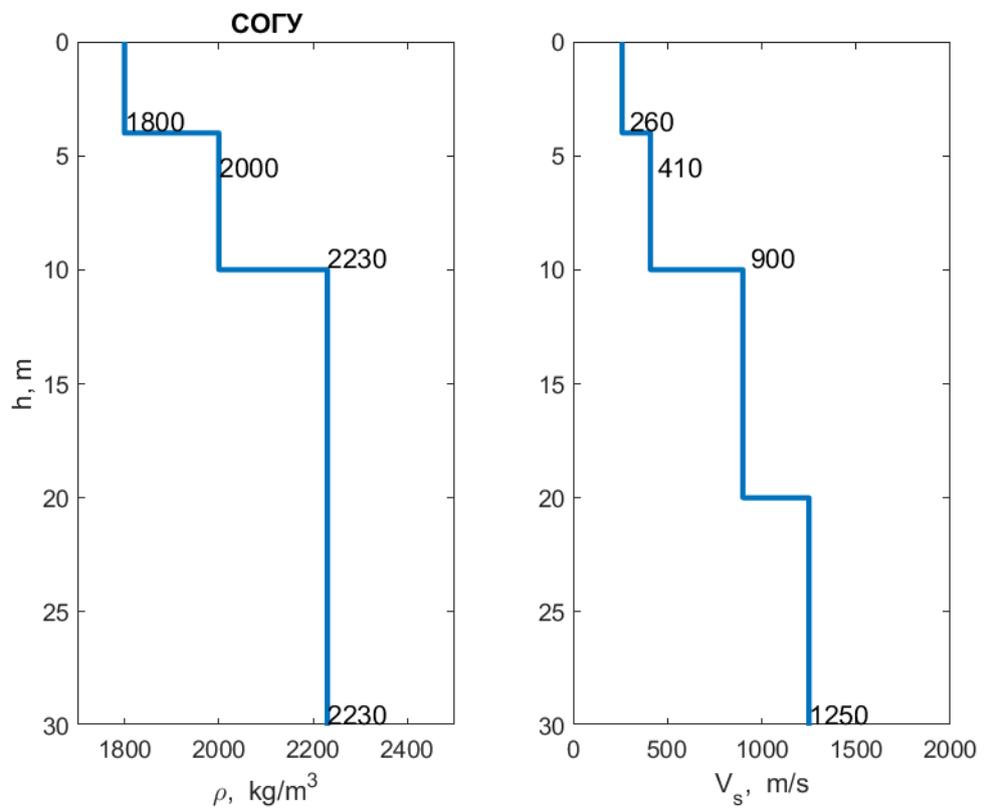


Рисунок П1.20. Модель грунта участка СОГУ

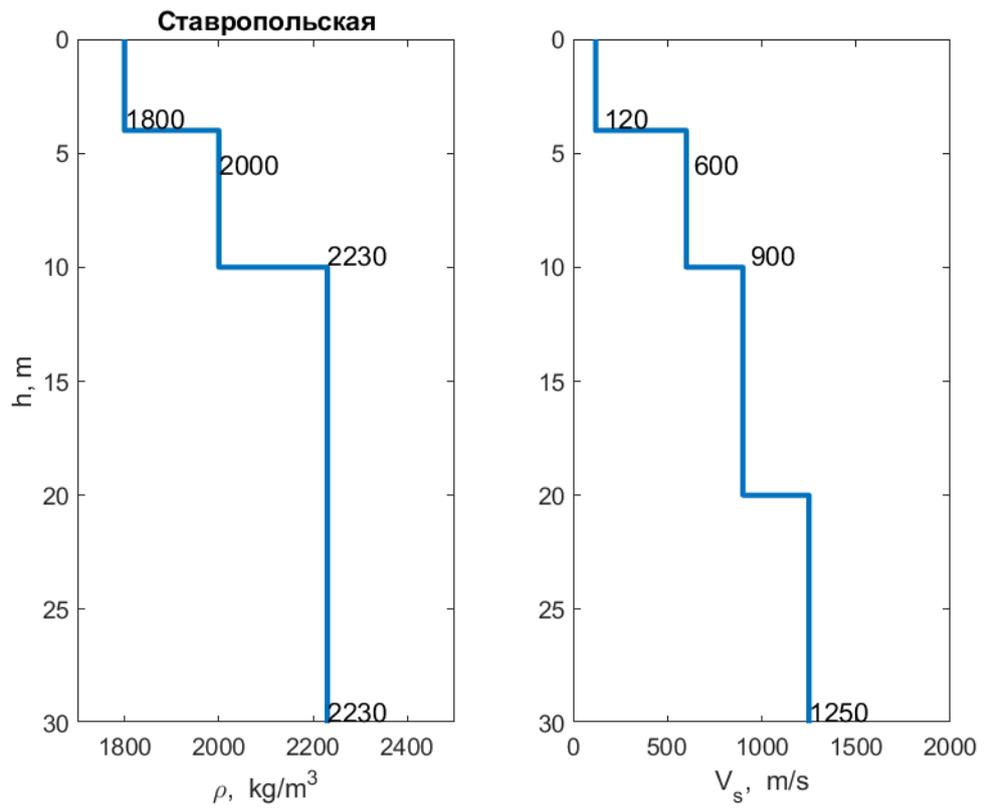


Рисунок П1.21. Модель грунта участка Ставропольская

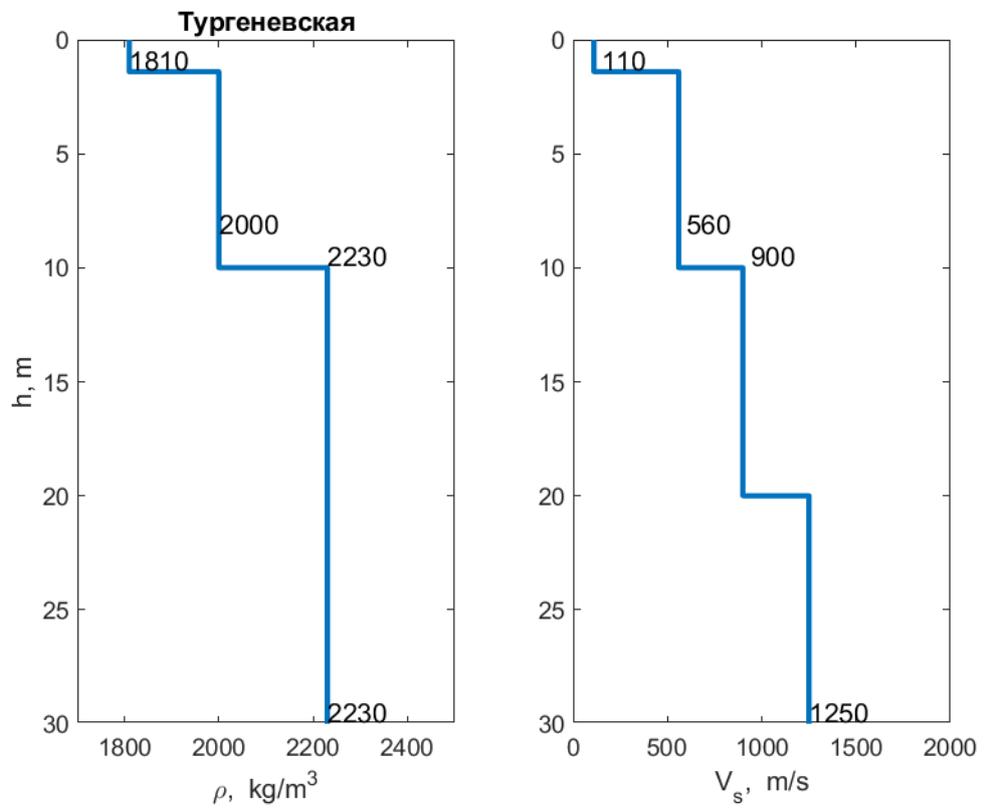


Рисунок П1.22. Модель грунта участка Тургеневская

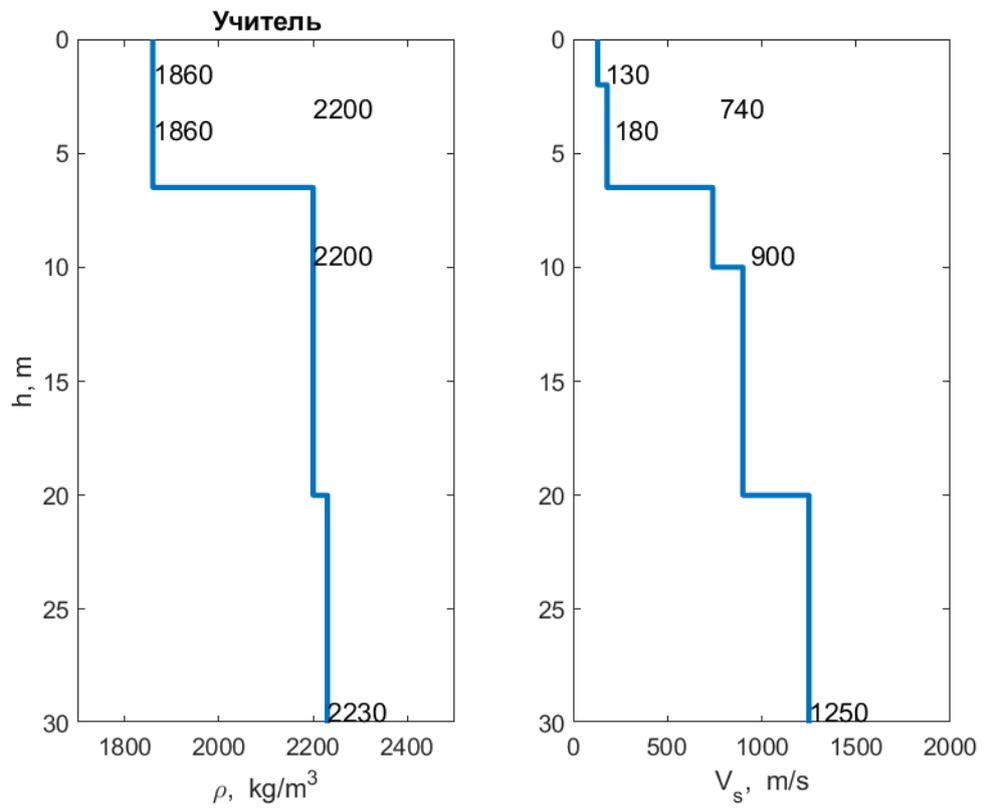


Рисунок П1.23. Модель грунта участка Учитель

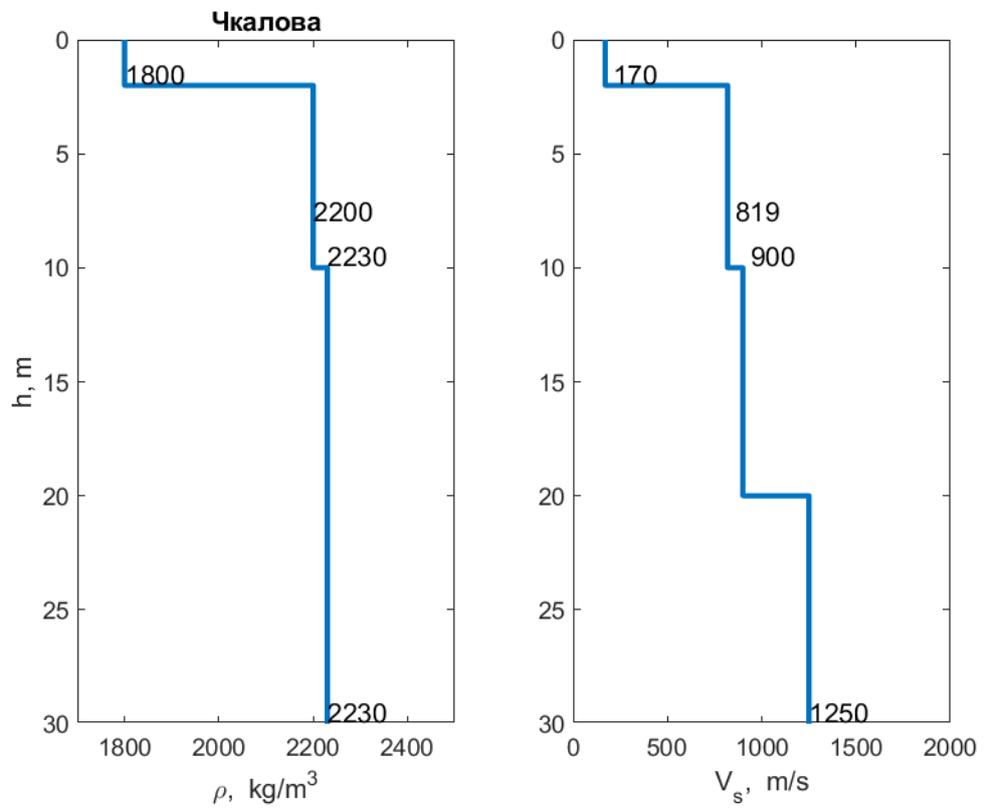


Рисунок П1.24. Модель грунта участка Чкалова

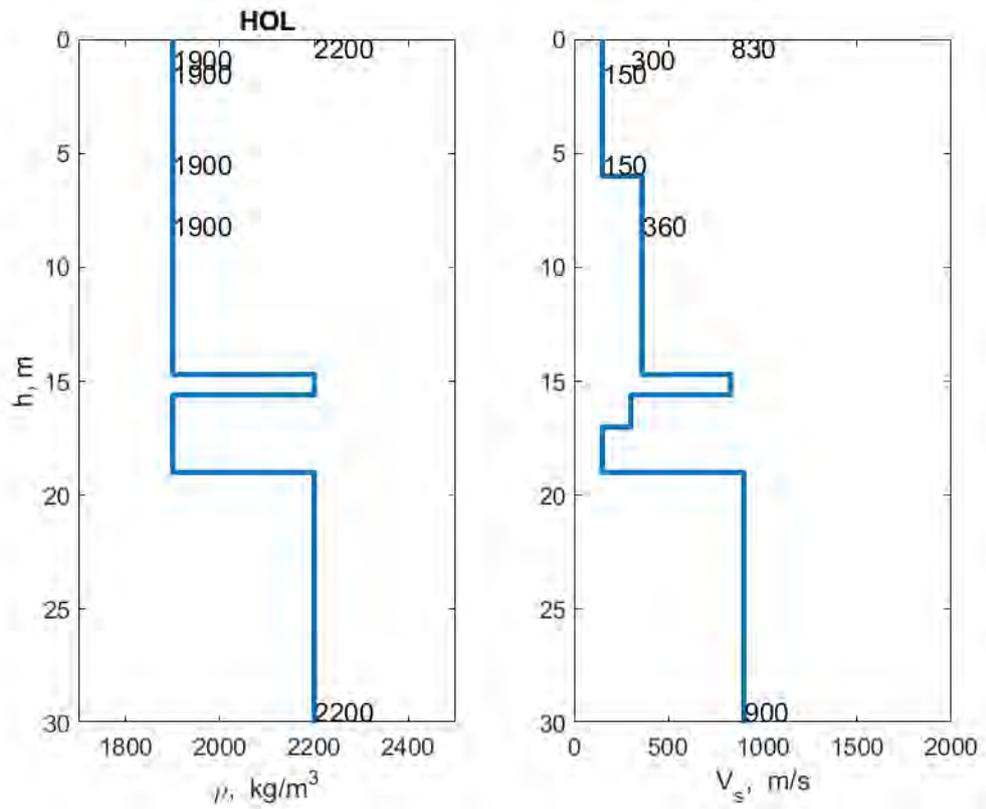


Рисунок П1.25. Модель грунта участка HOL

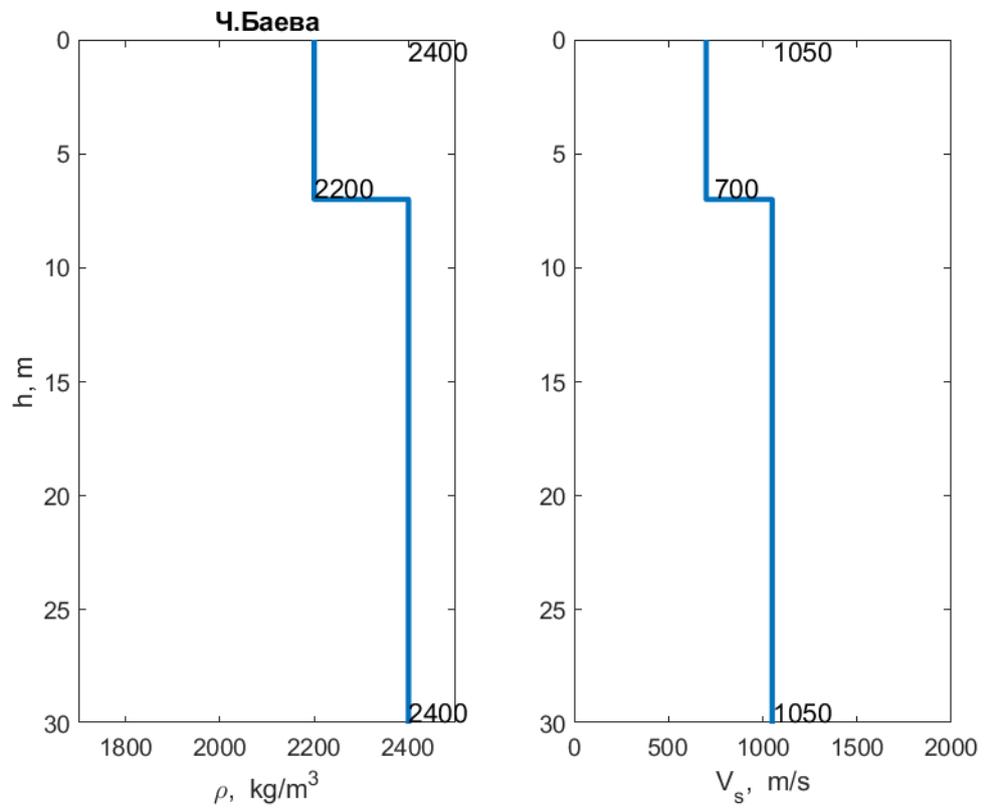


Рисунок П1.26. Модель грунта участка Ч. Баева

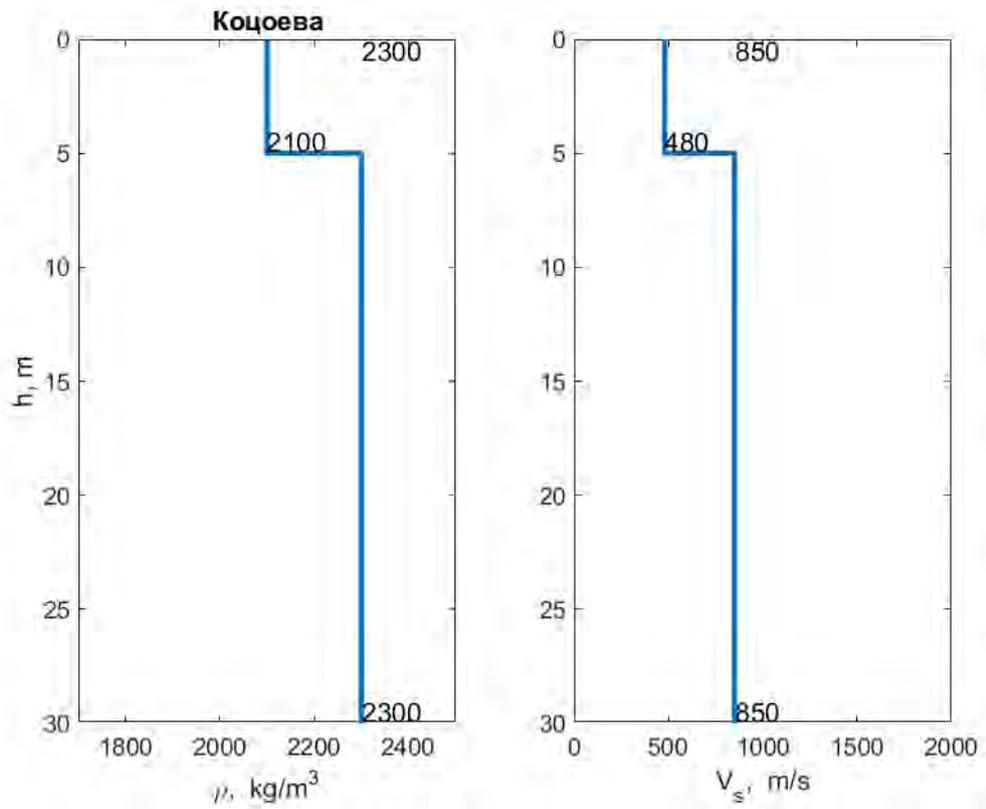


Рисунок П1.27. Модель ґрунта участка Коцоева

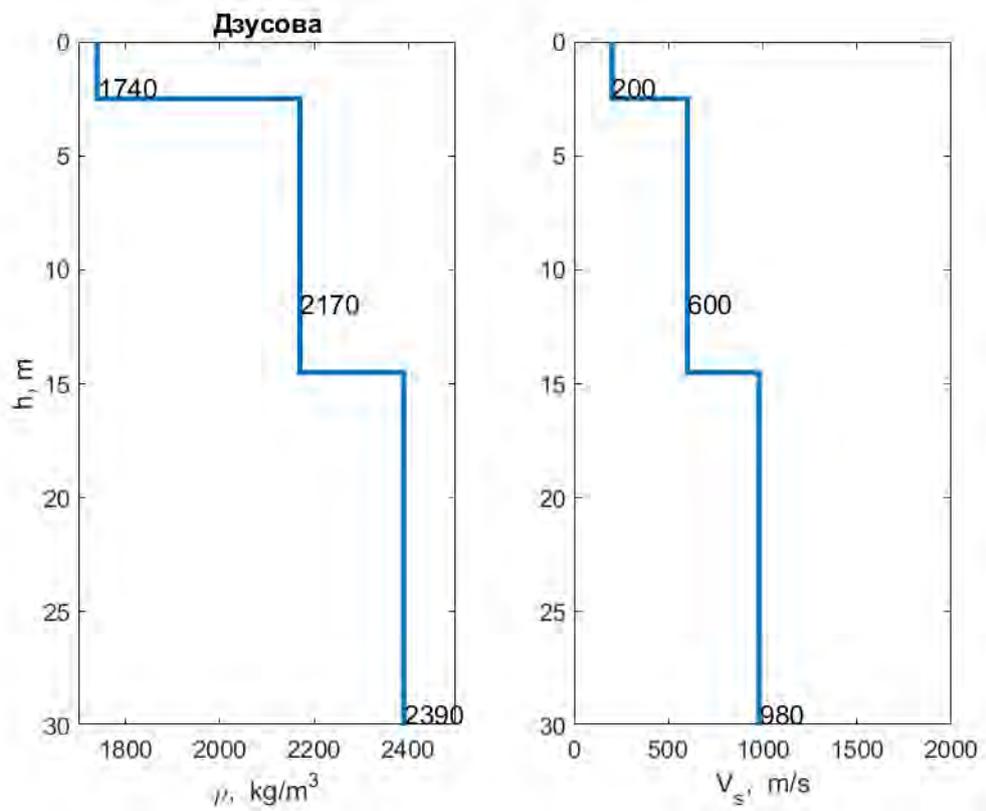


Рисунок П1.28. Модель ґрунта участка Дзусова

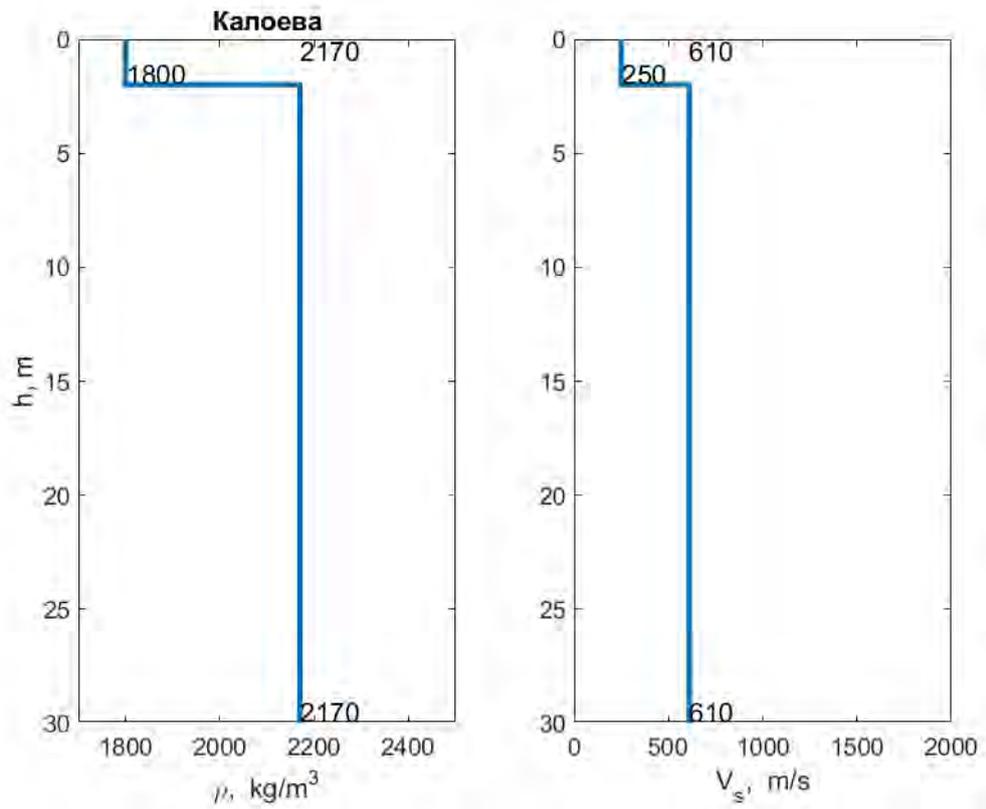


Рисунок П1.29. Модель грунта участка Дзусова

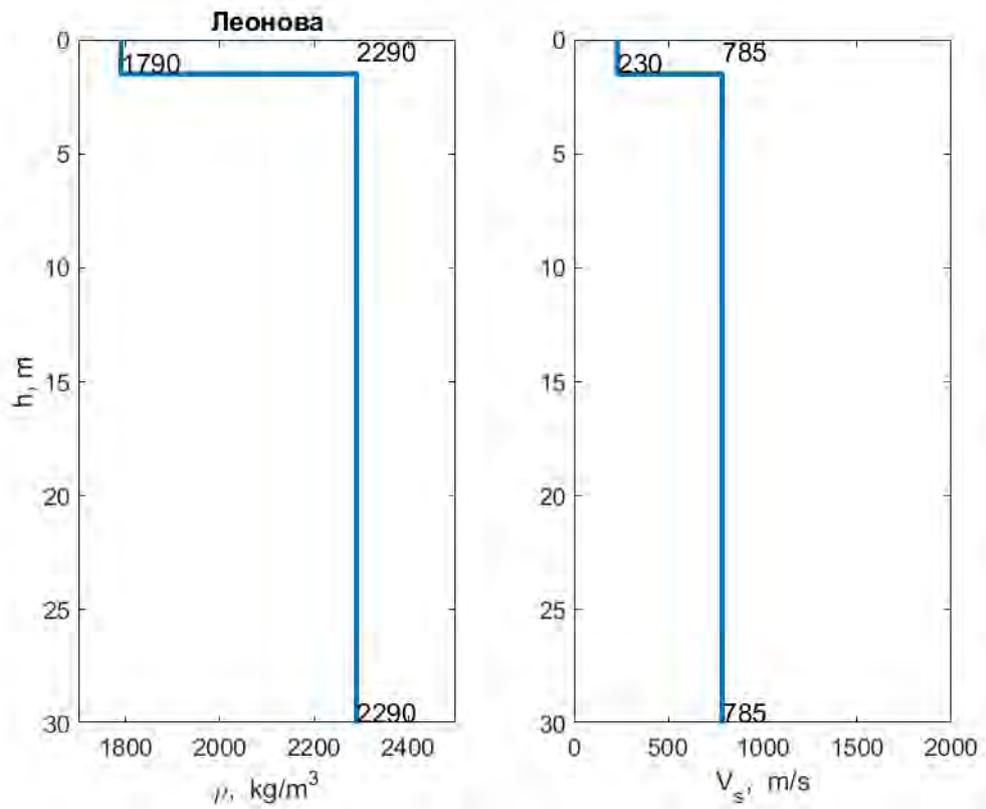


Рисунок П1.30. Модель грунта участка Леонова

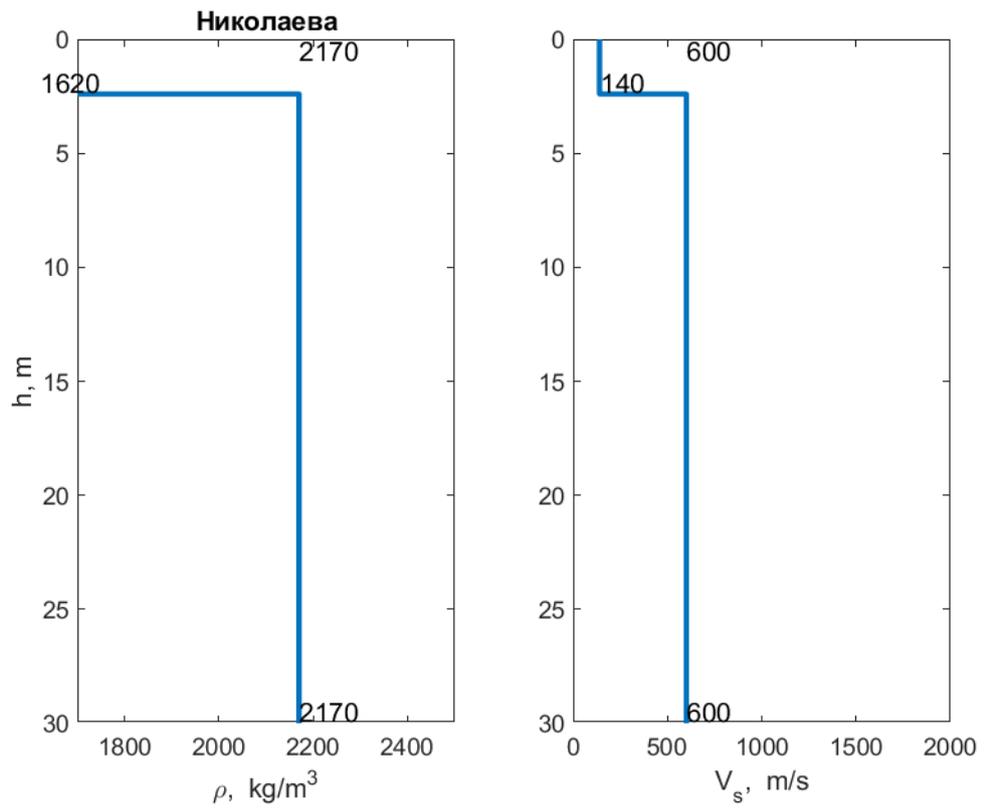


Рисунок П1.31. Модель грунта участка Николаева

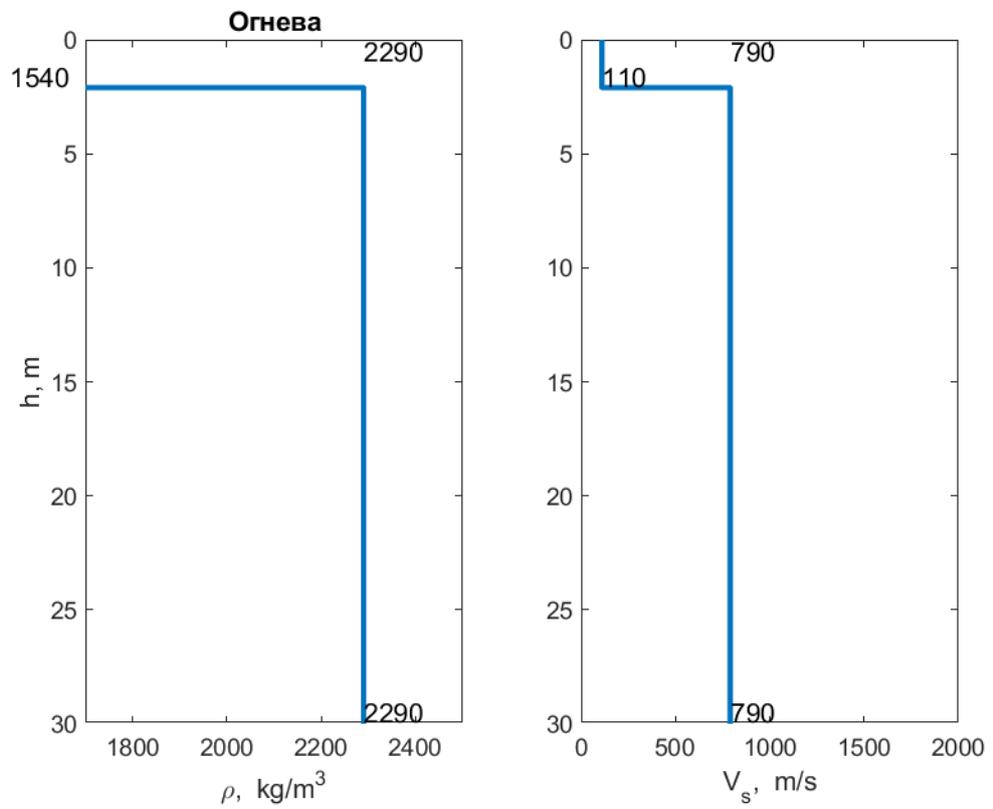


Рисунок П1.32. Модель грунта участка Огнева

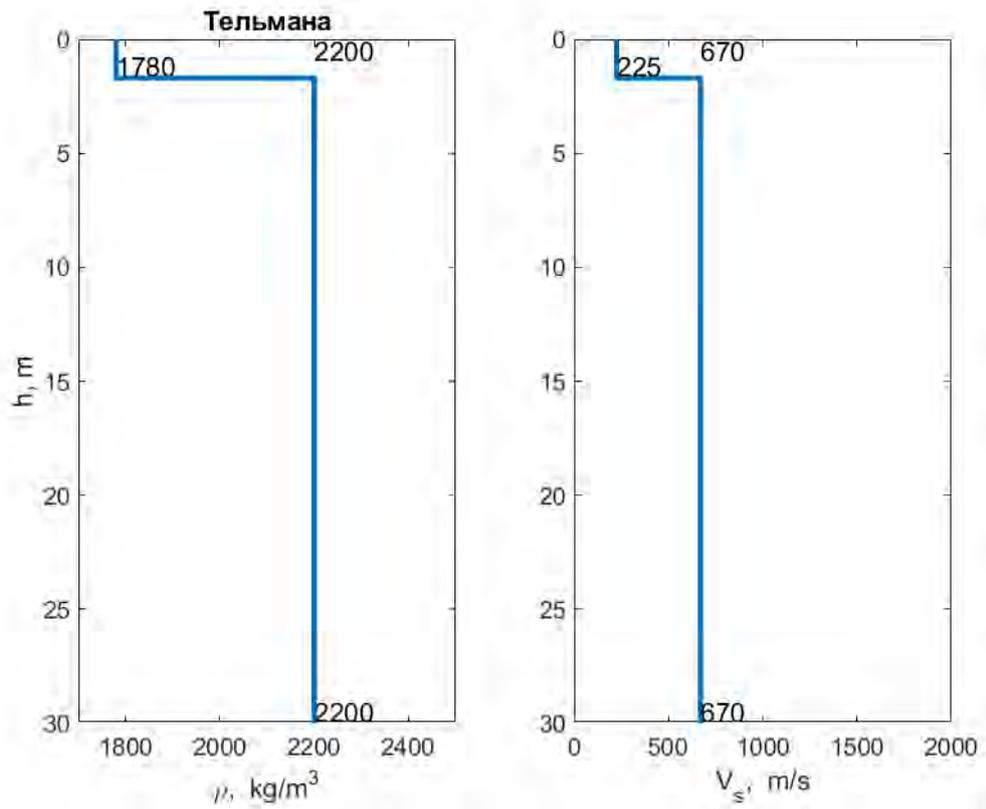


Рисунок П1.33. Модель ґрунта участка Тельмана

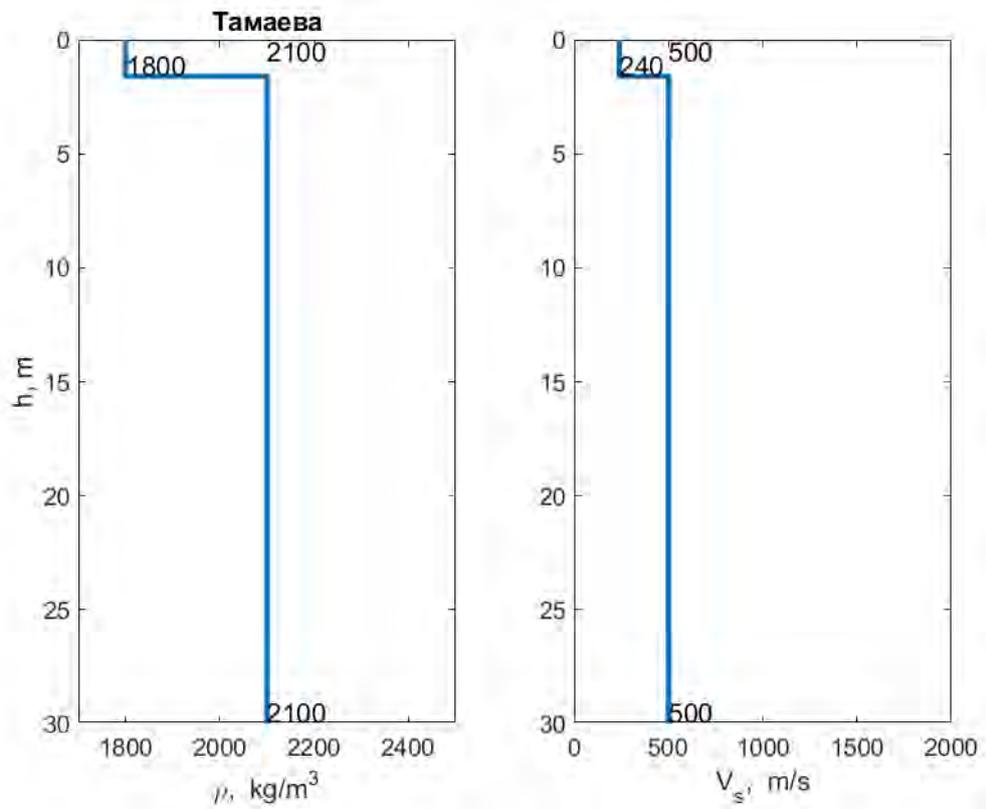


Рисунок П1.34. Модель ґрунта участка Тамаева

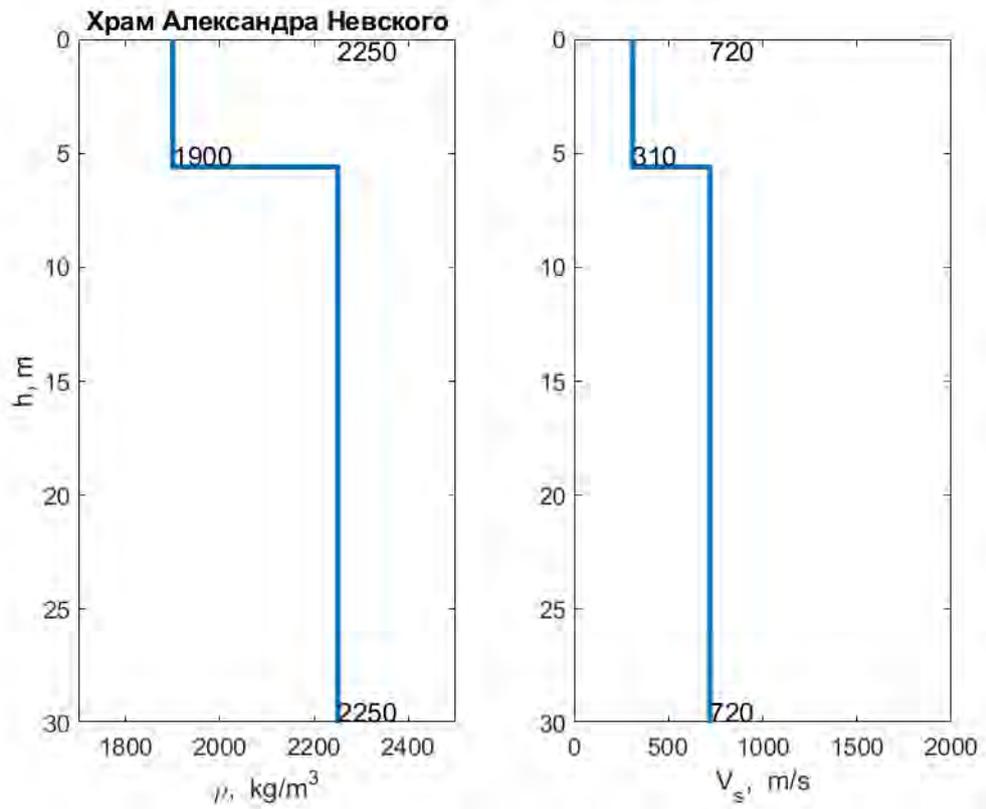


Рисунок П1.35. Модель грунта участка Храм Александра Невского

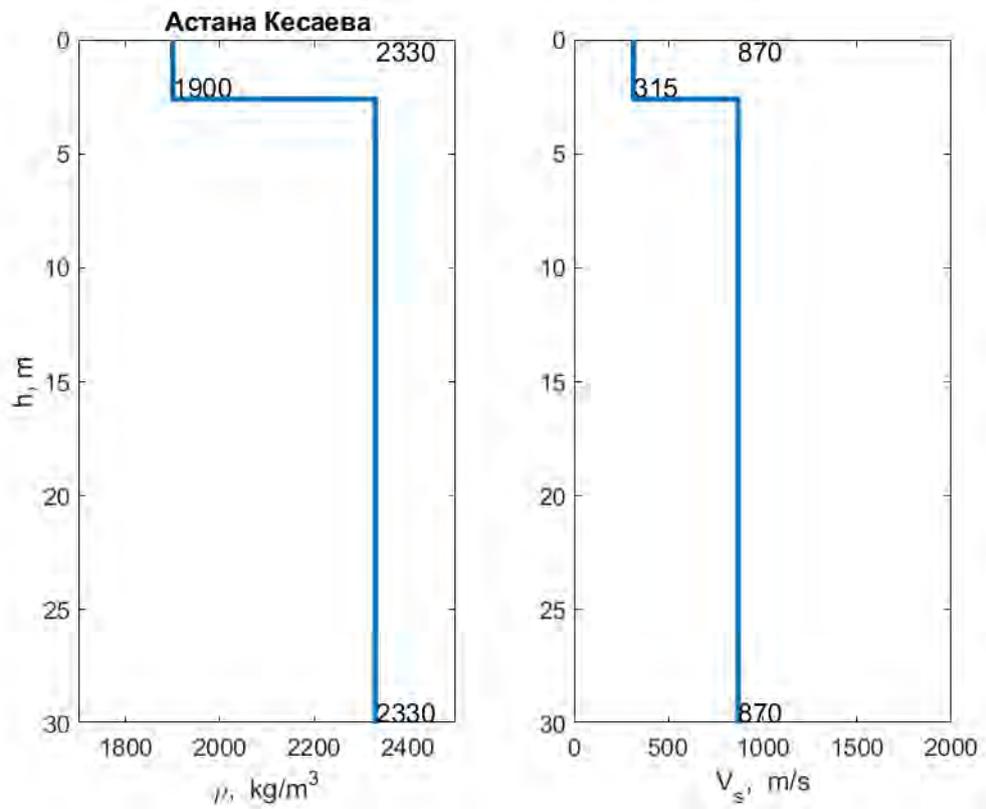


Рисунок П1.36. Модель грунта участка Кесаева

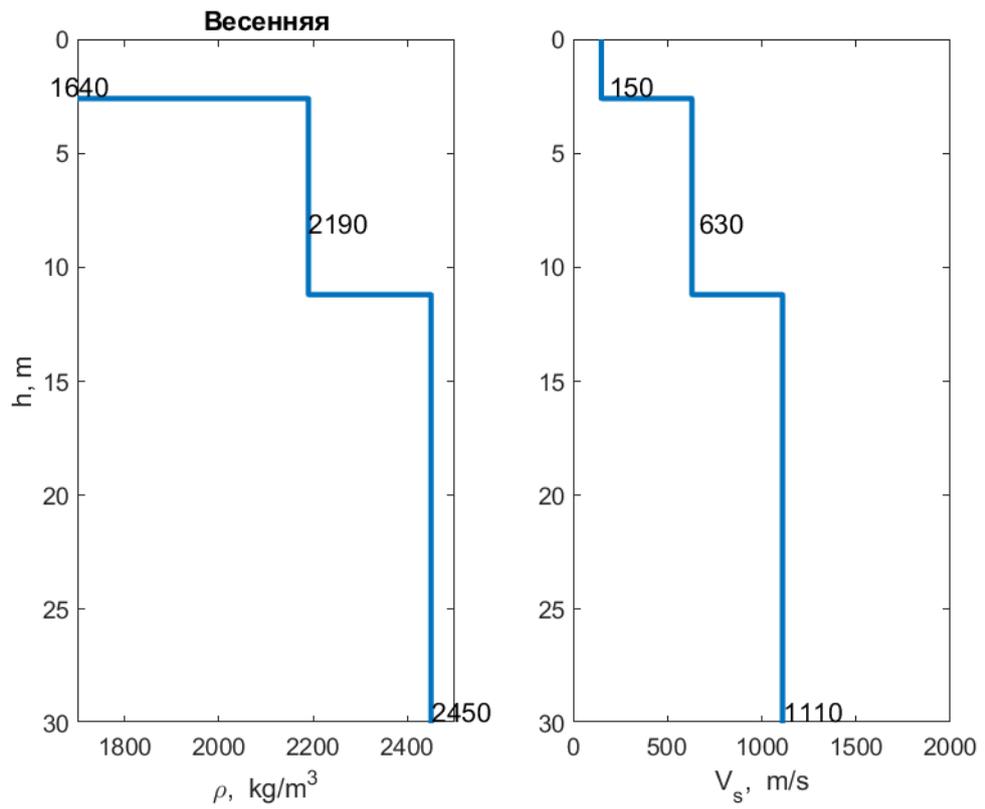


Рисунок П1.37. Модель грунта участка Весенняя

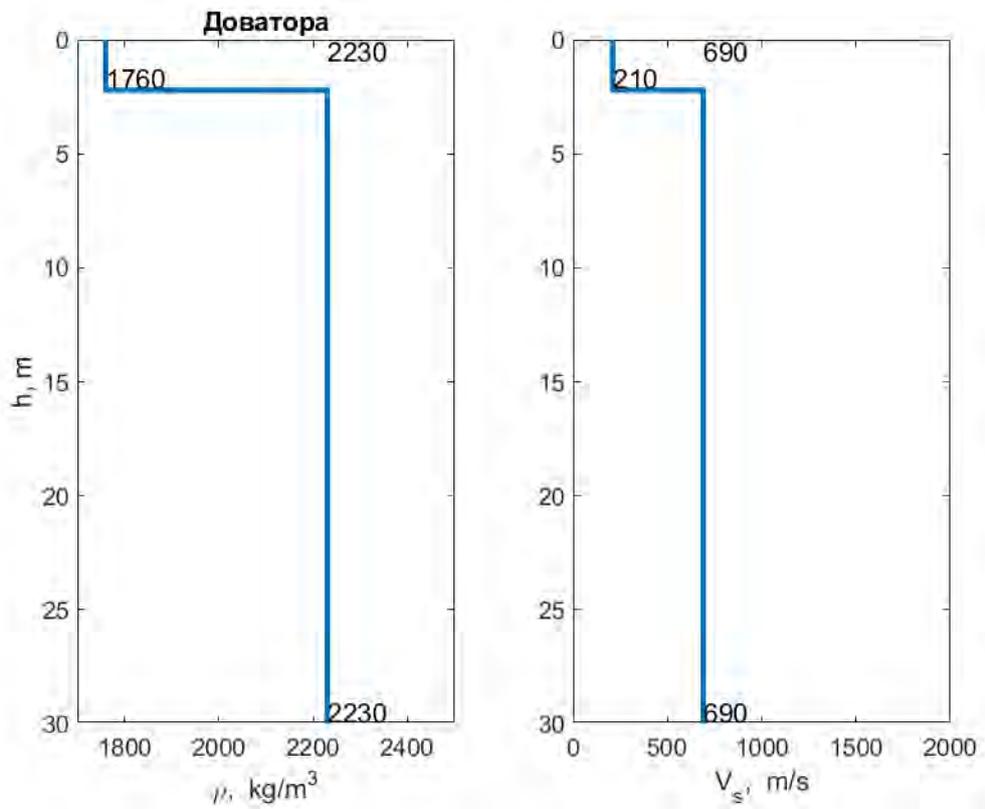


Рисунок П1.38. Модель грунта участка Доватора

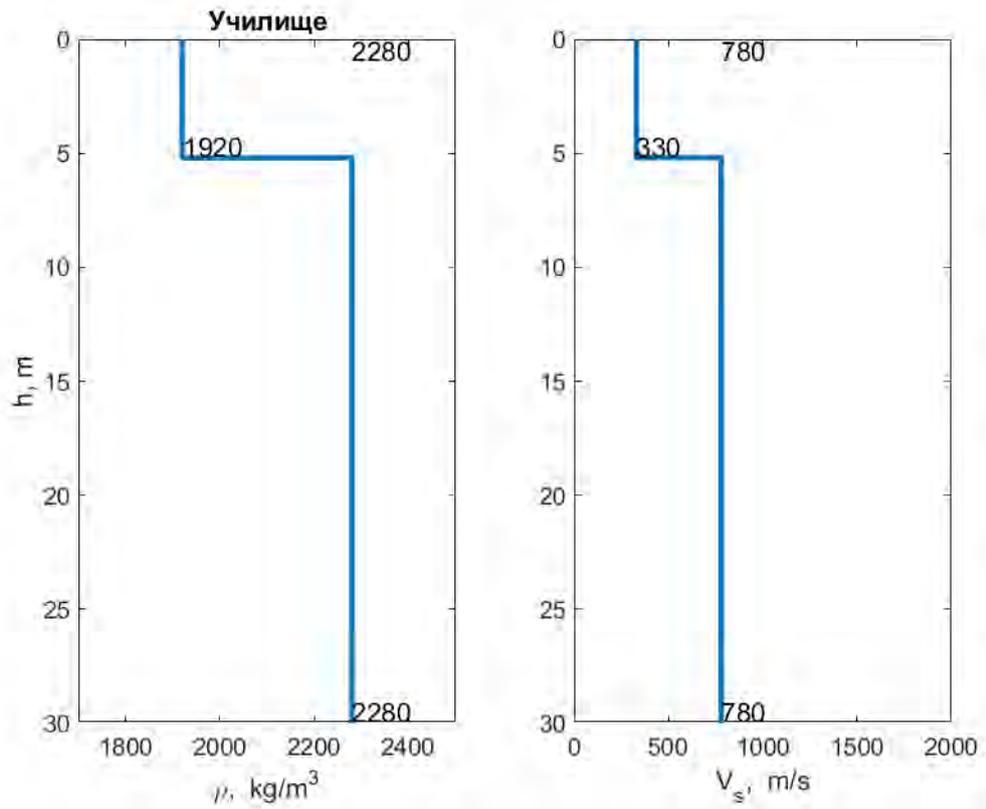


Рисунок П1.39. Модель грунта участка Училище

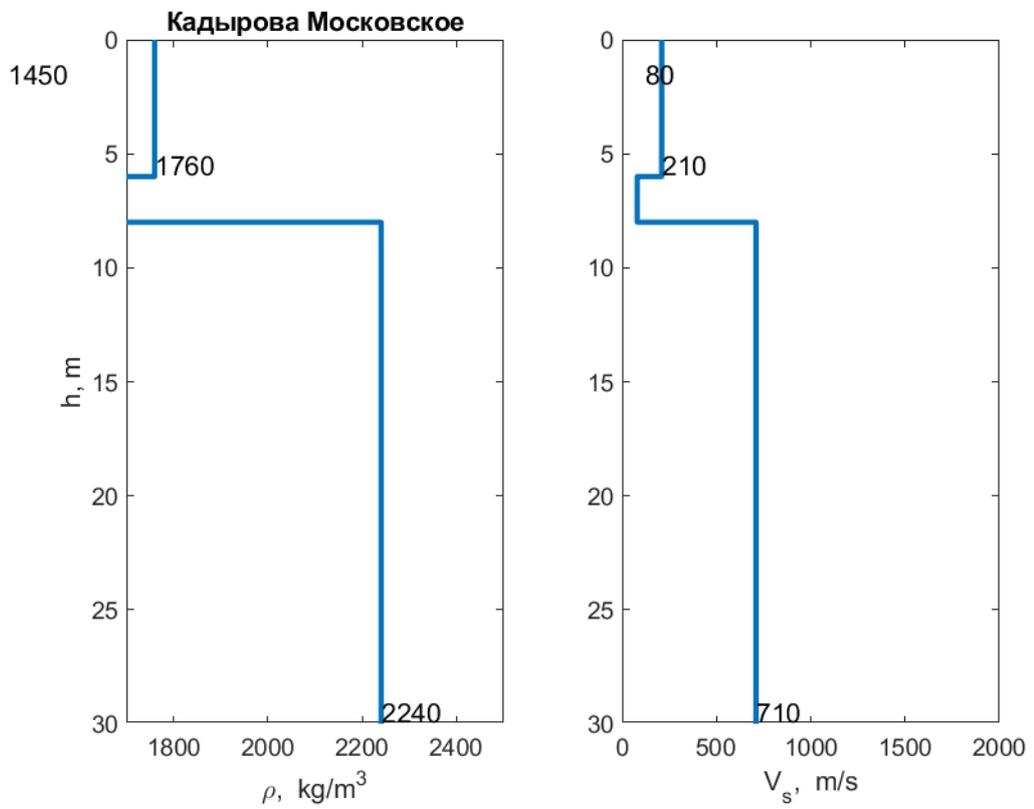


Рисунок П1.40. Модель грунта участка Кадырова /Московское

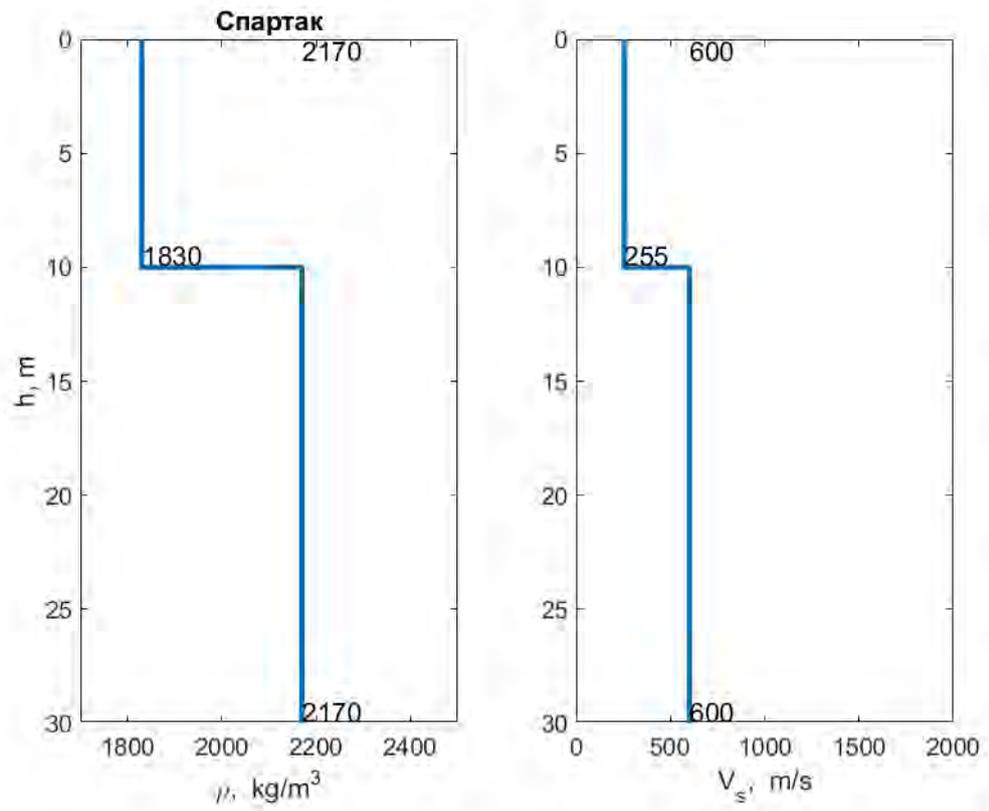


Рисунок П1.41. Модель грунта участка Спартак

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

**РАСЧЕТНЫЕ СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УЧАСТКОВ
ТЕРРИТОРИИ Г. ВЛАДИКАВКАЗА**

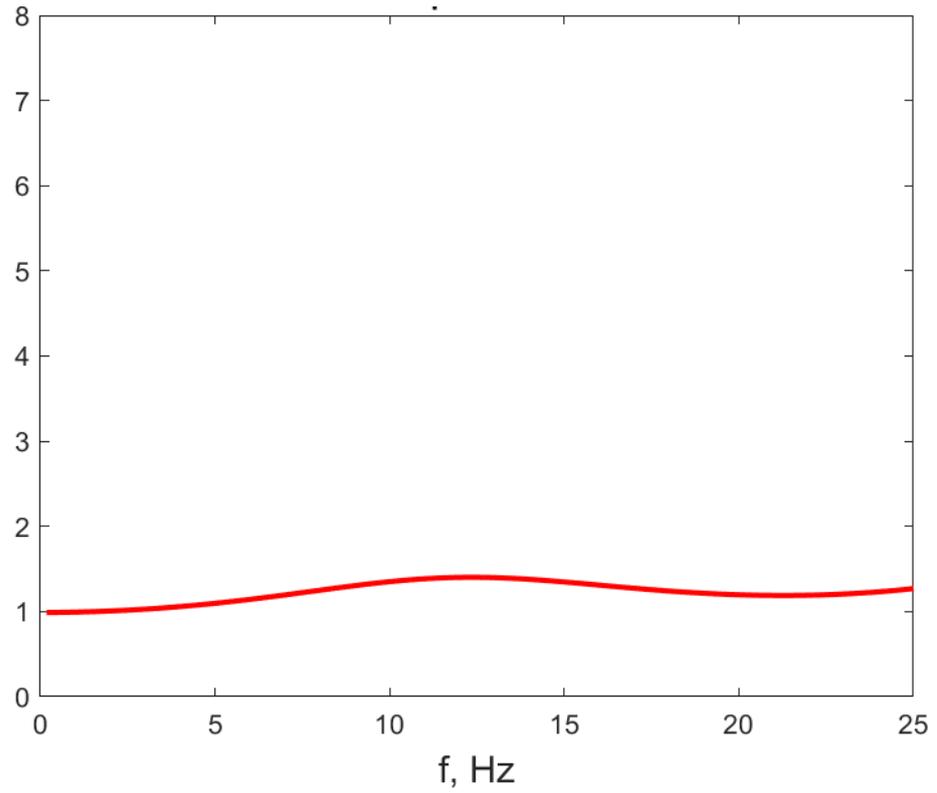
Архонские сады

Рисунок П2.1. Спектральная характеристика участка Архонские сады

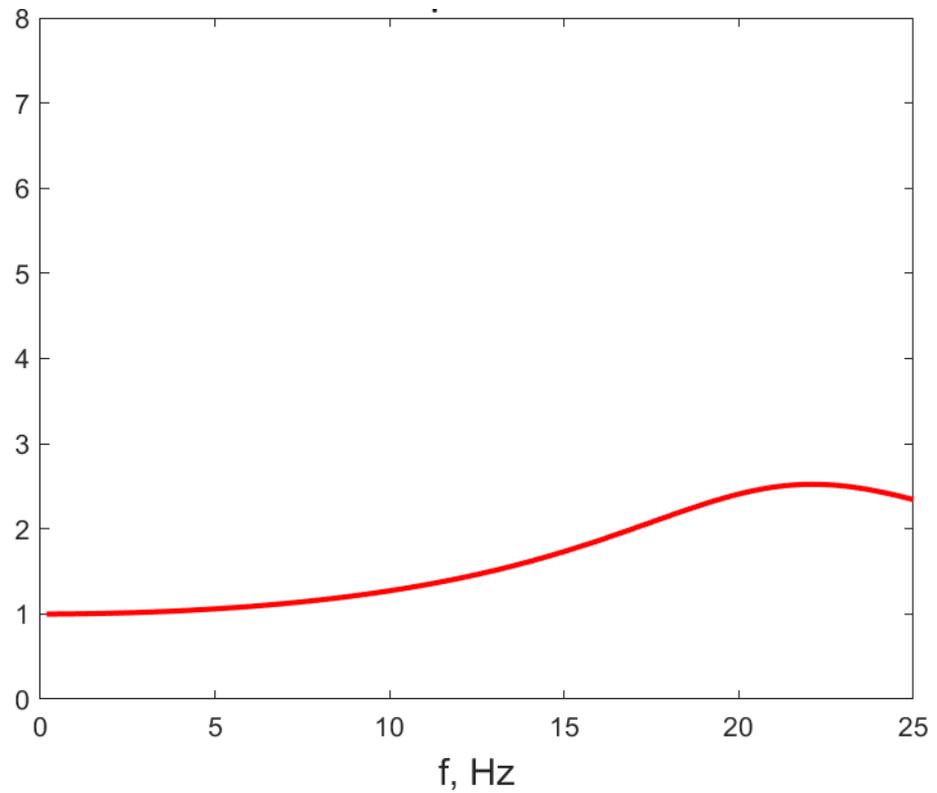
БАМ

Рисунок П2.2. Спектральная характеристика участка БАМ

Весна

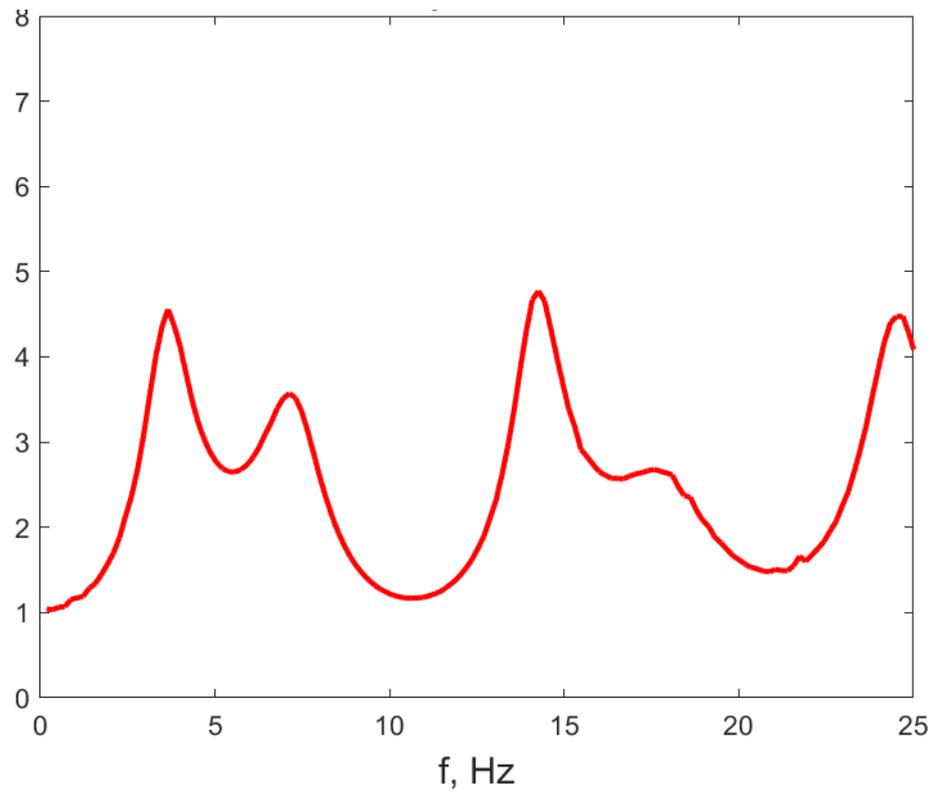


Рисунок П2.3. Спектральная характеристика участка Весна

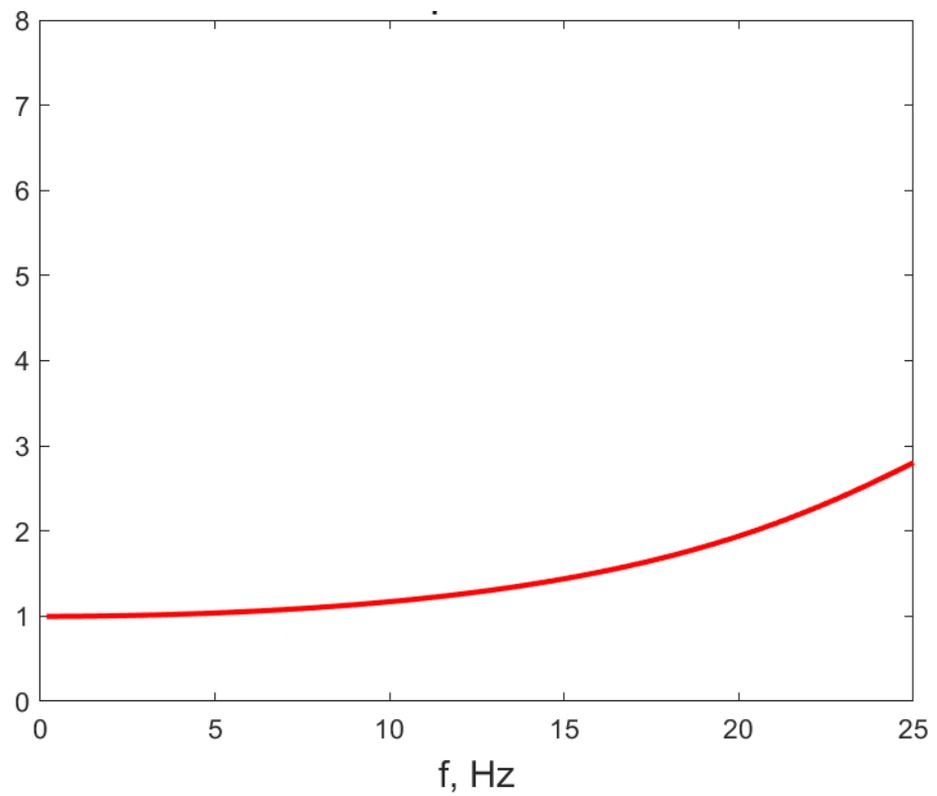
Водная

Рисунок П2.4. Спектральная характеристика участка Водная

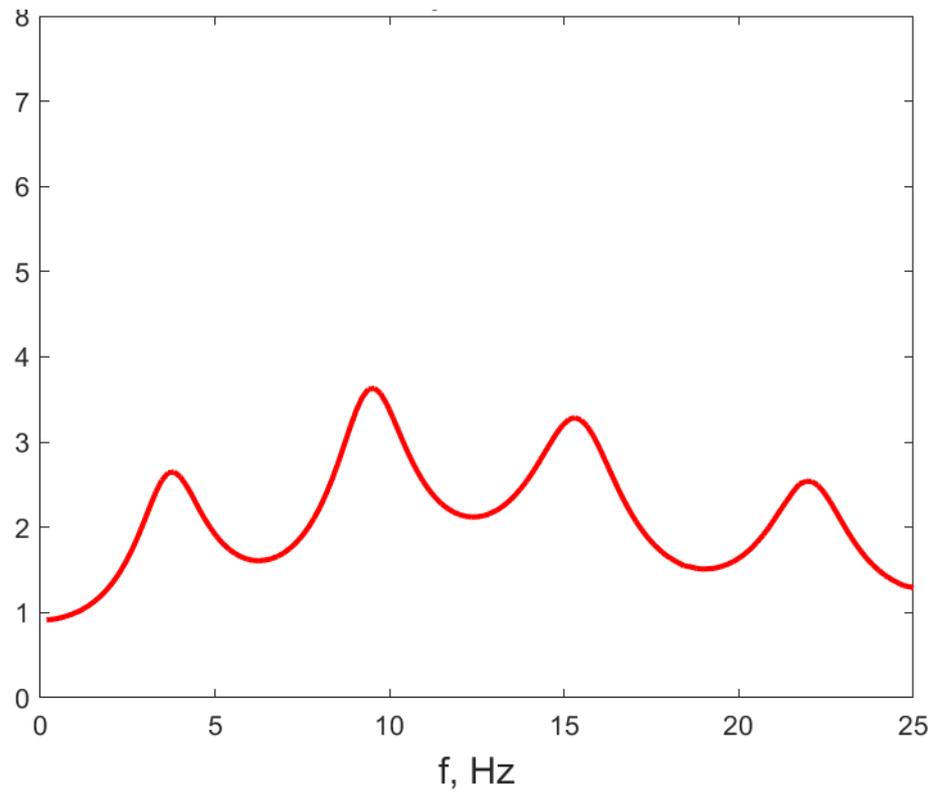


Рисунок П2.5. Спектральная характеристика участка Гадиева 1

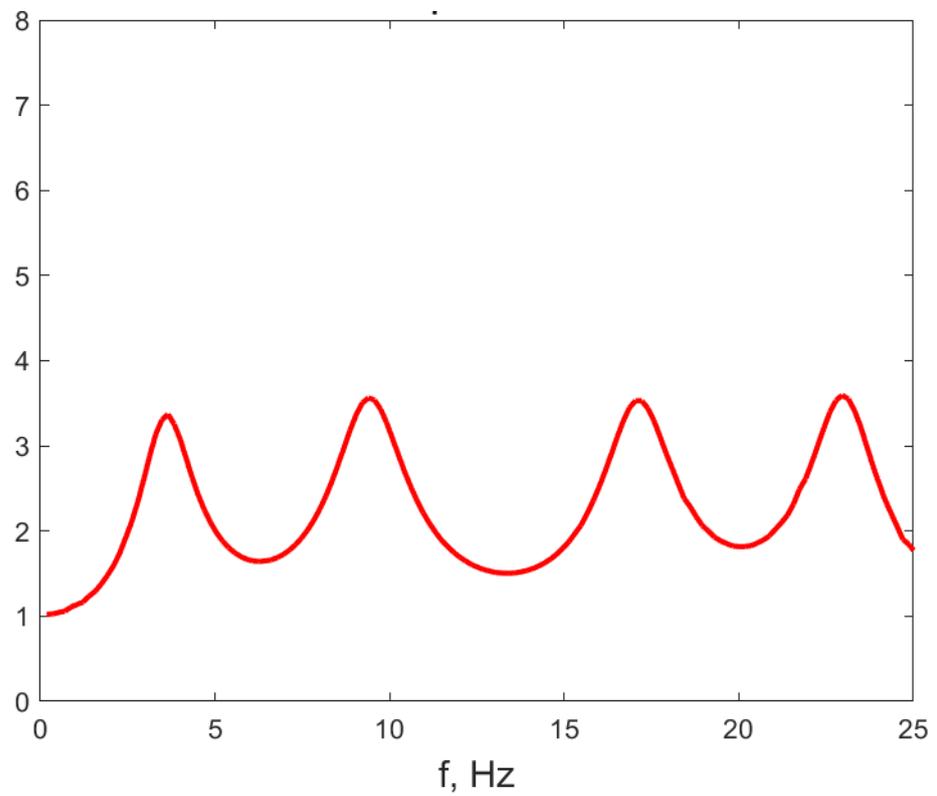
Гадиева 2

Рисунок П2.6. Спектральная характеристика участка Гадиева 2

Газоаппарат

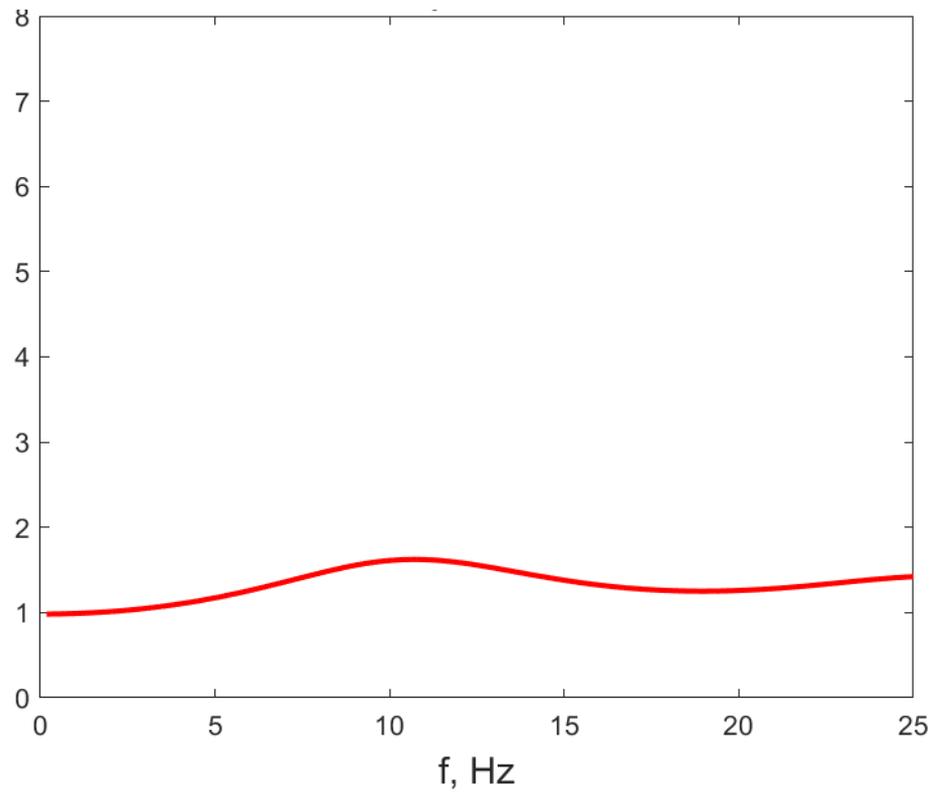


Рисунок П2.7. Спектральная характеристика участка Газоаппарат

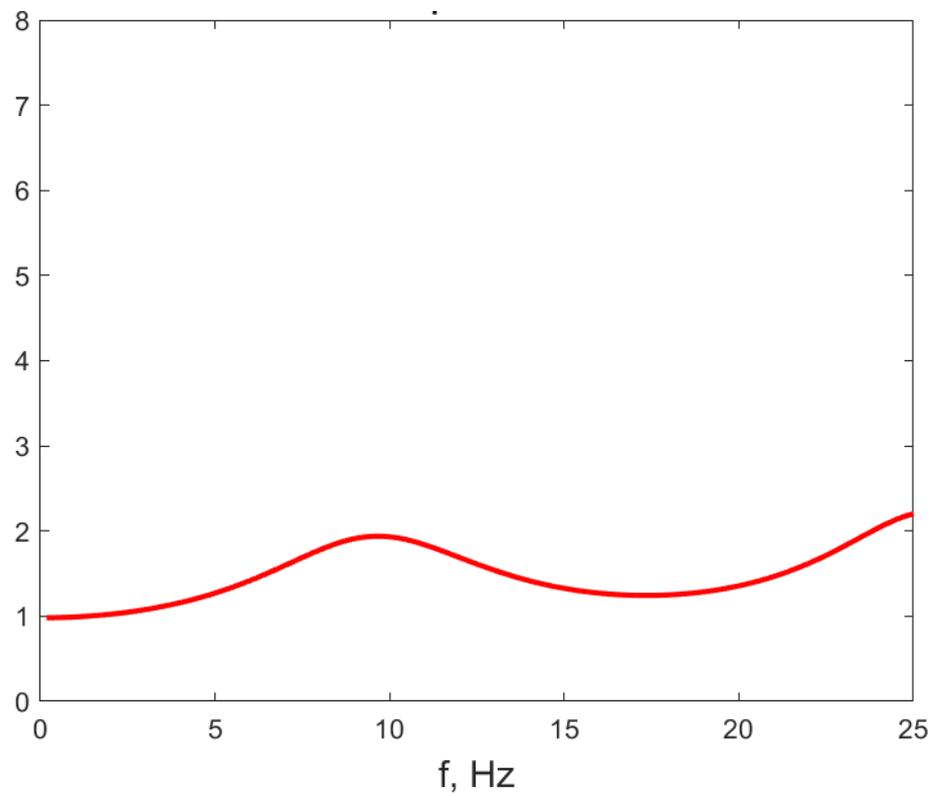
Галковского

Рисунок П2.8. Спектральная характеристика участка Галковского

Дарьял

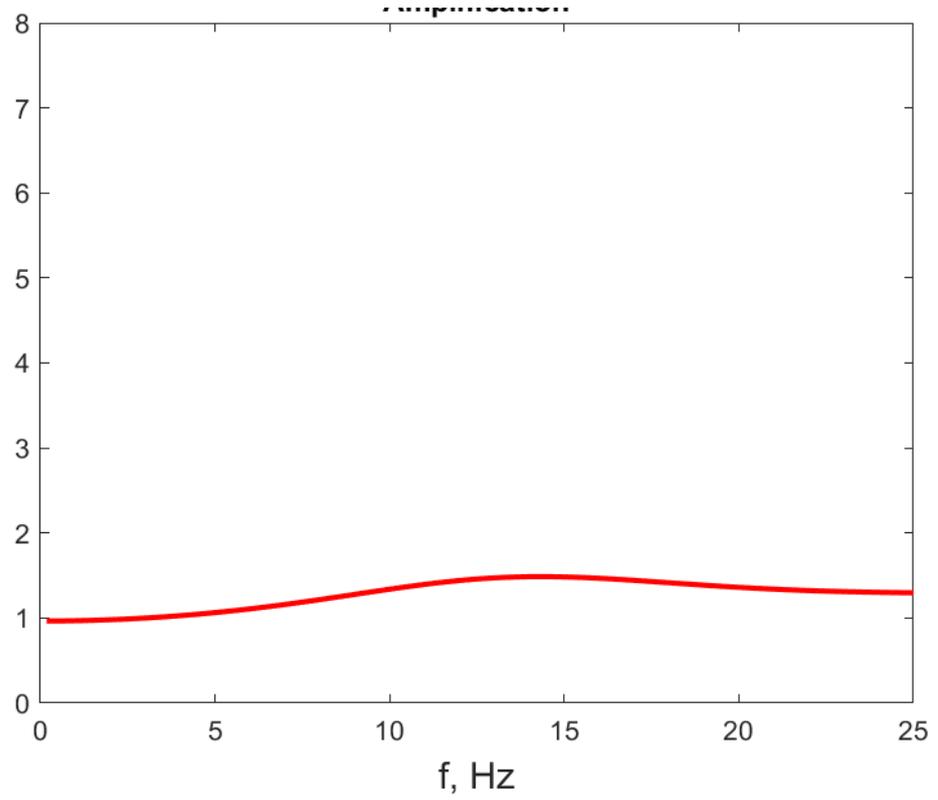


Рисунок П2.9. Спектральная характеристика участка Дарьял

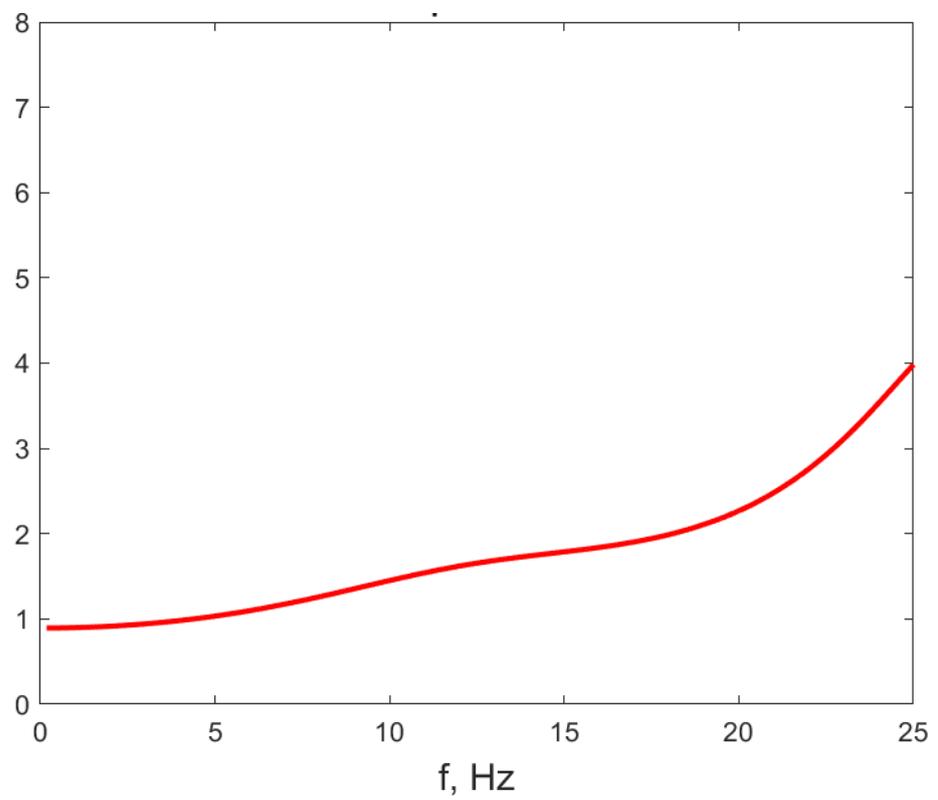
Дом печати

Рисунок П2.10. Спектральная характеристика участка Дом Печати

Карабулакская

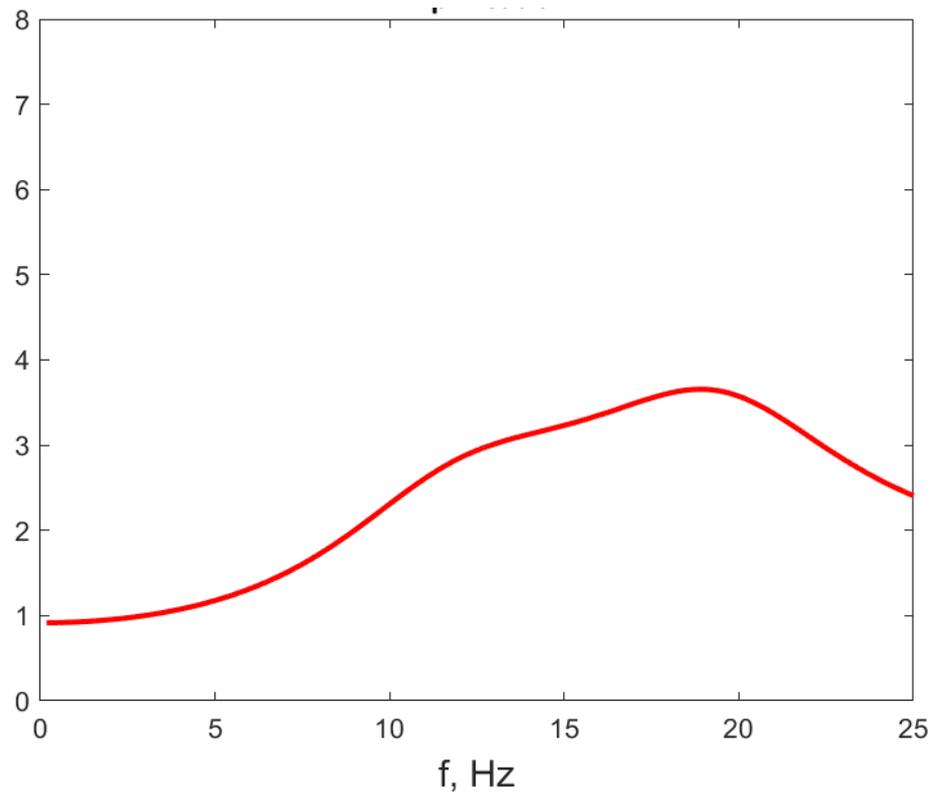


Рисунок П2.11. Спектральная характеристика участка Карабулакская
Карцинское шоссе

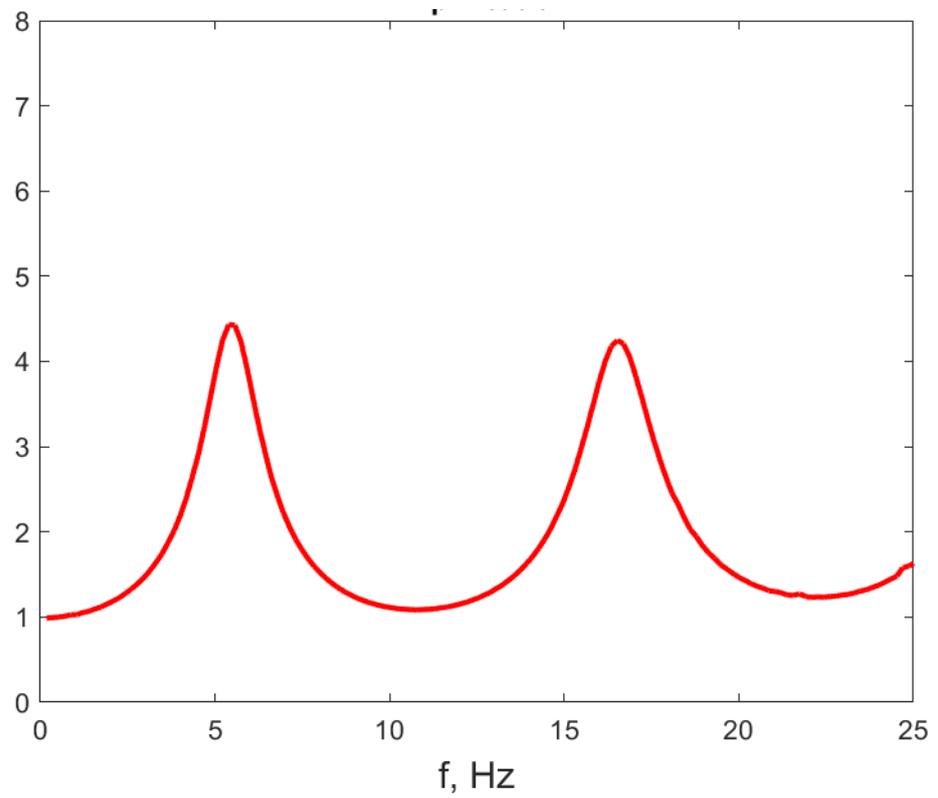


Рисунок П2.12. Спектральная характеристика участка Карцинское шоссе

Контакт

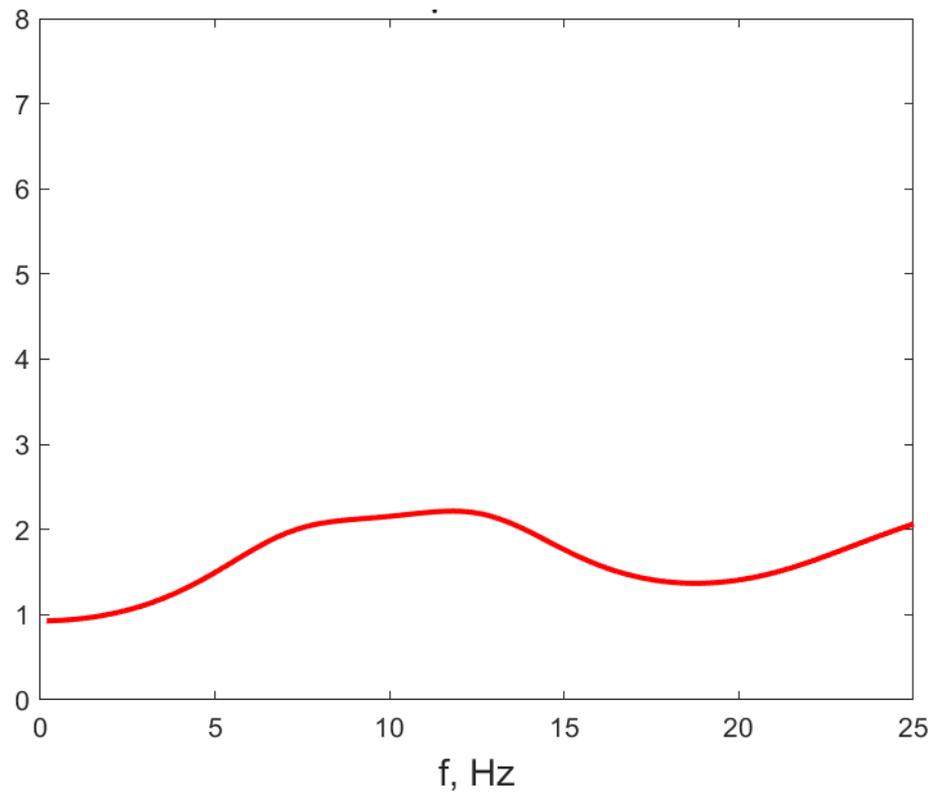


Рисунок П2.13. Спектральная характеристика участка Контакт

Кырджалийская

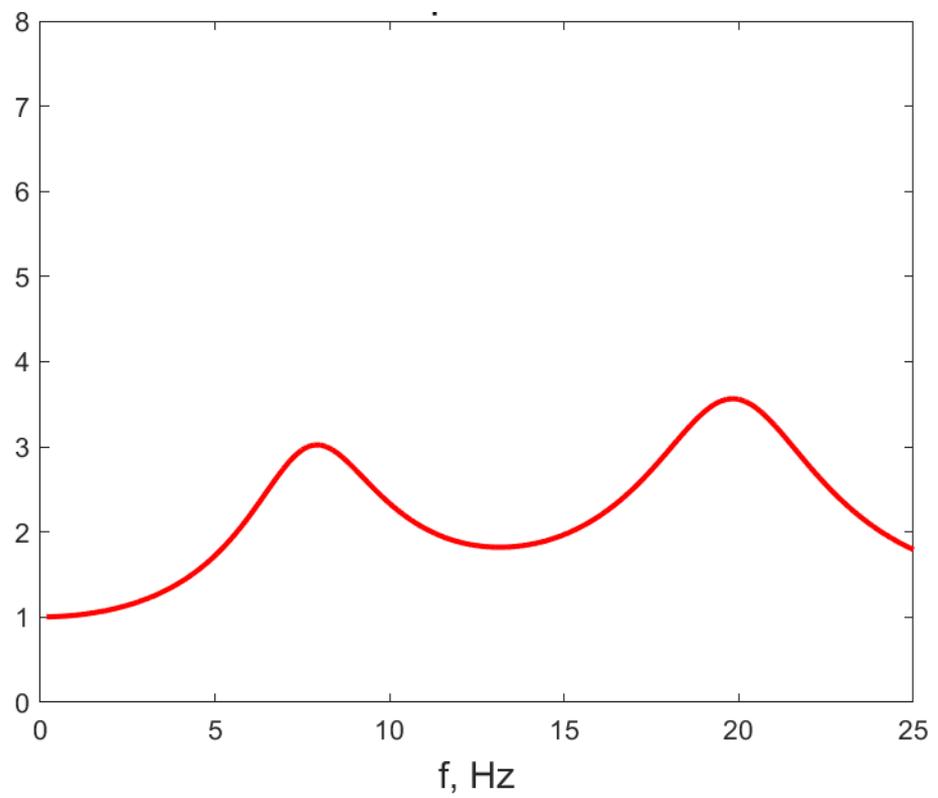


Рисунок П2.14. Спектральная характеристика участка Кырджалийская

Леваневского

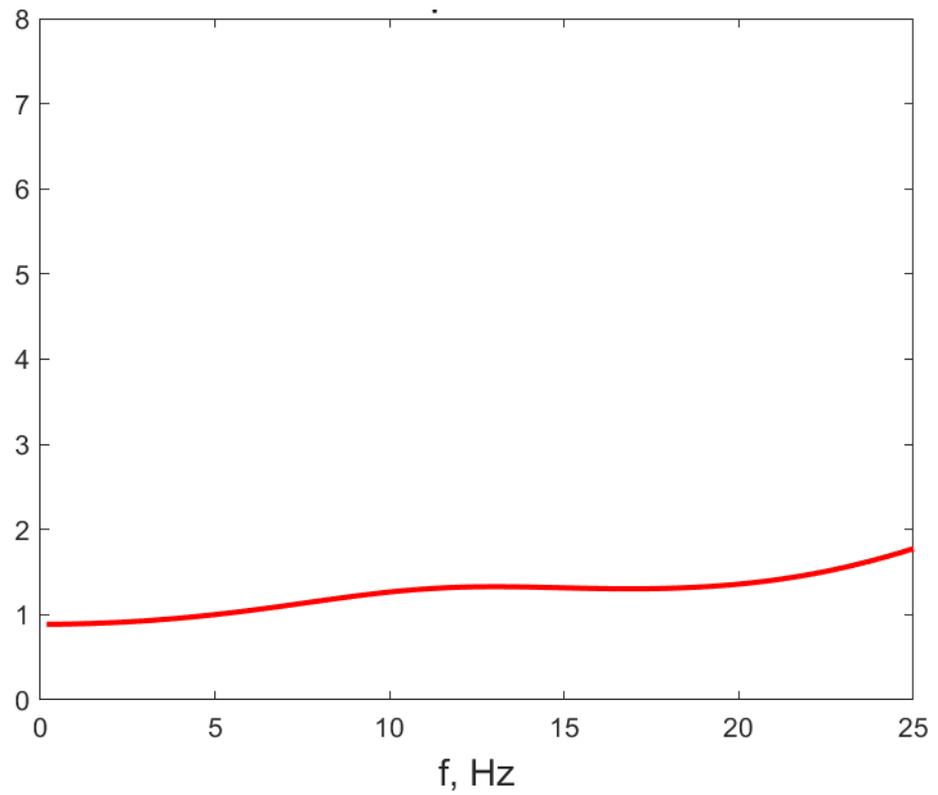


Рисунок П2.15. Спектральная характеристика участка Леваневского

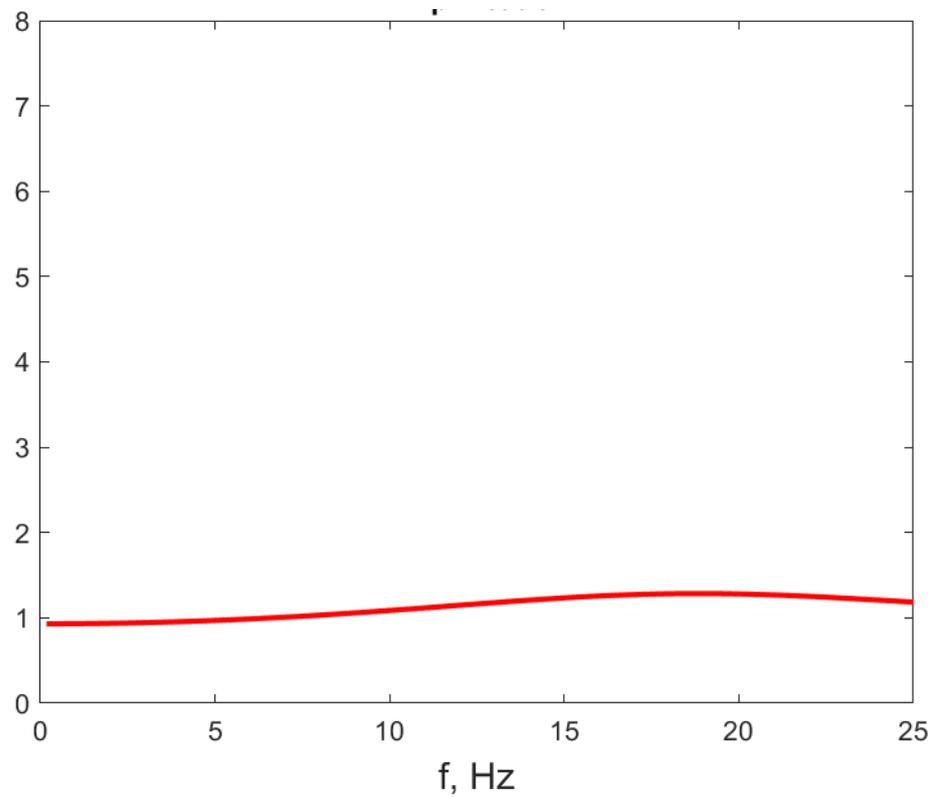
Металлург

Рисунок П2.16. Спектральная характеристика участка Металлург

Переезд

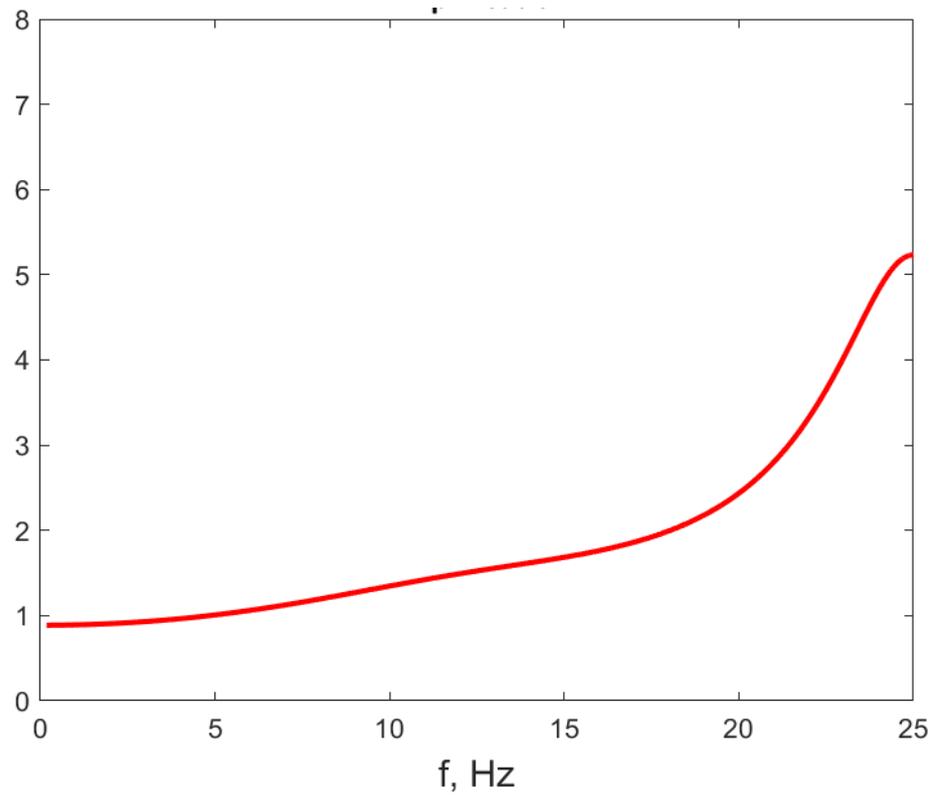


Рисунок П2.17. Спектральная характеристика участка Переезд

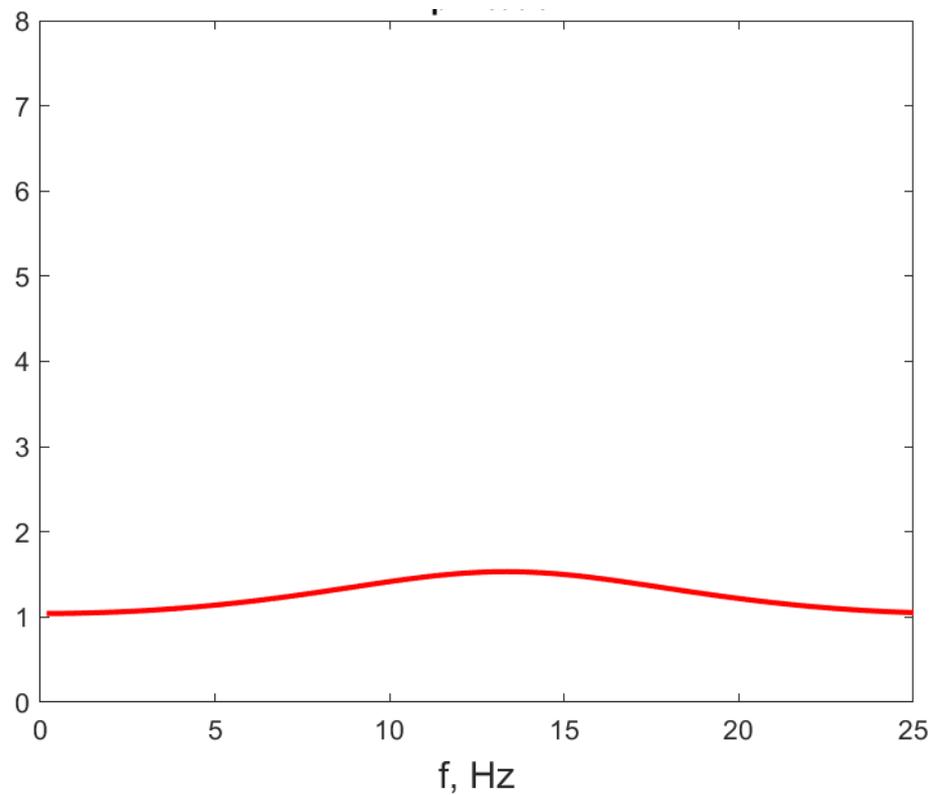
Пожарского

Рисунок П2.18. Спектральная характеристика участка Пожарского

Собачья балка

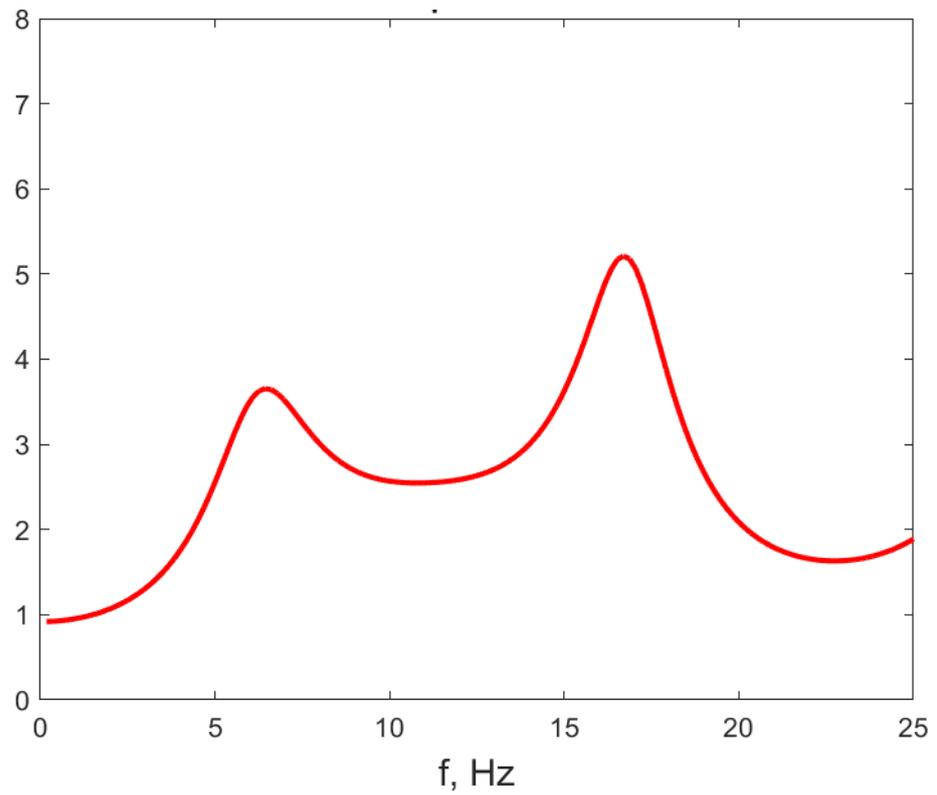


Рисунок П2.19. Спектральная характеристика участка Собачья Балка
СОГУ

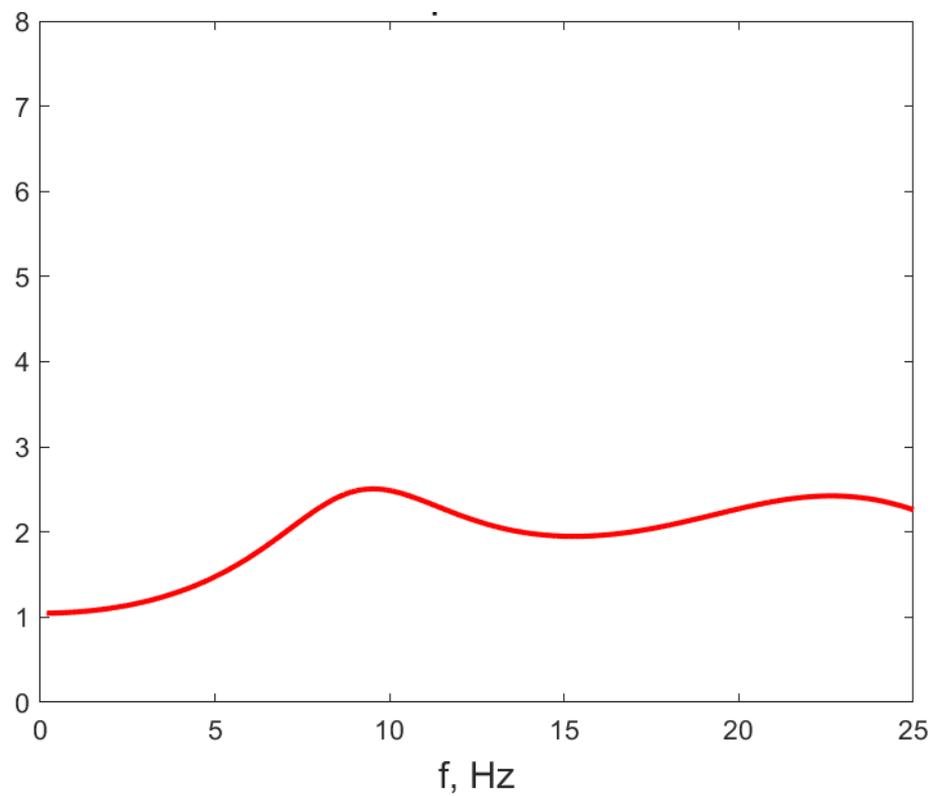


Рисунок П2.20. Спектральная характеристика участка СОГУ

Ставропольская

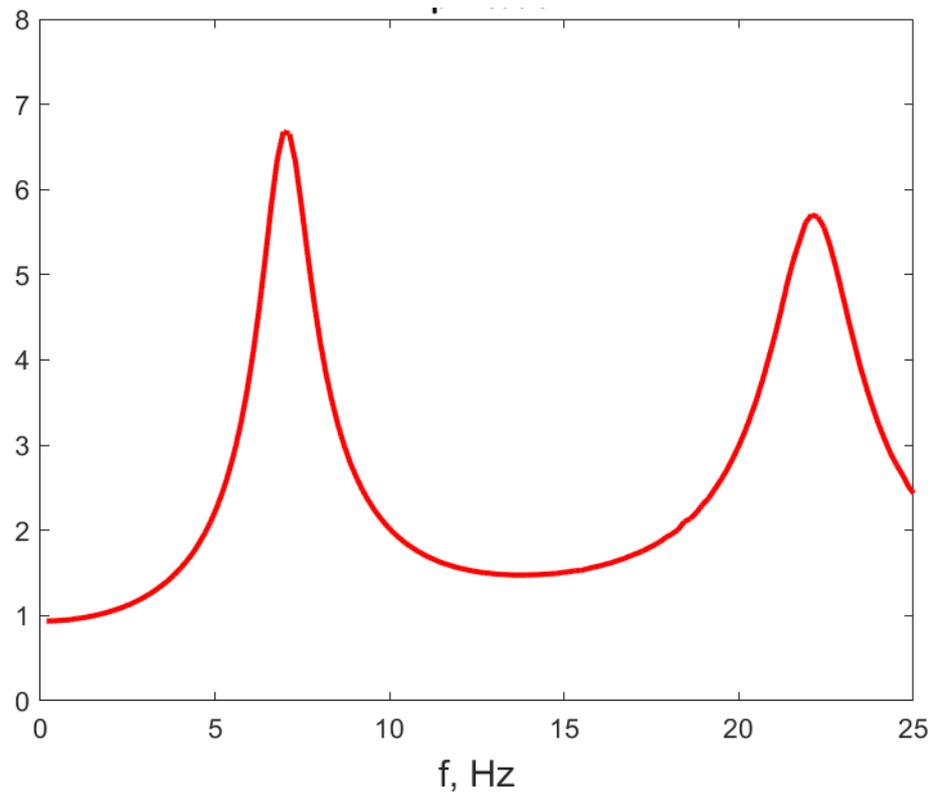


Рисунок П2.21. Спектральная характеристика участка Ставропольская
Тургеневская

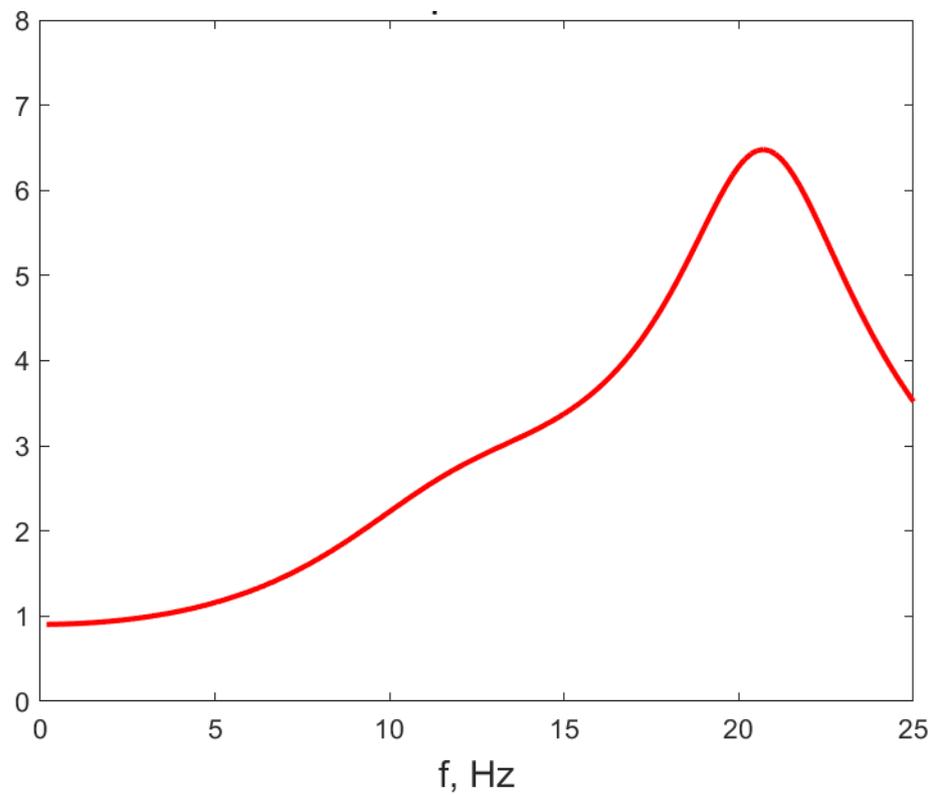


Рисунок П2.22. Спектральная характеристика участка Тургеневская

Учитель

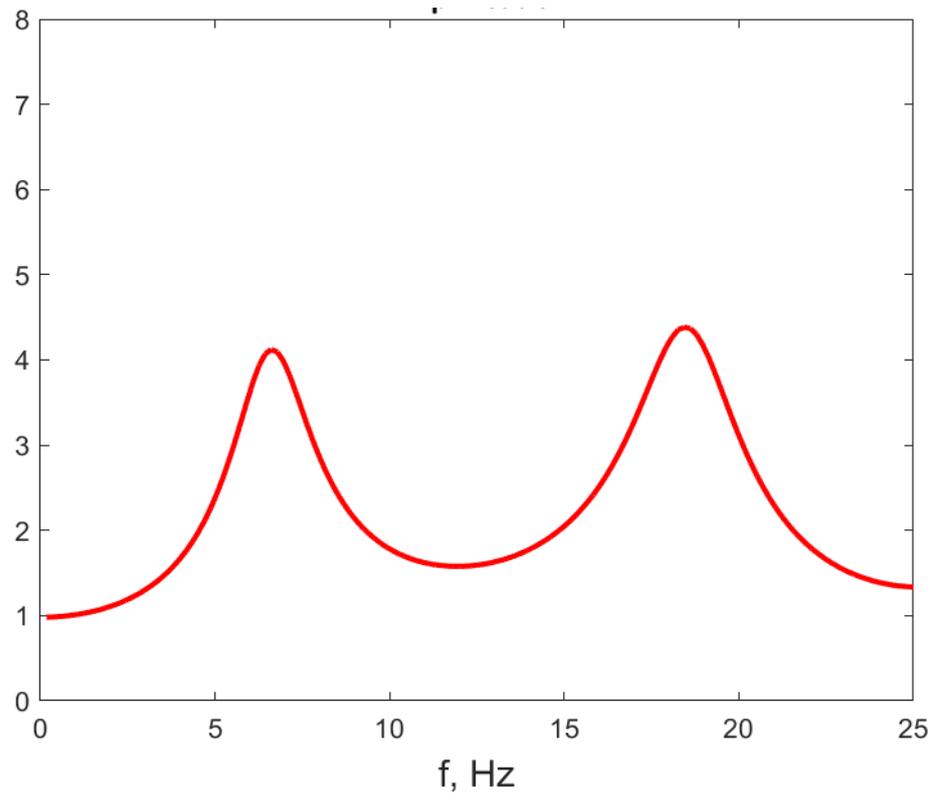


Рисунок П2.23. Спектральная характеристика участка Учитель
Чкалова

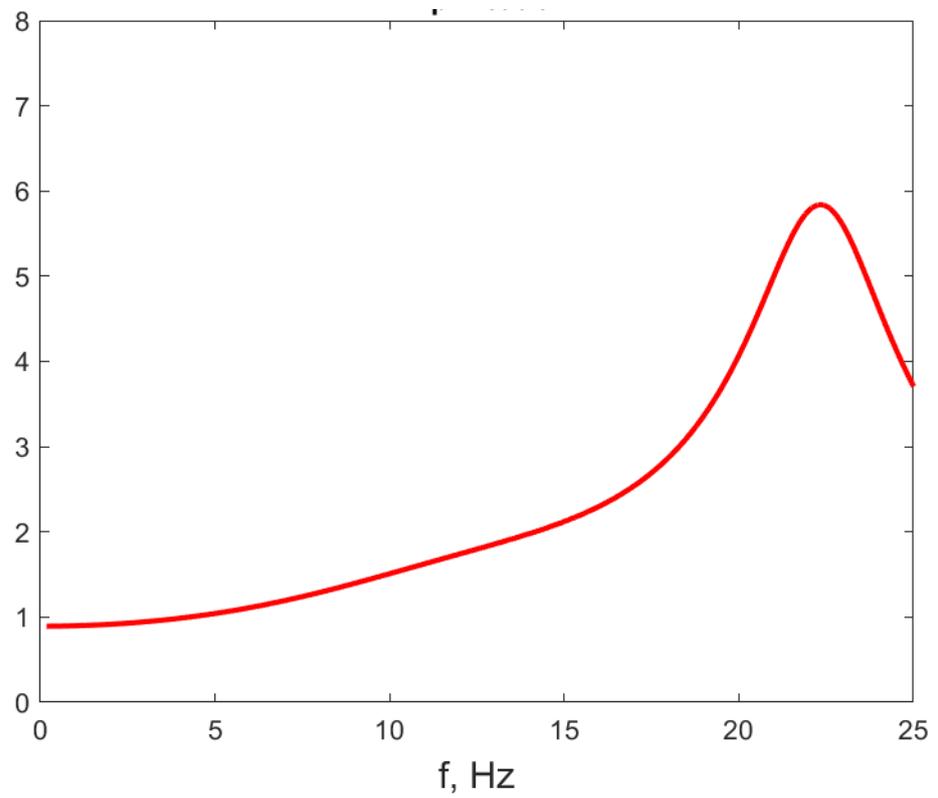


Рисунок П2.24. Спектральная характеристика участка Чкалова

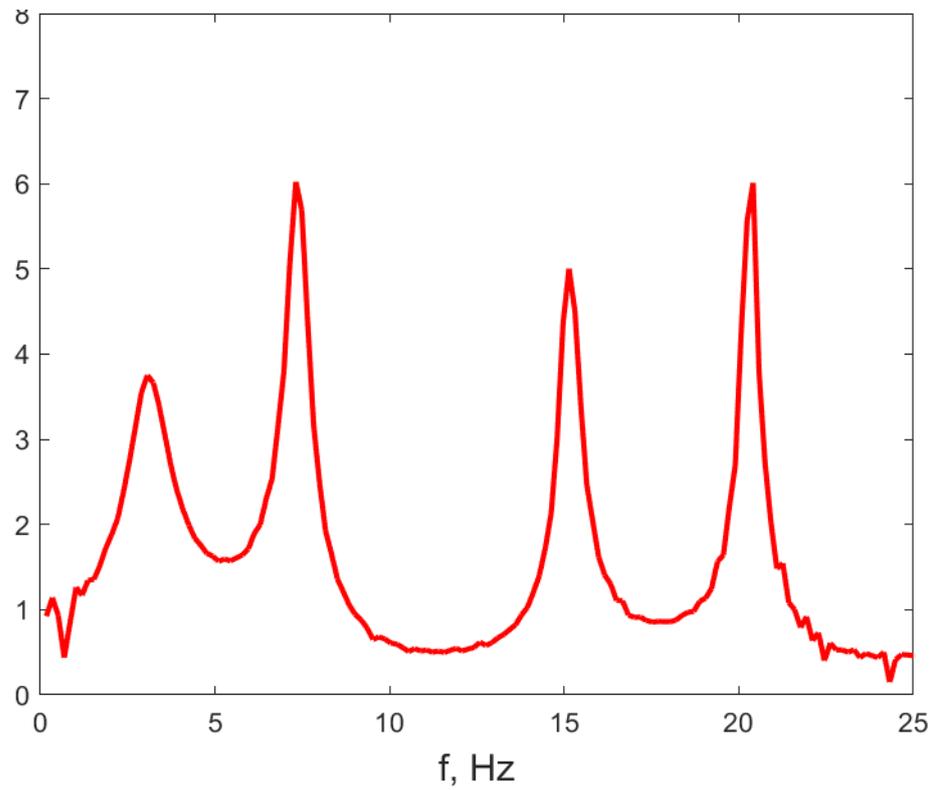


Рисунок П2.25. Спектральная характеристика участка HOL

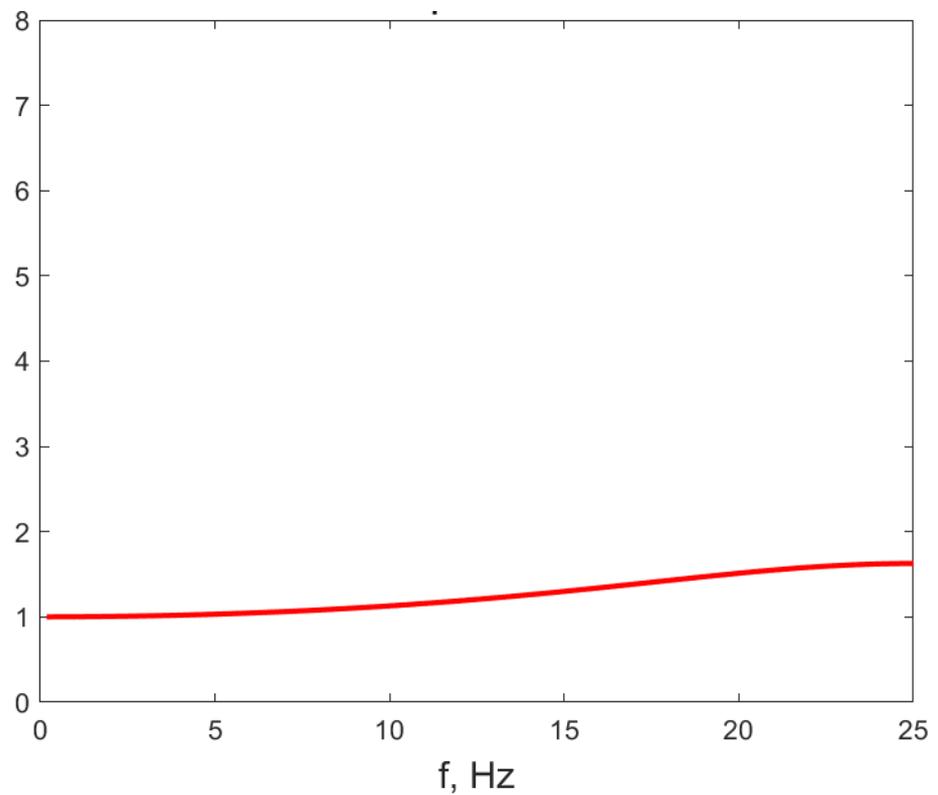
Ч. Баева

Рисунок П2.26. Спектральная характеристика участка Ч.Баева

Коцоева

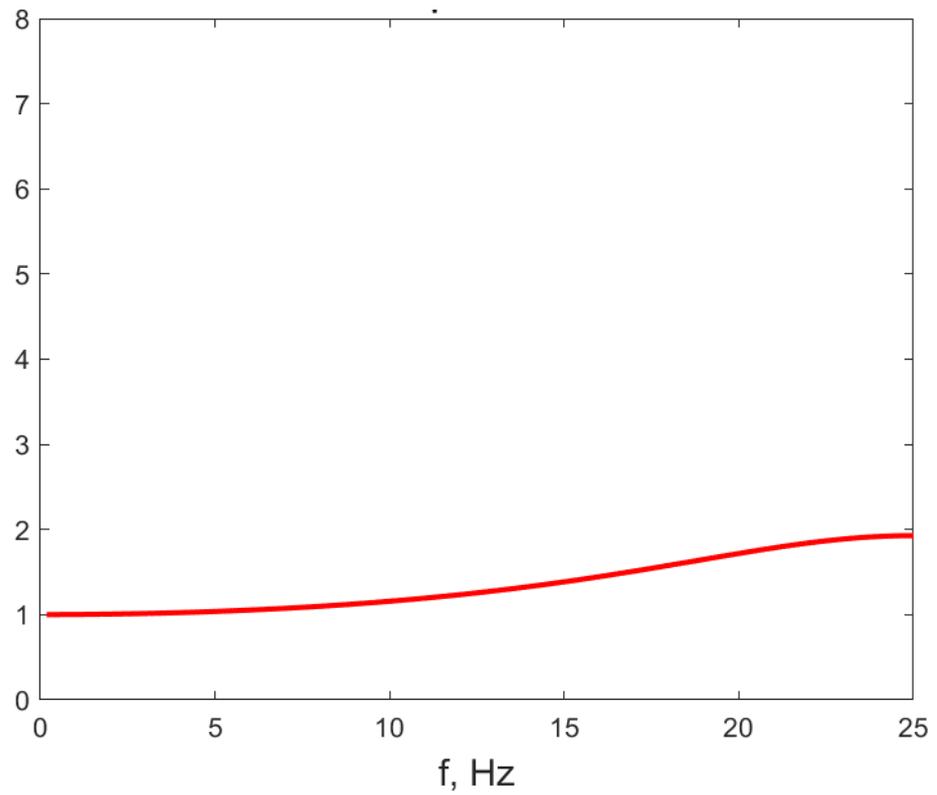


Рисунок П2.27. Спектральная характеристика участка Коцова

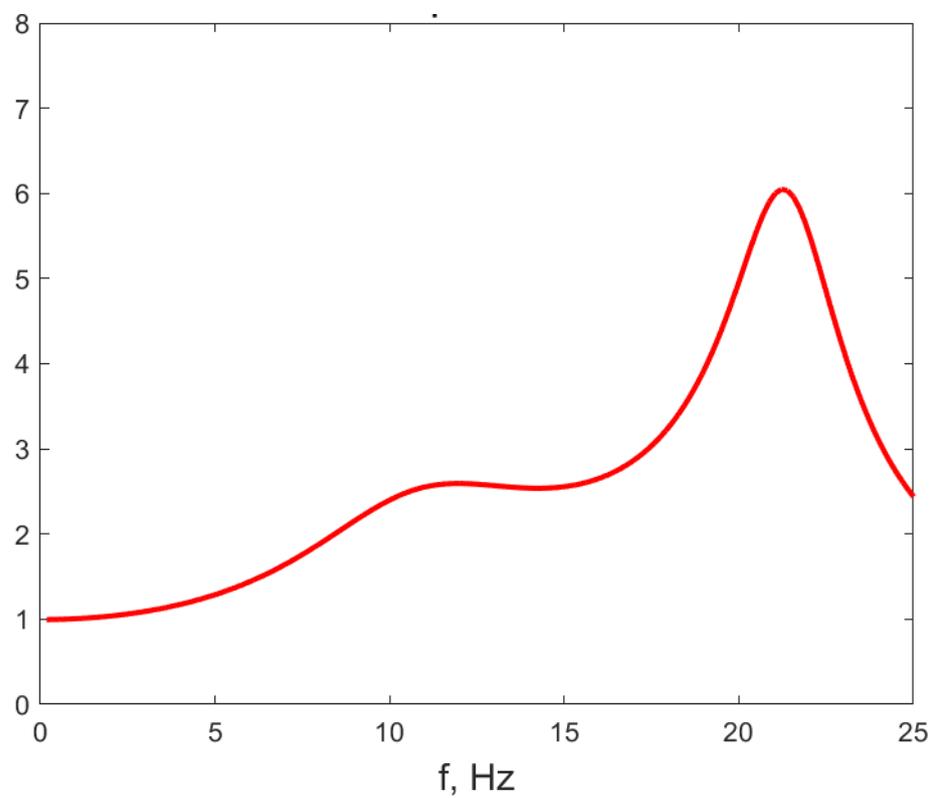
Дзусова

Рисунок П2.28. Спектральная характеристика участка Дзусова

Калоева

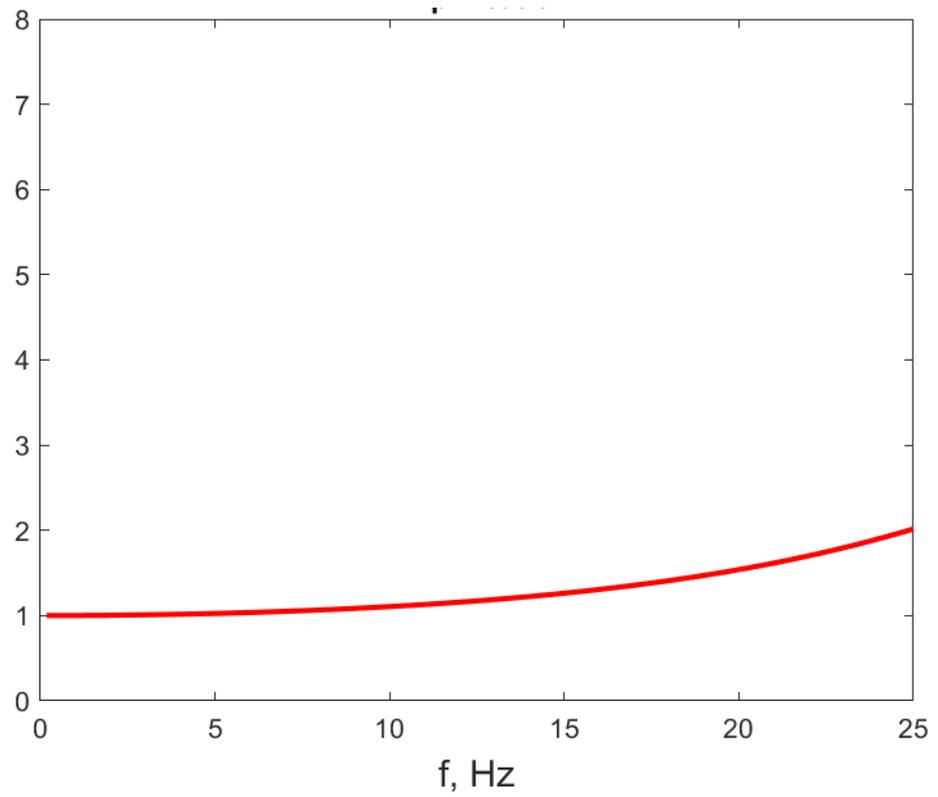


Рисунок П2.29. Спектральная характеристика участка Калоева

Леонова

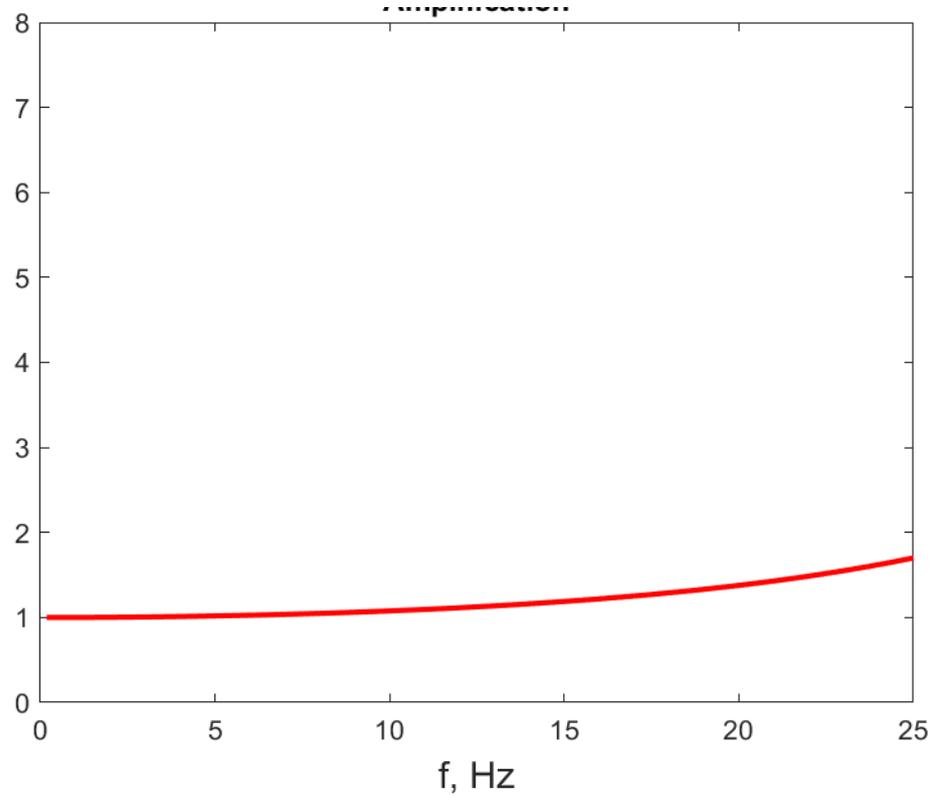


Рисунок П2.30. Спектральная характеристика участка Леонова

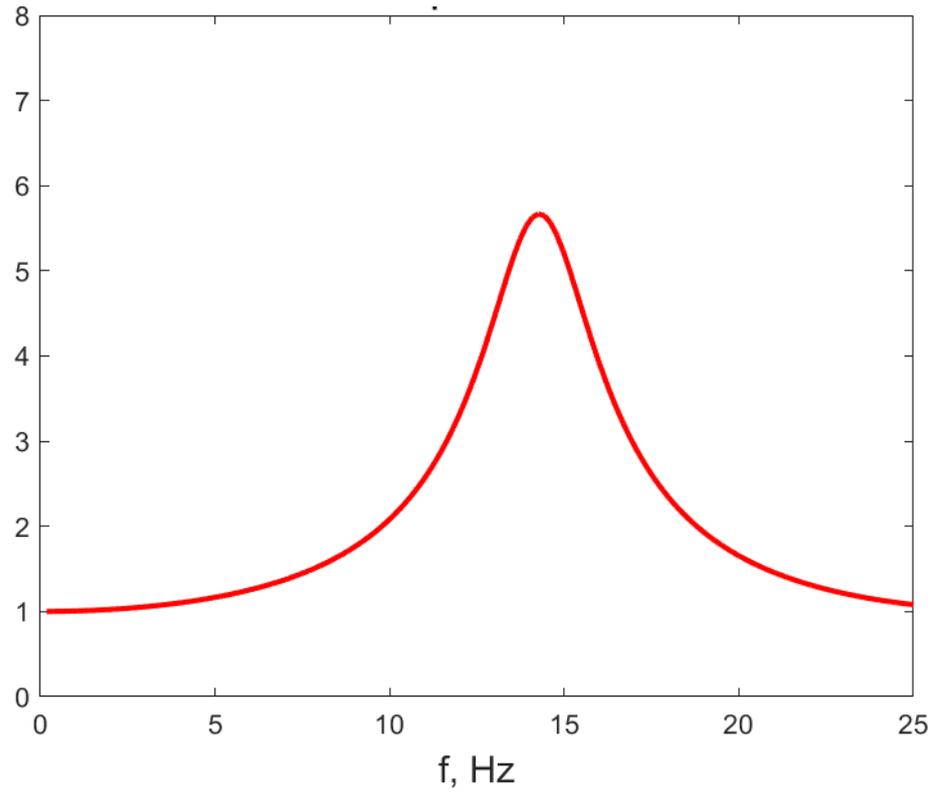
Николаева

Рисунок П2.31. Спектральная характеристика участка Николаева

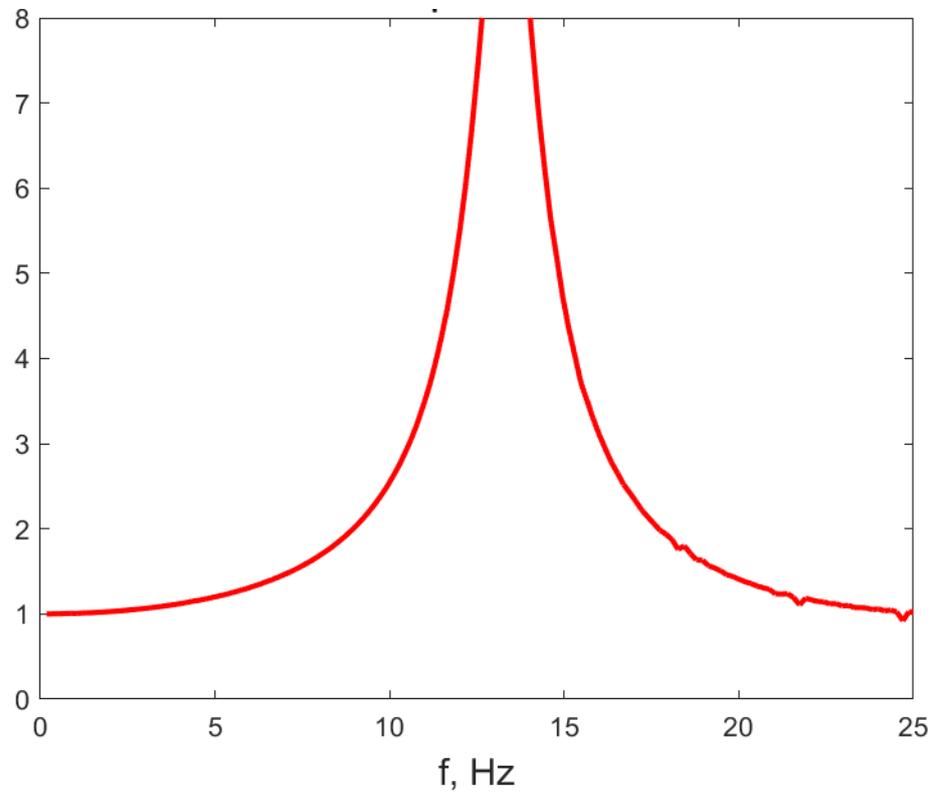
Огнева

Рисунок П2.32. Спектральная характеристика участка Огнева

Тельмана

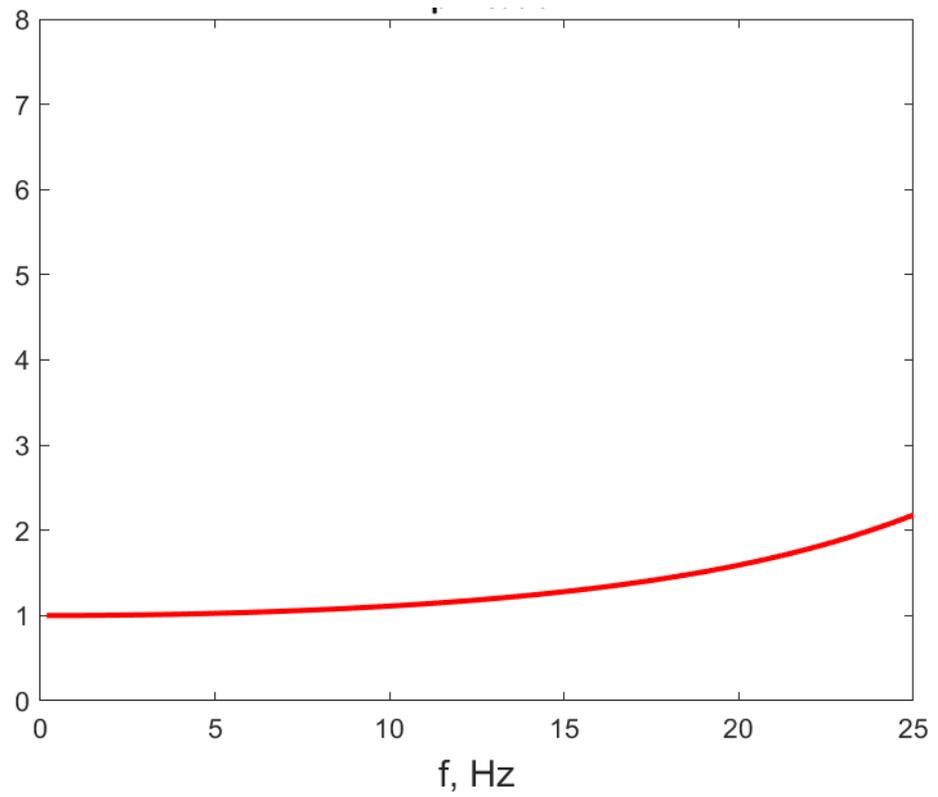


Рисунок П2.33. Спектральная характеристика участка Тельмана

Тамаева

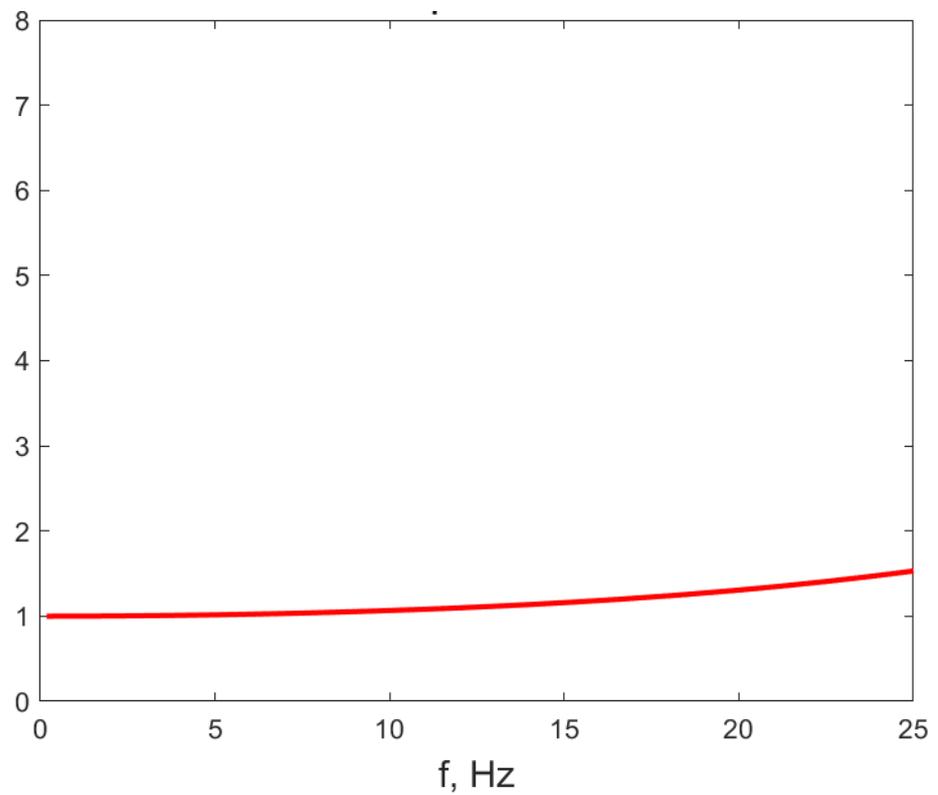


Рисунок П2.34. Спектральная характеристика участка Тамаева

Храм Александра Невского

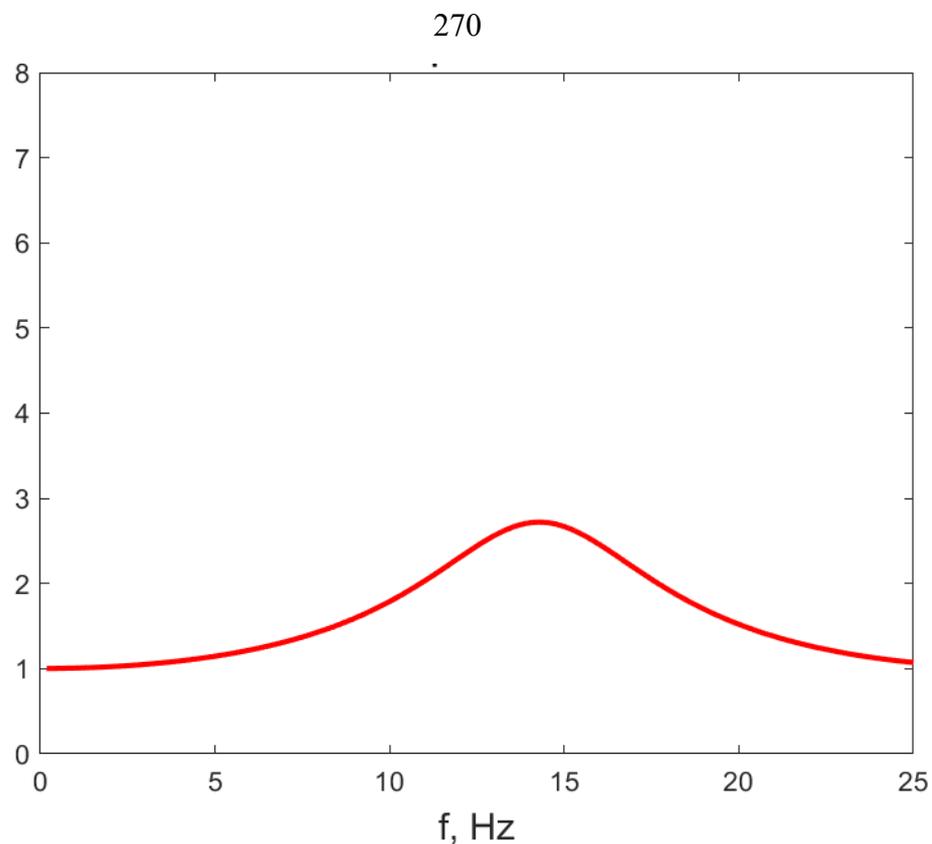


Рисунок П2.35. Спектральная характеристика участка Храм Александра
Невского
Астана Кесаева

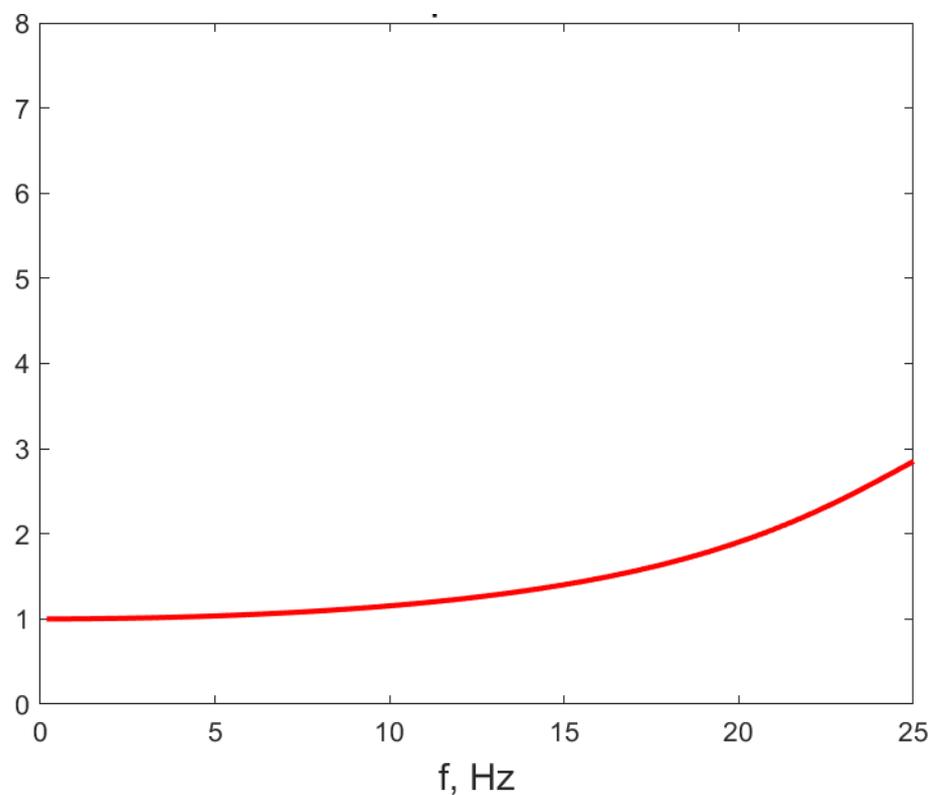


Рисунок П2.36. Спектральная характеристика участка Астана Кесаева
Весенняя

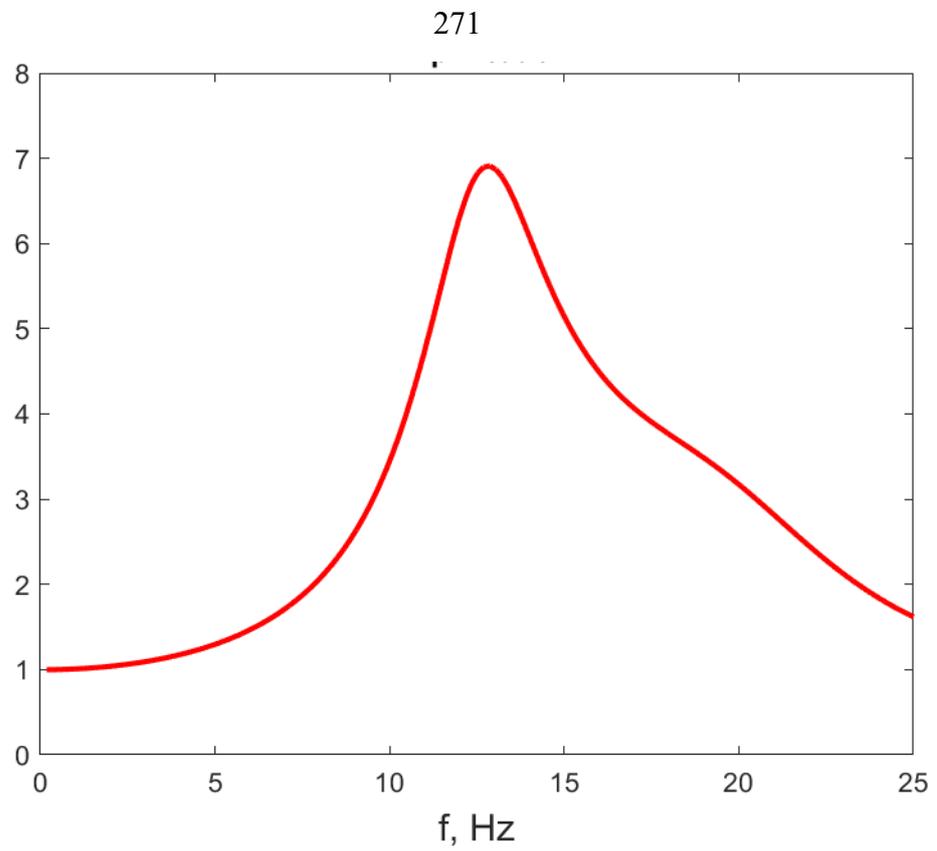


Рисунок П2.37. Спектральная характеристика участка Весенняя
Доватора

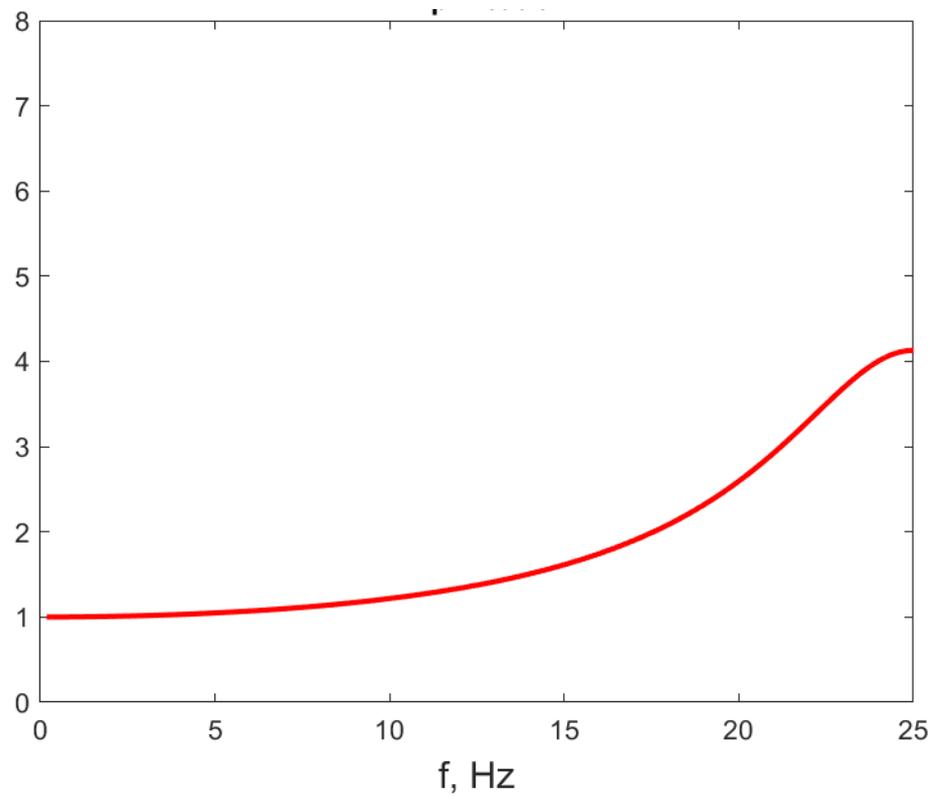


Рисунок П2.38. Спектральная характеристика участка Доватора

Училище

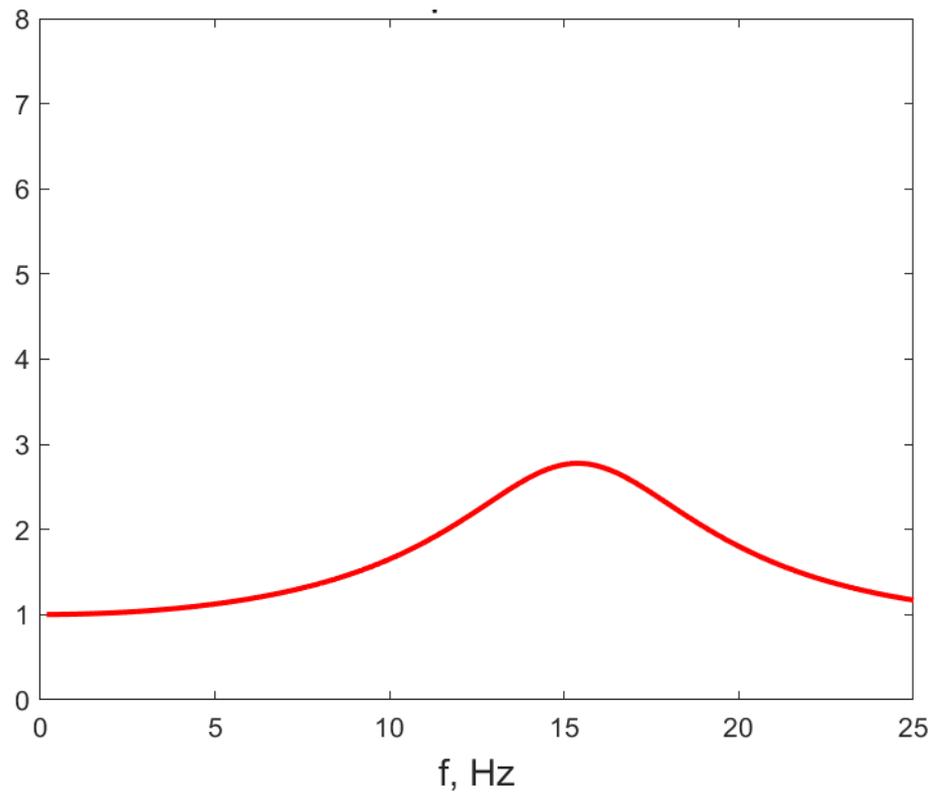


Рисунок П2.39. Спектральная характеристика участка Училище
Кадырова / Московское

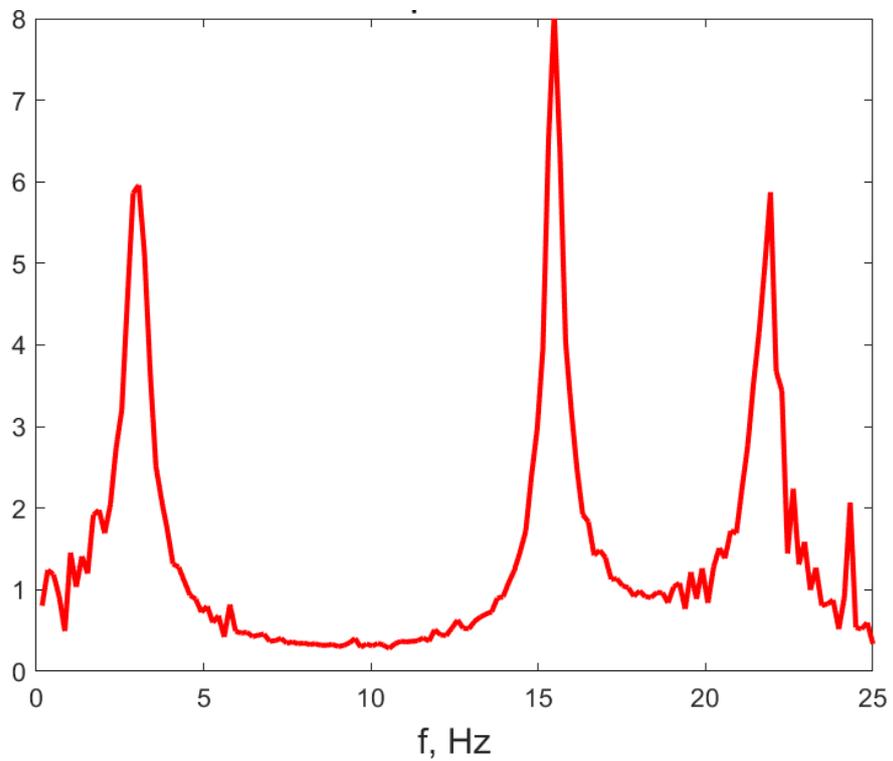


Рисунок П2.40. Спектральная характеристика участка
Кадырова/Московская..

Спартак

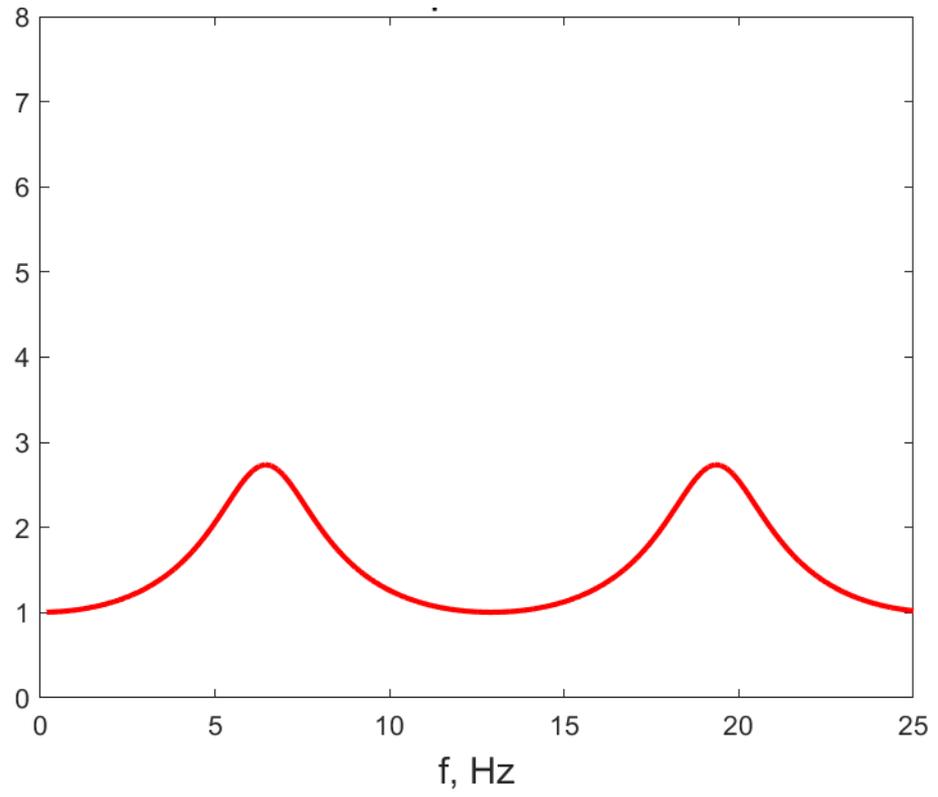


Рисунок П2.41. Спектральная характеристика участка Спартак

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

**ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СЕЙСМИЧЕСКОМУ
МИКРОРАЙОНИРОВАНИЮ НА ОСНОВЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ
МЕРЫ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ И УЧЕТА
ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ (РЕАКЦИИ РАЗЛИЧНЫХ
ОБЪЕКТОВ И ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НА
СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ)**

**Практические рекомендации по сейсмическому микрорайонированию
на основе инструментальной меры сейсмической интенсивности и
учету геоэкологических процессов (реакции различных объектов и
инженерно-геологических комплексов на сейсмические воздействия)**

Содержание

Введение	277
Создание пополняемой унифицированной базы данных изысканий и соответствующей цифровой карты инженерно-геологического районирования.....	278
Создание набора акселерограмм для зон ВОЗ территории, учитывающих вариации основных параметров	279
Расчет приращений сейсмической интенсивности	280
Определение приращений интенсивности по формуле жесткостей.....	280
Определение приращений интенсивности с помощью способа МОВ	285
Формулы расчета приращений сейсмической интенсивности для слабых землетрясений, взрывных источников и по соотношениям ШСИ-2017	290
Формулы расчета сейсмической интенсивности на основе инструментальной меры по данным сети knet.....	295
Различия полученных результатов с данными карты СМР. Дисперсия как характеристика грунтовых условий	296
Выделение зон с различной сейсмичностью	302
Заключение.....	306

Введение

Данные рекомендации обобщают опыт специальных инженерно-сейсмологических работ, выполнявшихся в порядке научного сопровождения различных объектов на Северном Кавказе, при проведении которых использовались последние нормативные документы по сейсмостойкому строительству и стратегия цифровой трансформации ключевых отраслей экономики РФ.

Технологическое развитие последних 20 лет нашло отражение в реализации алгоритмов реализации изысканий и оценки параметров сейсмических воздействий. В практике стали использоваться дробные значения сейсмической интенсивности, что потребовало обоснования. Принятие новой шкалы сейсмической интенсивности ШСИ-2017 [ГОСТ Р 57546-2017], несмотря на ее практически кажущееся совпадение с MSK-64, явилось важным шагом к переходу к шкале интервалов, позволяющей производить математические операции с интенсивностями, а именно рассчитывать приращения. Мы не можем не отметить тот факт, что именно близость шкалы MSK к «физической» равномерной шкале, стало важным фактором развития отечественной школы сейсмического микрорайонирования.

В ШСИ-2017 впервые введены и формализованы такие категории объектов-индикаторов, как транспортные и подземные сооружения. Важность и практическая ценность данного нововведения не столько в уточнении макросейсмических последствий, сколько в оценке потенциальных рисков в комплексе решаемых геоэкологических задач. Известно, что при проявлении нелинейных явлений в слабых грунтах наблюдается уменьшение ускорений на поверхности, однако в толще деформации могут быть значительными. Ярким примером является Нортриджское землетрясение (1994). Методология позволяет оценивать количество повреждений на 1 погонный км транспортных сооружений и коммуникаций.

Некоторые из коэффициентов, несомненно, потребуют дальнейшего уточнения. В нашей работе развита идея использования нескольких параметров для инструментальной оценки сейсмической интенсивности.

Весь комплекс работ по сейсмическому микрорайонированию рассмотрен на примере территории г. Владикавказа. Представление среды как совокупности инженерно-геологических элементов (ИГЭ) потребовало введения понятия слоистости среды, включающего интегральный эффект числа слоев и их контрастности. Поскольку на практике используется средневзвешенная скорость поперечных сейсмических волн, логично дополнить данный параметр отклонением от среднего. Разработаны

методические основы оценки состояния грунтовой толщи по критерию дисперсии и на ее основе введены поправки в распределение зон по сейсмическим свойствам. Поправки к величинам интенсивности рассчитывались в форме доверительных интервалов, которые подтверждаются инструментальными данными (наличие просадочных грунтов) и обуславливают различный геоэкологический риск.

Математическое моделирование позволяет прогнозировать сейсмические воздействия при различном уровне грунтовых вод, многовариантный расчет позволяет на основе инженерно-гидрогеологических моделей и соответствующих прогнозов включить в модели сейсмических воздействий максимально возможные воздействия и воздействия на основе различной вероятности непревышения.

Интеграция в одном расчетном алгоритме региональных сеймотектонических особенностей (глубин очагов, механизмов очагов) с учетом их возможной вариации и реакции грунтовой толщи, а также вариации параметров ИГЭ, в первую очередь, скоростей поперечных волн и мощностей в связи с ограниченной точностью результатов изысканий, формирует новую цифровую методологию геолого-геоэкологических оценок состояния территории и разработки многофакторных сценариев последствий стихийных бедствий.

Создание пополняемой унифицированной базы данных изысканий и соответствующей цифровой карты инженерно-геологического районирования

Переход к цифровым технологиям, в первую очередь, предполагает представление данных в цифровой форме. Это относится как к картографическим данным, так и к исходным данным, на основе которых осуществляется данная интерпретация. Такая взаимосвязь данных и автоматизация алгоритмов позволяет производить уточнение инженерно-геологических основ в процессе получения данных по новым объектам. Данная концепция реализована для территории г. Владикавказа.

Классическая схема проведения работ по сейсмическому микрорайонированию (СМР) предполагает выделение типичных грунтовых условий согласно имеющейся карте инженерно-геологического районирования территории. Таким образом, данная карта предполагается априори детерминированной. Однако практический опыт проведения работ по СМР показал, что не всегда обозначенные границы распространения тех или иных грунтовых комплексов соответствуют реальным границам или они попросту отсутствуют.

При проведении работ на территории г. Владикавказа в 2009–2014 гг. было выделено 26 участков сейсморазведочных работ, распределенных по территории города и

охватывающих различные типы грунтовых условий, согласно карте-схеме инженерно-геологического районирования (Рисунок 1). В процессе районирования площадок отдельных объектов на территории города в 2015–2023 гг. и внесения в единую базу данных ГФИ ВНЦ РАН число участков было увеличено до 41.

Необходимо отметить, что, если бы результаты всех изыскательских работ, проведенных на территории РСО-А, вводились в единую базу данных, число участков было бы на порядки больше.

Создание моделей участков территории (и в перспективе трехмерных инженерно-геологических моделей, аналогичных цифровым моделям рельефа) и алгоритмизация процессов расчетов сейсмических воздействий на поверхности грунтовой толщи, как в форме акселерограмм, так и в виде интегрального параметра в форме сейсмической интенсивности, позволяет производить уточнение по мере поступления новых данных и более эффективно решать геоэкологические задачи территории.

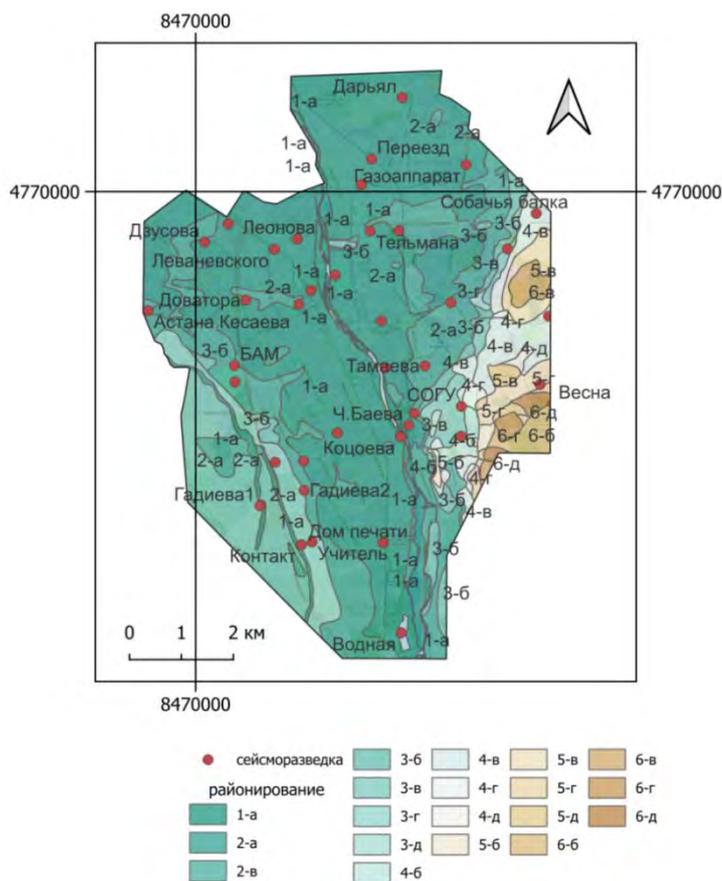


Рисунок ПЗ.1. Карта-схема инженерно-геологического районирования территории г. Владикавказа и расположение участков проведения сейсморазведочных работ

Создание набора акселерограмм для зон ВОЗ территории, учитывающих вариации основных параметров

Для генерирования сейсмических воздействий можно выделить два основных

метода:

- стандартные спектры [Аптикаев, 1981; Аптикаев, Эртелева, 2008];
- конечно-разломные модели [Beresnev, Atkinson, 1998; Гусев, 2013].

Первый метод основан на статистических данных о зависимости преобладающего периода, амплитуды колебаний и продолжительности от эпицентрального расстояния, глубины очага и магнитуды. Учет погрешностей вводится расширением частотного диапазона воздействия. В наших расчетах использовалась программа FINSIM [Beresnev, Atkinson, 1998].

Современные модели разломов позволяют непосредственно генерировать синтетическую акселерограмму для целого ряда параметров, большая часть которых требует уточнения (например slip rate), однако современные компьютерные технологии позволяют создать сколь угодно большой набор возможных реализаций сейсмического процесса при различном сочетании параметров.

Таким образом, отметим также интеграцию оценки сейсмической опасности регионального уровня и сейсмического микрорайонирования, когда не производится пересчет балла интенсивности в какой-либо параметр, а непосредственно по региональным данным моделируются синтетические акселерограммы «способа землетрясений». И в этом важную роль играет развитие численных методов моделирования колебаний верхней части разреза.

Расчет приращений сейсмической интенсивности

Определение приращений интенсивности по формуле жесткостей

В соответствии с региональными строительными нормами метод сейсмических жесткостей обязателен для применения как основной на объектах сейсмического микрорайонирования всех классов [Республиканские ..., 1986].

Приращение балльности определяется с помощью известной формулы С.В. Медведева [Заалишвили, 2000; Рекомендации ..., 1985]:

$$\Delta I = 1,67 \lg \frac{\rho_0 v_0}{\rho_i v_i}, \quad (1)$$

где $\rho_0 v_0$ и $\rho_i v_i$ – сейсмические жесткости эталонного и исследуемого грунтов соответственно.

Применение формулы Медведева к территории г. Владикавказа позволило построить карту-схему приращений сейсмических интенсивностей (Рисунок 2).

Результаты расчета приращений интенсивности по формуле сейсмических жесткостей приведены в таблице 1.

Для грунтовых толщ, включающих в себя несколько слоев, характеризующихся различными значениями скоростей упругих волн и плотностей, вычисляется средняя скорость и средневзвешенное значение плотности [Республиканские ..., 1987; Рекомендации ..., 1985]:

$$\bar{v} = \frac{H}{\sum \frac{h_i}{v_i}}, \quad (2)$$

$$\rho_{св} = \frac{\sum \rho_i h_i}{H}, \quad (3)$$

где $H = \sum h_i$ – мощность расчетной толщи;

v_i – пластовая скорость в i -ом слое;

h_i – мощность i -го слоя.

При проведении более ранних работ по сейсмическому микрорайонированию территории центральной части г. Владикавказа [Заалишвили и др., 2007] для средних грунтовых условий были определены следующие характеристики грунтовой толщи: скорость распространения поперечных сейсмических волн $v_s=220$ м/с и плотность $\rho=1,85$ т/м³, что, в целом, соответствует типичным параметрам эталонного грунта. Так, согласно РСН 60–86 значения параметров эталонного грунта составляют в среднем: $v_s=250–350$ м/с и $\rho = 1,7–1,8$ т/м³ (п. 5.1., РСН 60-86).

В результате обобщения результатов исследований, выполненных для всей территории города, для средних грунтовых условий приняты следующие характеристики:

$v_s=350$ м/с и $\rho = 1,85$ т/м³.

Приращение интенсивности или балльности относительно участка со средними грунтовыми условиями составит (после округления):

– для глинистых грунтов текучей консистенции $\Delta I = + 1$ балл;

– для суглинков п/ТВ консистенции и галечников с заполнителем $>30\%$ $\Delta I = 0$ баллов;

– для галечников с заполнителем $<30\%$ $\Delta I = -1$ балл.

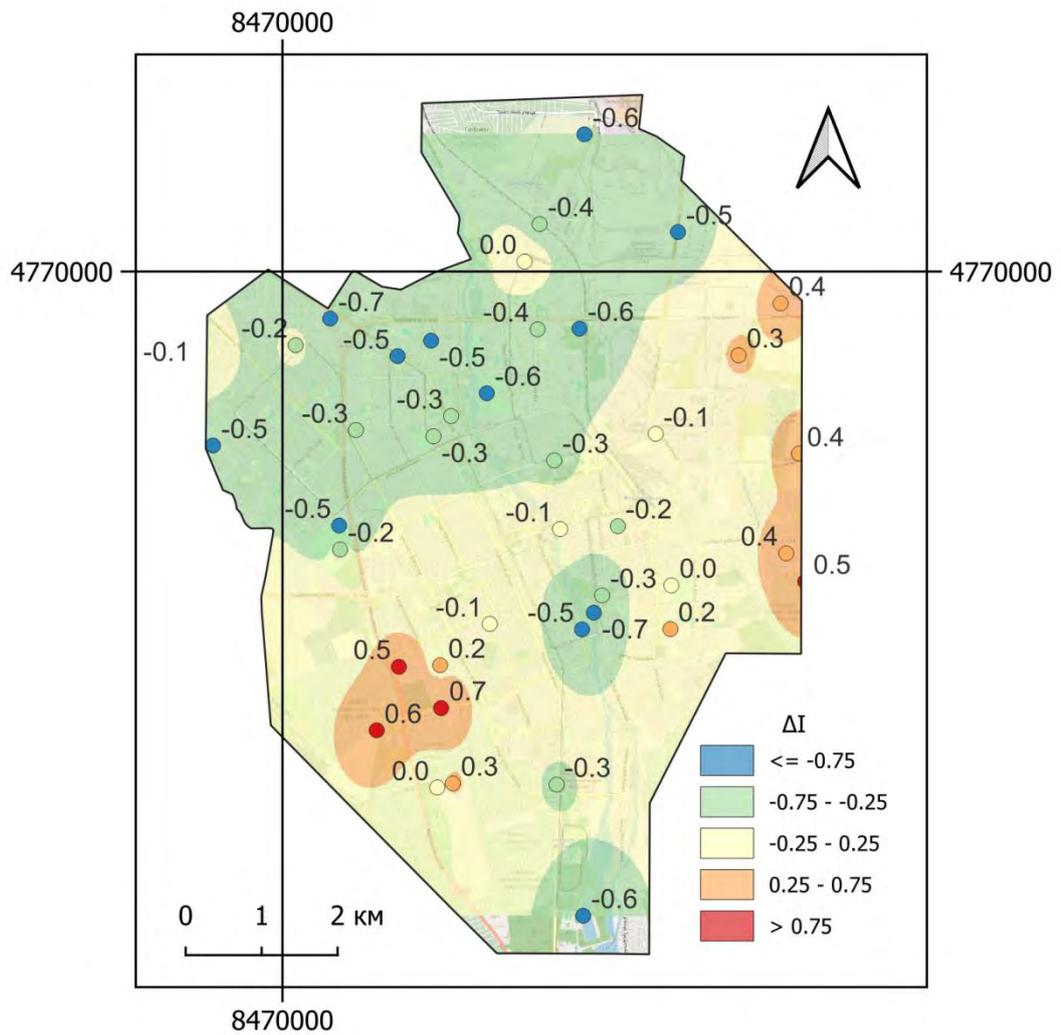


Рисунок ПЗ.2. Результаты расчетов приращений сейсмической интенсивности по формуле С.В. Медведева

Таблица ПЗ.1. – Расчет приращений интенсивности по формуле сейсмических жесткостей

№№п/п	Пункт	$\rho_{\text{ср.}} \cdot \text{т/м}^3$	$V_{\text{ср.}} \cdot \text{м/с}$	$\Delta \text{Iгр.}, \text{балл}$
1	Архонские сады	2120	770	-0,7
2	БАМ	2090	660	-0,5
3	Весна	1810	190	0,5
4	Водная	2120	660	-0,6
5	Гадиева 1	1830	150	0,6
6	Гадиева 2	1800	130	0,7
7	Газоаппарат	2000	630	-0,5
8	Галковского	2000	500	-0,3
9	Дарьял	2000	710	-0,6
10	Дом печати	1980	500	-0,3
11	Карабулакская	1950	380	-0,1
12	Карцинское шоссе	1810	220	0,4
13	Контакт	1970	340	0
14	Кырджалийская	1800	280	0,2
15	Леваневского	2180	590	-0,5
16	Металлург	2000	790	-0,6
17	Переезд	2140	540	-0,4
18	Пожарского	2000	770	-0,6
19	Собачья балка	1830	210	0,4
20	СОГУ	1920	330	0
21	Ставропольская	1920	230	0,3
22	Тургеневская	1970	360	-0,1
23	Учитель	1980	220	0,3
24	Чкалова	2120	460	-0,3
25	НОЛ	1900	200	0,4
26	Ч.Баева	2260	780	-0,7
27	Коцоева	2200	610	-0,5
28	Дзусова	2060	400	-0,2

29	Калоева	2100	470	-0,3
30	Леонова	2220	580	-0,5
31	Николаева	2040	340	0
32	Огнева	2130	340	-0,1
33	Тельмана	2130	500	-0,4
34	Тамаева	2050	430	-0,2
35	Храм Александра Невского	2050	410	-0,2
36	Астана Кесаева	2220	600	-0,5
37	Весенняя	2050	340	-0,1
38	Доватора	2130	460	-0,3
39	Училище	2090	460	-0,3
40	Кадырова /Московское	1790	180	0,5
41	Спартак	1830	260	0,2

* Примечание: средняя скорость с учетом наличия грунтов, не выделенных КМПВ

Приращение интенсивности, обусловленное высоким уровнем стояния грунтовых вод определяется, согласно следующей формуле [Республиканские ..., 1986; Республиканские ..., 1987]:

$$\Delta I = K e^{-0,04h^2} \quad (4)$$

где $K = 0$ – для галечников с песчано-глинистым заполнителем <30%;
 $K = 0,5$ – для галечников с песчано-глинистым заполнителем >30%;
 $K = 1$ – для глинистых грунтов;
 $h_{угв}$ – уровень стояния грунтовых вод.

Уровень грунтовых вод на территории г. Владикавказа расположен на глубине 100–150 м в галечниках с количеством заполнителя < 30%. Таким образом приращение сейсмической интенсивности, обусловленное влиянием грунтовых вод равно нулю.

В то же время на отдельных участках грунты в условиях естественного залегания могут быть обводнены, что вызвано наличием водоупорного слоя. При строительстве на таких участках должны выполняться соответствующие инженерно-геологические мероприятия. Согласно современным представлениям «верховодка» охватывающая

незначительный объем толщи не оказывает заметного воздействия на сейсмический эффект.

Определение приращений интенсивности с помощью способа МОВ

Способ многократно отраженных волн [Напетваридзе, 1973] – это численный метод волновой механики. Предполагается, что для любого j -го слоя грунта справедливо волновое уравнение одномерной задачи динамической теории упругости:

$$\frac{d^2 W_j(t)}{dt^2} - c_j^2 \frac{d^2 W_j(t)}{dz^2} = 0, \quad (5)$$

где $W_j(t)$ – ускорение частиц слоя грунта; t – время; z – координата частицы грунта (в вертикальном направлении); c_j – скорость распространения сейсмической волны в j -ом грунтовом слое.

В случае одного слоя мощностью H_1 , согласно теории многократно отраженных волн, сейсмическое ускорение на дневной поверхности грунтового слоя может быть выражено в виде:

$$W\left(t + \frac{H_1}{c_1}\right) = \alpha_{0,1} \left[W_0(t) + \sum_{j=1}^{\infty} \beta_{1,0}^j W_0\left(t - 2j \frac{H_1}{c_1}\right) \right], \quad (6)$$

где $W_0(t)$ – акселерограмма, задаваемая в основание грунтовой толщи; $\alpha_{0,1}$ и $\beta_{1,0}$ – коэффициенты преломления и отражения на границах раздела сред:

$$\alpha_{0,1} = 2 \left/ \left(1 + \frac{\rho_1 c_1}{\rho_0 c_0} \right) \right., \quad (7)$$

$$\beta_{1,0} = \left(1 - \frac{\rho_0 c_0}{\rho_1 c_1} \right) \left/ \left(1 + \frac{\rho_0 c_0}{\rho_1 c_1} \right) \right.. \quad (8)$$

Для двуслойной грунтовой среды сейсмические колебания на поверхности могут быть получены по следующей формуле: [Сейсмическое микрорайонирование ..., 1970]:

$$F(t) = 2x_{2,1} \sum_{m=1}^{n > t/2\tau_1} \beta_{1,2}^{m-1} \left\{ \alpha_{3,2} \sum_{i=1}^{\lambda > t/2\tau_2} (\beta_{2,3} \beta_{2,1})^{i-1} F_3 x e^{-(2m-1)\tau_1 - (2i-1)\tau_2} + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \alpha_{1,2} \beta_{2,1} \sum_{j=1}^{k > (t-\tau_1)/2\tau_2} (\beta_{2,3} \beta_{2,1})^{j-1} F_1 x e^{-2m\tau_1 - 2j\tau_2} \right\} \quad (9)$$

где

$$\tau = H_1 / V_{S_1}, \tau_2 = H_2 / V_{S_2}, \alpha_{1,2} = \frac{2}{1 + \gamma_2 V_{S_2} / \gamma_1 V_{S_1}},$$

$$\alpha_{3,2} = \frac{2}{1 + \gamma_2 V_{S_2} / \gamma_3 V_{S_3}}, \beta_{2,3} = \frac{\gamma_2 V_{S_2} / \gamma_3 V_{S_3} - 1}{\gamma_2 V_{S_2} / \gamma_3 V_{S_3} + 1}.$$

Интересно отметить, что описанный метод на практике впервые был применен при СМР г. Владикавказа в 1970 году.

В последнее время разработан новый алгоритм способа МОВ сейсмического микрорайонирования, представляющий собой, по сути, имитационную модель, позволяющую моделировать любое количество слоев толщи [Заалишвили, Мельков, 2010].

Процесс распространения сейсмических волн через грунтовые слои моделируется в виде временных задержек, определяемых мощностью слоя и скоростью волны в нем, т.е. фактически времени пробега волны через слой. Рассмотрим принцип на примере двуслойной модели грунтовой среды (Рисунок 3). Каждый грунтовый слой характеризуется мощностью H , плотностью ρ , скоростью распространения поперечной волны V_s и коэффициентом поглощения α .

Коэффициенты отражения и преломления сейсмических волн на границах сред рассчитываются по формулам:

$$\alpha_{ij} = \frac{2}{1 + \frac{\rho_j V_{S_j}}{\rho_i V_{S_i}}}, \quad \beta_{ij} = \frac{1 - \frac{\rho_j V_{S_j}}{\rho_i V_{S_i}}}{1 + \frac{\rho_j V_{S_j}}{\rho_i V_{S_i}}}, \quad (10)$$

где сейсмическая волна распространяется из i -го слоя в j -й.

В данной модели каждый слой представляется в виде некоторого элемента, имеющего два входа и два выхода (Рисунок 3).

Процесс распространения проходящей через слой сейсмической волны моделируется подачей соответствующего сигнала на вход элемента и подачей его на выход с временной задержкой

$$\tau_i = H_i / V_{S_i} \quad (11)$$

Явление затухания учитывается умножением выходного сигнала на величину $e^{-\alpha_i H_i}$.

Элементы соединены таким образом, что на каждый из входов элемента подается сумма выходных сигналов предыдущего элемента и соответствующего выходного сигнала данного элемента, умноженные соответственно на коэффициент преломления и

отражения. Входная сейсмограмма $f(t)$ подается на вход нижнего слоя, выходная $g(t)$ получается на выходе поверхностного.

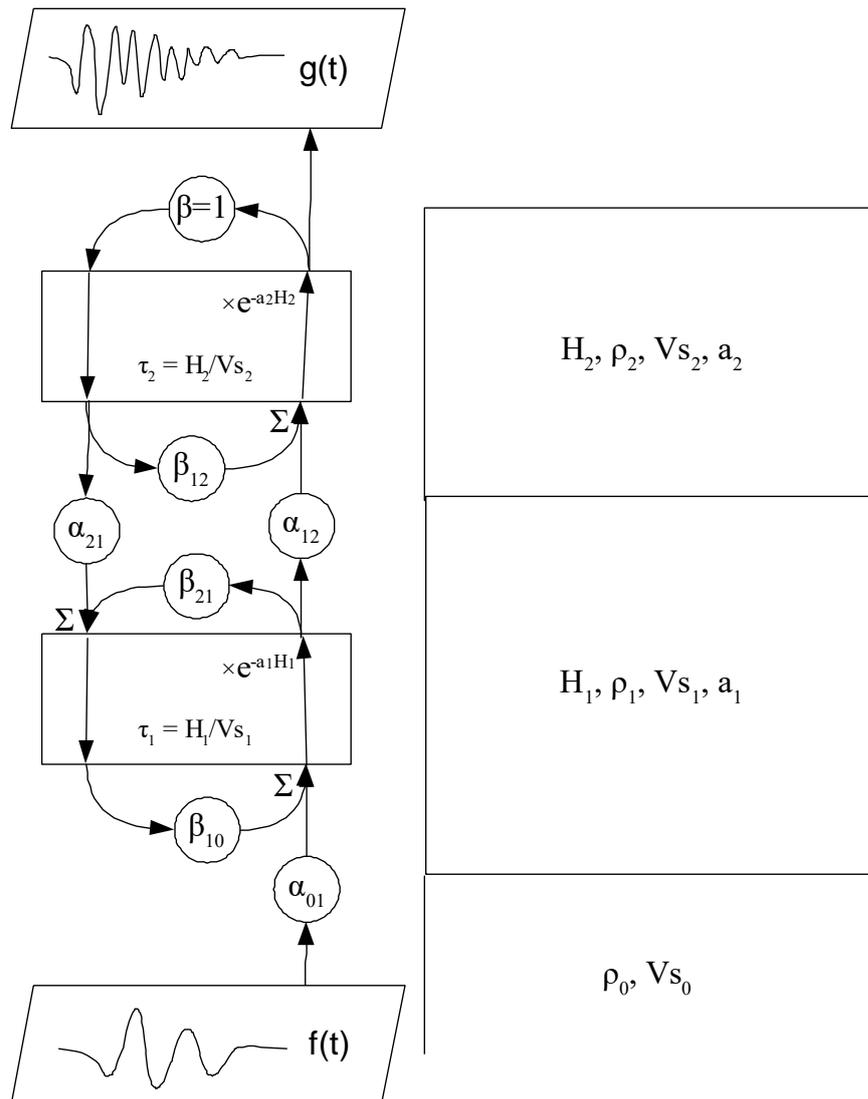


Рисунок ПЗ.3. Схематическое представление алгоритма

В некотором смысле каждый грунтовый элемент, представленный на рисунок 3 аналогичен нейрону в нейронных сетях. При этом каждый коэффициент отражения и преломления представляет собой весовой коэффициент – вес синапса. Синаптические связи с положительными весами называют возбуждающими, с отрицательными – тормозящими. Функция активации имеет особый вид, являясь линейной с задержкой ($f(s)=s-\tau$).

Программная реализация алгоритма осуществляется следующим образом. Каждый из элементов имеет два массива хранения данных $S\uparrow$ и $S\downarrow$, для хранения отсчетов

амплитуд волн распространяющихся вверх и вниз соответственно. Размер массива определяется следующим образом:

$$N_s = \text{round}\left(\frac{H_i}{V_{s_i} \cdot dt}\right), \quad (12)$$

где round означает округление до целого, dt – шаг по времени.

На каждом временном шаге из массива извлекается первый в очереди элемент и в конец очереди ставится новый. Иллюстрация процедуры дается на рисунок 4. В массиве S хранятся отсчеты d, на текущий элемент указывает указатель, обозначенный стрелкой. На каждом последующем временном шаге текущий элемент извлекается из массива и на его место ставится новый, одновременно указатель смещается на единицу. Таким образом, обеспечивается цикличность считывания данных без необходимости перемещения элементов в массиве. Процедура продолжается в цикле до достижения конца входного сигнала или же до определенного момента времени, считая что на вход подаются нулевые отсчеты. Алгоритм реализован на языке MATLAB.

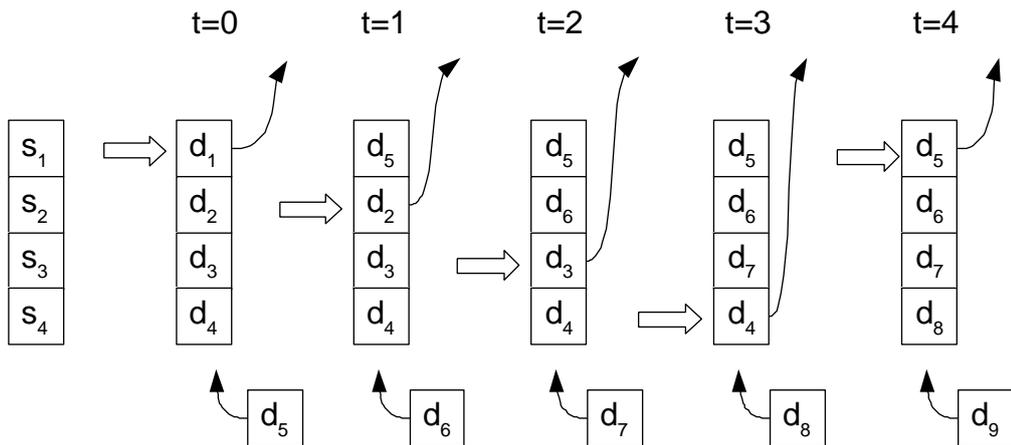


Рисунок ПЗ.4. Принцип хранения данных в массиве S

Для каждой и рассмотренных моделей и воздействий были рассчитаны спектральные характеристики (пример, для некоторых участков на рисунке 5–6) и соответствующие акселерограммы на поверхности грунтовой толщи.

В качестве средних грунтовых условий выбран пункт номер 11, поскольку по методу сейсмических жесткостей приращение составило близкое к нулю значение -0.1 и данная точка по всем предварительным данным находится в 8-балльной зоне.

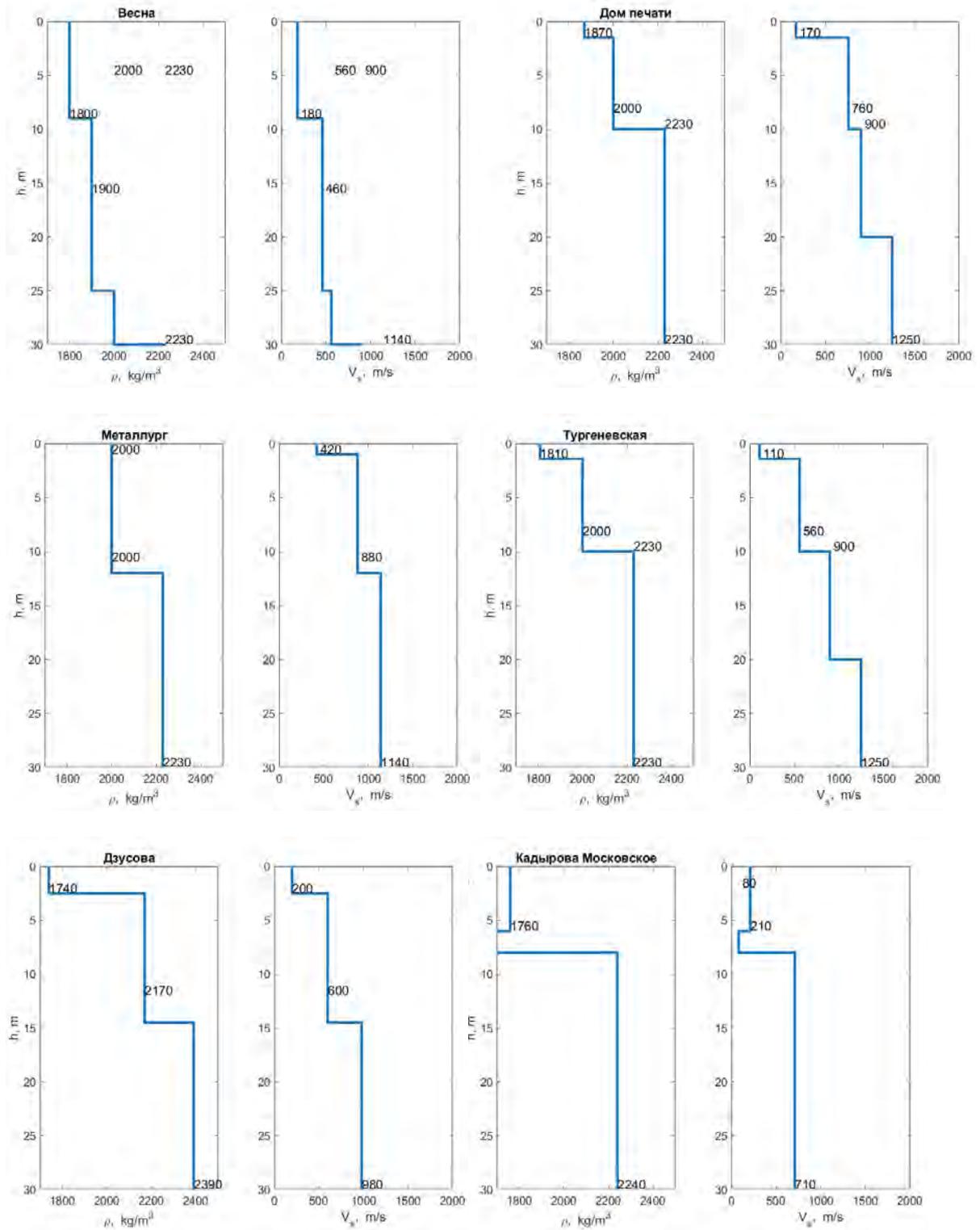


Рисунок ПЗ.5. Расчетные модели отдельных участков территории

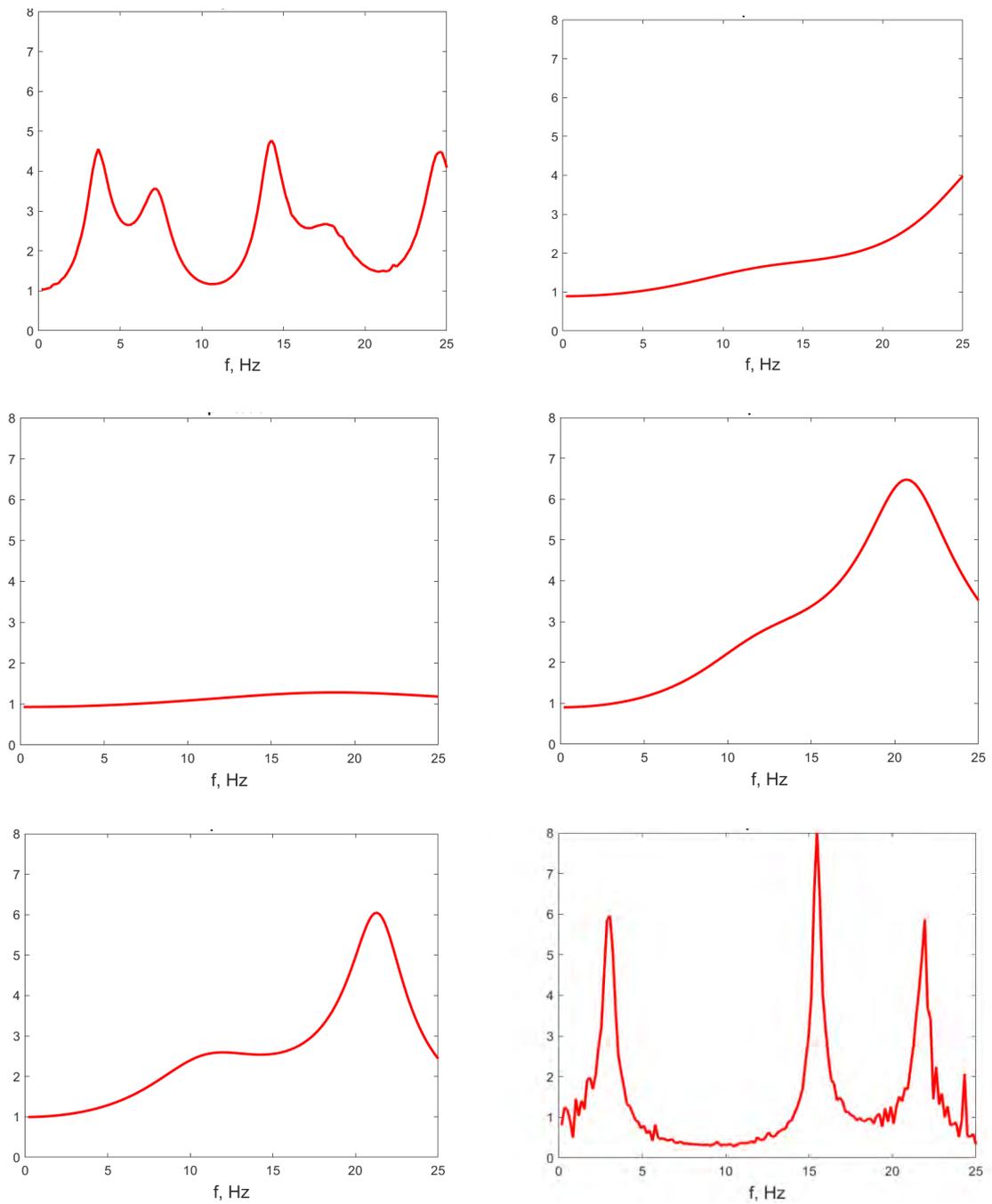


Рисунок ПЗ.6. Спектральные характеристики отдельных участков территории

Формулы расчета приращений сейсмической интенсивности для слабых землетрясений, взрывных источников и по соотношениям ШСИ-2017

Способ регистрации землетрясений малых энергий применяется для количественной оценки относительных изменений сейсмической интенсивности на участках с различными инженерно-геологическими условиями.

Оценка приращения сейсмической интенсивности производится по формуле [Республиканские ..., 1987; Рекомендации ..., 1985; Методическое руководство ..., 1988]:

$$\Delta I = 3.3 \lg \frac{A_i}{A_0}, \quad (13)$$

где A_i и A_0 – амплитуды колебаний на исследуемом и эталонном грунтах (измеренные по землетрясениям, зарегистрированным одновременно в соответствующих пунктах наблюдения), соответственно.

При этом существует несколько способов расчета амплитуд колебаний. Очевидно, что на сейсмический эффект также влияет продолжительность сейсмических воздействий. Кроме того, необходимо учитывать тип используемых приборов. В данной работе рассмотрены различные способы вычисления «амплитуд колебаний» для приборов СК-1П и различные критерии статистической значимости получаемых результатов.

Согласно [Методическое руководство ..., 1988] A_i и A_0 – «максимальные амплитуды колебаний» на исследуемом и эталонном участках и «...иногда... вместо максимальных используются средние значения амплитуд колебаний». Средняя амплитуда находится по соответствующей сейсмограмме путем усреднения ряда амплитуд, полученных в результате сложного промера на отрезке записи землетрясения от вступления волны S и до $1/3 A_{\max}$. Согласно [Республиканские ..., 1987] A_i и A_0 – «средние амплитуды колебаний». Согласно [Рекомендации ..., 1985] A_i и A_0 – «средние амплитуды колебаний в пределах отрезка записи с $A \geq A_{\max}/3$ ». Таким образом, определение средних амплитуд фактически связано с продолжительностью колебаний.

С введением новой шкалы сейсмической интенсивности ШСИ-2017 были пересмотрены инструментальные параметры. Из справочного Приложения Б ГОСТ могут быть получены следующие соотношения для расчета приращений сейсмической интенсивности:

$$\Delta I = 2.5 \lg \frac{PGA}{PGA_0} \quad (14)$$

$$\Delta I = 2.13 \lg \frac{PGV}{PGV_0} \quad (15)$$

$$\Delta I = 2.5 \lg \frac{PGA}{PGA_0} + 1.25 \lg \frac{\tau}{\tau_0} \quad (16)$$

$$\Delta I = 1.325 \lg \frac{PGA \cdot PGV}{PGA_0 \cdot PGV_0} \quad (17)$$

где PGA и PGV обозначают пиковые скорости и ускорения, а τ – продолжительность колебаний («ширину импульса»).

Очевидно, что амплитуды колебаний оценивают максимальные нагрузки, которые могут меняться в зависимости от их продолжительности, с этой точки зрения важно рассмотреть энергетические характеристики воздействий. При этом важно учитывать также спектральный состав колебаний, т.е. ту область частот в которых сосредоточена сейсмическая энергия.

При нелинейном поведении грунтов характерно расширение спектра в ВЧ и частично в НЧ области спектра. Расширение в НЧ области спектра в рыхлых грунтах, обусловленное явлением поглощения, превышает расширение, связанное с нелинейностью грунта, и, таким образом, поглощение «маскирует» нелинейность. В скальных грунтах, где величина поглощения значительно меньше, нелинейность среды проявляется более отчетливо. В то же время оценка нелинейности с точки зрения СМР интересна именно для рыхлых грунтов. Кроме того, при использовании площади нормализованного спектра, отсутствует возможность изучать форму спектра. В связи с изложенным ранее, чтобы оценить степень нелинейности грунтов, необходимо ввести другой показатель.

В связи с этим В.Б. Заалишвили в 1996 г. [Заалишвили, 1997] было введено понятие площади «реального» спектра колебаний. Это – «виброспектр» или обыкновенный амплитудный спектр Фурье, рассчитываемый по сейсмограмме. Площадь реального спектра S_p , согласно определению В.Б. Заалишвили, равна:

$$S_p = S_n A_0. \quad (18)$$

Анализ инструментальных записей землетрясений показывает, что величина S_p , тесно связана с нелинейностью грунтов. При достижении ускорений $a \approx 0,1g$ зависимость S_p от ускорения резко меняется, обретая нелинейный характер («мягкая нелинейность»). Для жестких грунтов характерна «жесткая» нелинейная зависимость:

$$S_p \sim \alpha A_0 f_{св}. \quad (19)$$

Таким образом, площадь реального спектра S_p – интегральная характеристика явлений поглощения и нелинейности, возникающих в грунтовой толще. Это подтверждает наблюдающееся при экспериментах подобие влияния явлений поглощения и нелинейности на форму спектра.

Отношение площади реального спектра к поглощению, даст, очевидно, т.н. «чистую» нелинейность:

$$S_p / \alpha \sim A_0 f_{св}. \quad (20)$$

Таким образом, произведение амплитуды спектра на средневзвешенную частоту, являясь простейшей и легко измеряемой величиной, характеризует новое качество грунта – нелинейность. Таким образом, В.Б. Заалишвили были введены новые показатели, которые тесно связаны с прямыми показателями поглощения и нелинейности грунтов [Заалишвили, 1997]. В отличие от традиционных показателей новые показатели непосредственно измеряются по спектрам колебаний грунтов.

Рассматривая выражение (20), можно заключить, что при постоянной величине нелинейности данного грунта (т.е. при $A_0 f_{св} = \text{const}$) повышение поглощения приведет к пропорциональному увеличению площади реального спектра. Действительно, чем грунт рыхлее, тем больше он поглощает вводимую энергию и тем больше площадь реального спектра его колебаний. В скальных грунтах, где поглощение малó, площадь реального спектра мала.

Сопоставление показателей поглощения и нелинейности с соответствующими спектрами колебаний грунтов показывает, что при большем поглощении площадь спектра преобладает в НЧ области, а при высокой нелинейности – в ВЧ области спектра. Другими словами, присутствие поглощения проявляется в дополнительном расширении НЧ области спектра, а присутствие нелинейности – в расширении ВЧ диапазона.

Все изложенное позволило получить формулу для расчета приращения балльности на основе учета нелинейно-упругого поведения грунтов или упругой нелинейности (при использовании вибрационного источника) [Заалишвили, 2000]:

$$\Delta I = 3 \lg A_i f_{св i} / A_0 f_{св 0}, \quad (21)$$

где $A_i f_i$, $A_0 f_0$ – произведение амплитуды спектра на средневзвешенную частоту колебаний исследуемого и эталонного грунтов.

Формула (21) характеризует нелинейно-упругое поведение грунтов в отсутствие поглощения, она использовалась при СМР территории г. Кутаиси, а также при СМР территории Нововоронежской АЭС-1 и площадки для проектируемой АЭС-2.

Если применять при СМР импульсный источник, то формула примет вид [Заалишвили и др., 1996]:

$$\Delta I = 2 \lg A_i f_{св i} / A_0 f_{св 0}. \quad (22)$$

Дальнейшее развитие инструментальный метод получил на основе использования вибрационных источников, отличающихся определенными преимуществами по сравнению с импульсными. Основная особенность использования вибрационного источника для СМР – возможность управлять спектральным составом излучаемого сигнала.

Для данной колебательной системы амплитуда вынужденных колебаний зависит от частоты вынуждающей силы. Под действием периодических сил система (плита–грунт) совершает гармонические колебания, частота и амплитуда которых определяются частотой и величиной внешней нагрузки, а также собственной частотой и затуханием системы, которые, в свою очередь, зависят от литологического состава, строения и физико-механических свойств грунтовой толщи. В случае переменной по частоте нагрузки в системе могут наблюдаться резонансные явления.

В качестве вибрационного источника в работе использовался мощный сейсмический вибратор типа СВ-10/100. Амплитудно-частотная характеристика источника с силой воздействия до 100 кН ограничена «столообразной» характеристикой от 4 до 100 Гц [Отчет ..., 1985].

Широкий диапазон изменения длительности посылки сигнала (до 99 сек) позволяет «раскачивать» среду, т.е. сообщать ей квазигармонический режим колебаний. При этом целесообразно использовать т.н. «свип-сигналы», характеризующиеся линейным изменением частоты колебаний во времени.

Для сопоставления показателей сейсмических свойств грунтов введено понятие «площади подспектральной области спектра колебаний» грунтов. Для расчета приращений балльности разработан способ виброспектров и была предложена следующая формула [Заалишвили, 1986]:

$$\Delta I = 2 \lg \frac{S_{pi}}{S_{p0}}, \quad (23)$$

где S_{pi} – площадь реального спектра колебаний исследуемого грунта; S_{p0} – площадь реального спектра колебаний эталонного грунта.

Вибрационные источники относительно большой мощности помогают резко повысить обоснованность выделения зон с различной интенсивностью, т.е. повысить качество работ по СМР.

Разработанный способ применяли при СМР территорий гг. Тбилиси, Кутаиси, Ткибули, отдельных участков г. Б. Сочи [Zaalishvili, 1992]. Особенность способа – он позволяет оценить сейсмическую опасность грунтов без каких-либо предварительных исследований: проведя непосредственные измерения реакции грунтовой толщи на

стандартное (вибрационное или импульсное) воздействие. Позже формула с успехом использовалась при СМР площадок Нововоронежской АЭС с помощью импульсного источника [Заалишвили и др, 1996].

Формулы расчета сейсмической интенсивности на основе инструментальной меры по данным сети K-Net

В модели с двумя параметрами лучший результат получен для комбинации меры Фаджфара и меры Анга и меры Фаджфара и среднеквадратического ускорения.

$$I = 0.82 \cdot \log_{10}(\text{Ang Int}) + 1.34 \cdot \log_{10}(\text{Fajfar}) + 2.60, \quad (24)$$

$$I = 0.90 \cdot \log_{10}(\text{RMS}) + 1.72 \cdot \log_{10}(\text{Fajfar}) + 3.20, \quad (25)$$

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

$$I_{FA1} = \text{RMS}^{1.23} \text{PGV}^{1.34} t_d^{0.745} \quad (26)$$

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 $I_{FA2} = \text{RMS}^{0.9} \text{PGV}^{1.72} t_d^{0.43}$ 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

$$I_{FA2} = \text{RMS} \cdot \text{PGV}^2 \cdot t_d^{1/2} \quad (27)$$

Для двух основных параметров лучший результат получен для меры площади спектра и средневзвешенной частоты ($R^2 = 0.88$, MAE = 0.23) – рис. 5в:

$$I = 2.11 \cdot \log_{10}(\text{Sr}) - 3.54 \cdot \log_{10}(f_{av}) + 4.68, \quad (28)$$

Следующим по значимости является выражение, полученное для комбинации пикового горизонтального ускорения и пиковой скорости – рис. 5 г:

$$I = 0.59 \cdot \log_{10}(\text{PHA}) + 2.11 \cdot \log_{10}(\text{PHV}) + 3.41, \quad (29)$$

На основе базы данных K-Net получены выражения для меры сейсмической интенсивности, основанные на комбинации различных параметров. Данные формулы также могут быть использованы для расчетов приращений интенсивности, рассматривая коэффициенты перед логарифмами как показатели степеней соответствующих параметров.

Различия полученных результатов с данными карты СМР. Дисперсия как характеристика грунтовых условий

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 категории 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.

В качестве нового критерия оценки приращений сейсмической интенсивности использована дисперсия разброса значений около среднего (в таблице 2 приведены примеры расчетов для участков, представленных на рисунке 5) [Заалишвили и др., 2024а]. На рисунке 7 показаны гистограммы и соответствующие плотности вероятности, в предположении, что распределение является нормальным. Соответственно пространственное распределение среднеквадратических отклонений приращений сейсмической интенсивности приведено на рисунке 8.

Таблица ПЗ.2. – Расчет приращений сейсмической интенсивности ΔI (средние значения) и соответствующие среднеквадратические отклонения σ

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

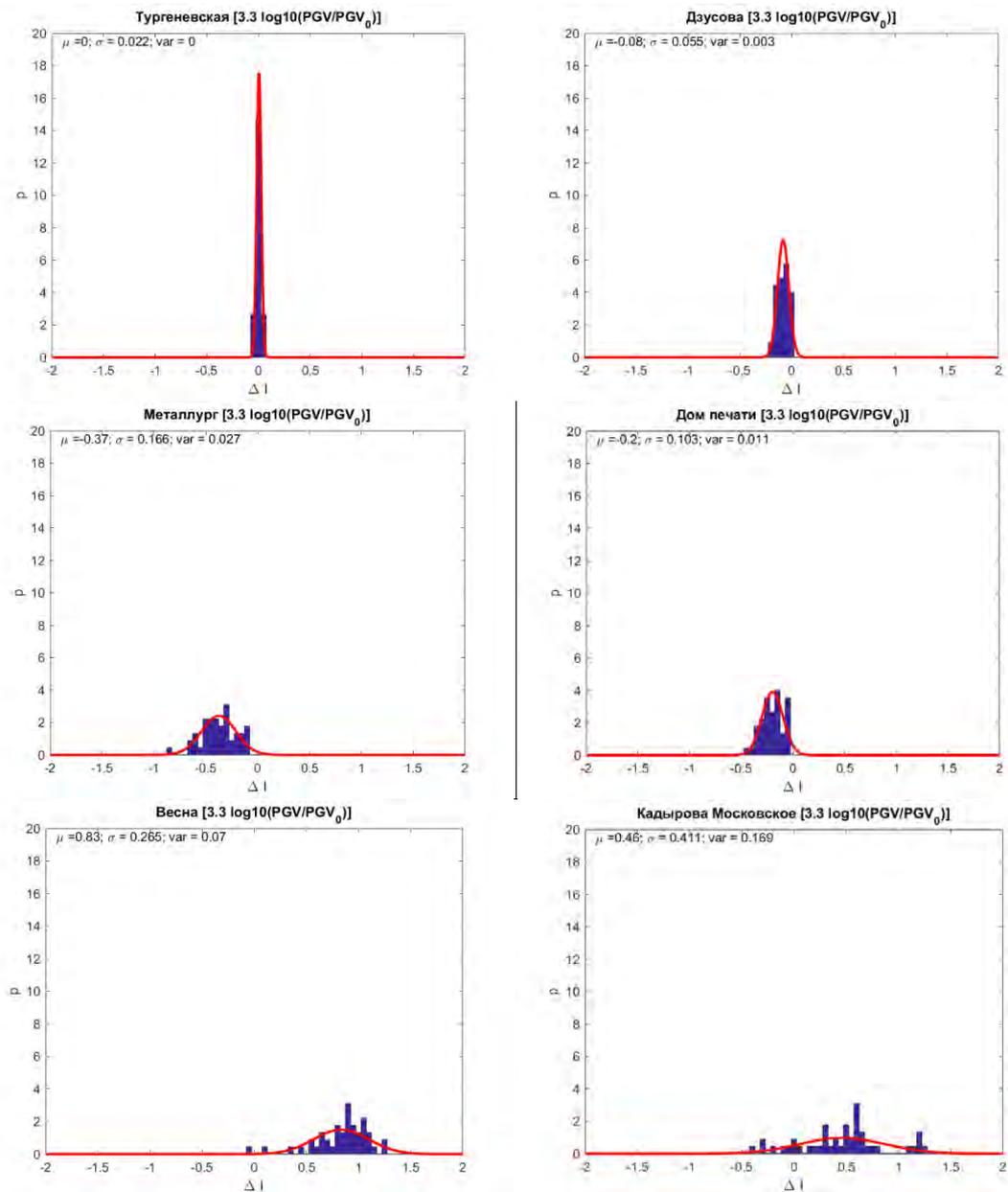


Рисунок ПЗ.7. Гистограммы распределения приращений сейсмической интенсивности для различных участков территории

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.

Установлено, что неоднородность среды определяет разброс значений параметров, описывающих сейсмический эффект, около математического ожидания, и является дополнительной характеристикой грунтового комплекса, т.к. даже при одних и тех же величинах средней скорости поперечной волны в толще $Vs30$, участки могут относиться к разным сейсмическим категориям.

В результате выполнено сейсмическое микрорайонирование территории г. Владикавказа по комплексу критериев в рамках предложенных формул с учетом

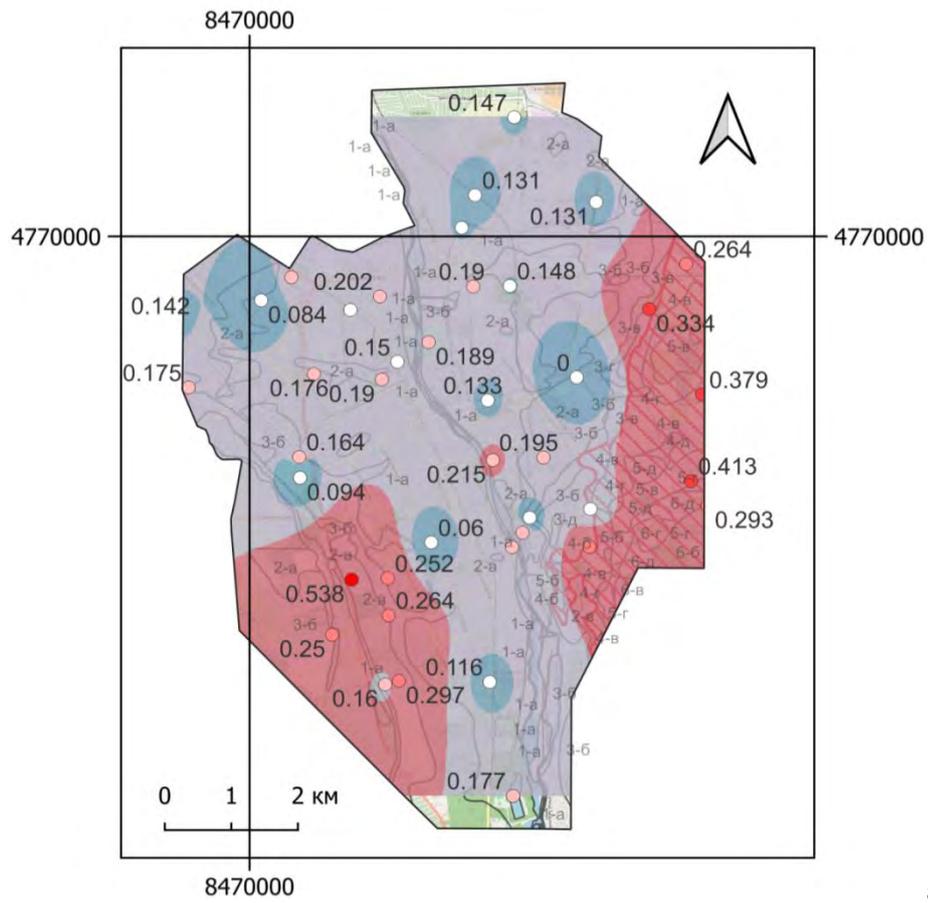
доверительных интервалов для вероятностей 5% и 1% превышения указанных значений (Таблицы 3–4) и сейсмическое микрорайонирование в пределах каждой категории грунтов, исходя из уточненных данных сейсморазведки. Значительные изменения не отмечаются, учитывая округление результатов до десятых, однако в случае 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.

Таблица ПЗ.3. – Расчет приращений сейсмической интенсивности ΔI (средние значения) и соответствующие среднеквадратические отклонения σ

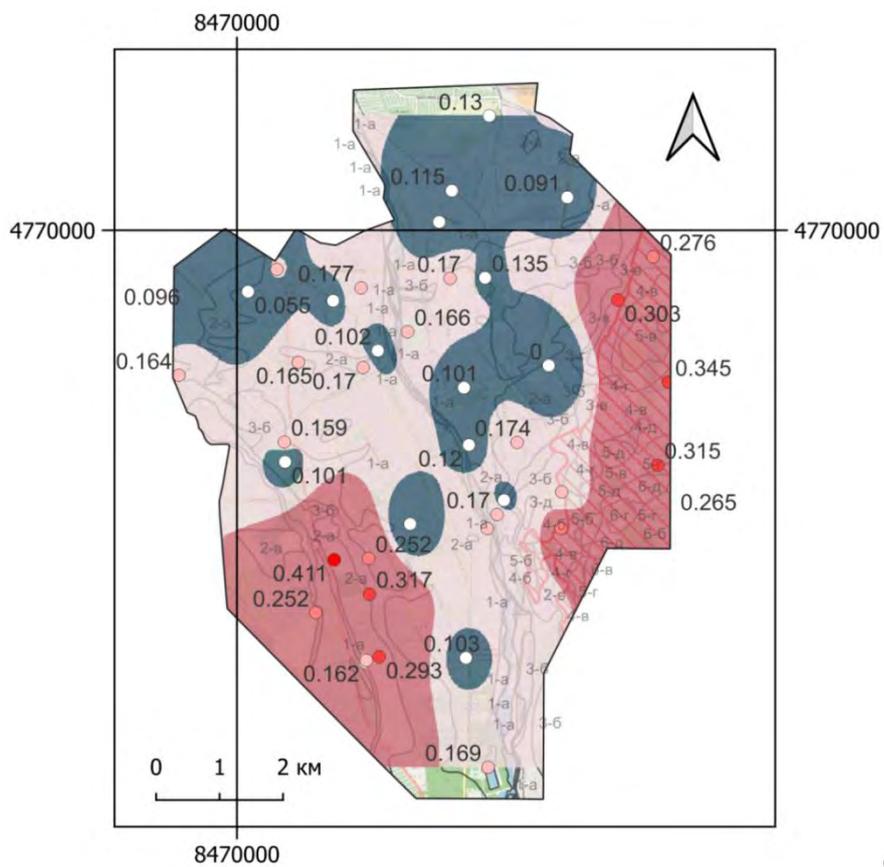
№ пп	Формула	Весна		Дом печати		Металлург		Тургеневская		Дзусова		Кадырова Московское	
		ΔI	σ	ΔI	σ	ΔI	σ	ΔI	σ	ΔI	σ	ΔI	σ
33.	$\Delta I = 3.3 \cdot \lg(\text{PHA}/\text{PHA}_0)$	0,47	0,29	-0,45	0,12	-0,91	0,19	0,06	0,06	-0,19	0,08	-0,50	0,54
34.	$\Delta I = 3.3 \cdot \lg(\text{PHV}/\text{PHV}_0)$	0,83	0,26	-0,20	0,10	-0,37	0,17	0,00	0,02	-0,08	0,06	0,46	0,41
35.	$\Delta I = 1.325 \cdot \lg(\text{PHV} \cdot \text{PHA} / (\text{PHV}_0 \cdot \text{PHA}_0))$	0,52	0,19	-0,26	0,06	-0,52	0,11	0,02	0,03	-0,11	0,04	-0,01	0,37
36.	$\Delta I = 2.5 \cdot \lg(\text{PHA}/\text{PHA}_0) + 1.25 \cdot \log_{10}(\tau/\tau_0)$	0,38	0,21	-0,36	0,13	-0,72	0,15	0,04	0,08	-0,14	0,11	-0,20	0,30
37.	$\Delta I = 3.0 \cdot \lg((\text{PHA} \cdot f_{aw}) / (\text{PHA}_0 \cdot f_{aw0}))$	0,11	0,25	-0,39	0,11	-1,06	0,17	0,14	0,06	-0,20	0,08	-0,92	0,41
38.	$\Delta I = 2.0 \cdot \lg(Sr/Sr_0)$	0,21	0,06	-0,24	0,01	-0,57	0,03	0,06	0,01	-0,12	0,01	-0,47	0,13
39.	$\Delta I = 0.82 \cdot \lg(\text{Ang}/\text{Ang}_0) + 1.34 \cdot \lg(\text{Fajfar}/\text{Fajfar}_0)$	0,65	0,33	-0,23	0,31	-0,51	0,53	-0,04	0,24	-0,28	0,44	0,13	0,47
40.	$\Delta I = 0.90 \cdot \lg(\text{RMS}/\text{RMS}_0) + 1.72 \cdot \lg(\text{Fajfar}/\text{Fajfar}_0)$	0,66	0,27	-0,21	0,23	-0,46	0,39	-0,03	0,18	-0,23	0,32	0,19	0,41
41.	$\Delta I = 2.11 \cdot \lg(Sr/Sr_0) - 3.54 \cdot \lg(\text{faw}/\text{faw}_0)$	0,60	0,10	-0,28	0,03	-0,33	0,06	-0,04	0,01	-0,09	0,01	0,06	0,26
42.	$\Delta I = 0.59 \cdot \lg(\text{PHA}/\text{PHA}_0) + 2.11 \cdot \lg(\text{PHV}/\text{PHV}_0)$	0,62	0,20	-0,21	0,07	-0,40	0,12	0,01	0,02	-0,09	0,04	0,21	0,35

Таблица ПЗ.4. – Приращения сейсмической интенсивности на городских участках для вероятностей превышения 95% и 99%

№ пп	Формула	Весна		Дом печати		Металлург		Тургеневская		Дзусова		Кадырова Московское	
		95%	99%	95%	99%	95%	99%	95%	99%	95%	99%	95%	99%
10.	$\Delta I = 3.3 \cdot \lg(\text{PHA}/\text{PHA}_0)$	0,54	0,58	-0,42	-0,41	-0,87	-0,85	0,07	0,08	-0,17	-0,16	-0,36	-0,30
11.	$\Delta I = 3.3 \cdot \lg(\text{PHV}/\text{PHV}_0)$	0,90	0,93	-0,17	-0,16	-0,33	-0,31	0,01	0,01	-0,07	-0,06	0,57	0,61
12.	$\Delta I = 1.325 \cdot \lg(\text{PHV} \cdot \text{PHA} / (\text{PHV}_0 \cdot \text{PHA}_0))$	0,57	0,59	-0,25	-0,24	-0,49	-0,48	0,03	0,03	-0,10	-0,09	0,08	0,12
13.	$\Delta I = 2.5 \cdot \lg(\text{PHA}/\text{PHA}_0) + 1.25 \cdot \log_{10}(\tau/\tau_0)$	0,43	0,46	-0,33	-0,31	-0,68	-0,66	0,06	0,07	-0,11	-0,10	-0,13	-0,09
14.	$\Delta I = 3.0 \cdot \lg((\text{PHA} \cdot f_{aw}) / (\text{PHA}_0 \cdot f_{aw0}))$	0,17	0,20	-0,37	-0,35	-1,02	-1,00	0,15	0,16	-0,18	-0,17	-0,82	-0,78
15.	$\Delta I = 2.0 \cdot \lg(Sr/Sr_0)$	0,23	0,23	-0,24	-0,23	-0,56	-0,56	0,06	0,06	-0,12	-0,12	-0,44	-0,42
16.	$\Delta I = 0.82 \cdot \lg(\text{Ang}/\text{Ang}_0) + 1.34 \cdot \lg(\text{Fajfar}/\text{Fajfar}_0)$	0,74	0,77	-0,15	-0,12	-0,38	-0,32	0,02	0,05	-0,17	-0,13	0,25	0,30
17.	$\Delta I = 0.90 \cdot \lg(\text{RMS}/\text{RMS}_0) + 1.72 \cdot \lg(\text{Fajfar}/\text{Fajfar}_0)$	0,73	0,76	-0,16	-0,13	-0,36	-0,32	0,02	0,04	-0,15	-0,11	0,29	0,34
18.	$\Delta I = 2.11 \cdot \lg(Sr/Sr_0) - 3.54 \cdot \lg(\text{faw}/\text{faw}_0)$	0,62	0,63	-0,27	-0,27	-0,32	-0,31	-0,04	-0,04	-0,09	-0,08	0,13	0,16
19.	$\Delta I = 0.59 \cdot \lg(\text{PHA}/\text{PHA}_0) + 2.11 \cdot \lg(\text{PHV}/\text{PHV}_0)$	0,67	0,69	-0,19	-0,18	-0,37	-0,36	0,02	0,02	-0,08	-0,07	0,29	0,33



а)



б)

Рисунок ПЗ.8. Среднеквадратические отклонения приращений сейсмической интенсивности по пиковым горизонтальным ускорениям (а) и скоростям (б)

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 схемы инженерно-геологического районирования на подобласти диаграммой Вороного показан на рисунке 9 и дифференциация внутри каждой категории комплекса ИГЭ на рисунке 10: если точка не попадает в категорию комплекса ИГЭ, то соответствующая зона на схеме не представлена, и в качестве подложки показана интерполяция данных между точками.

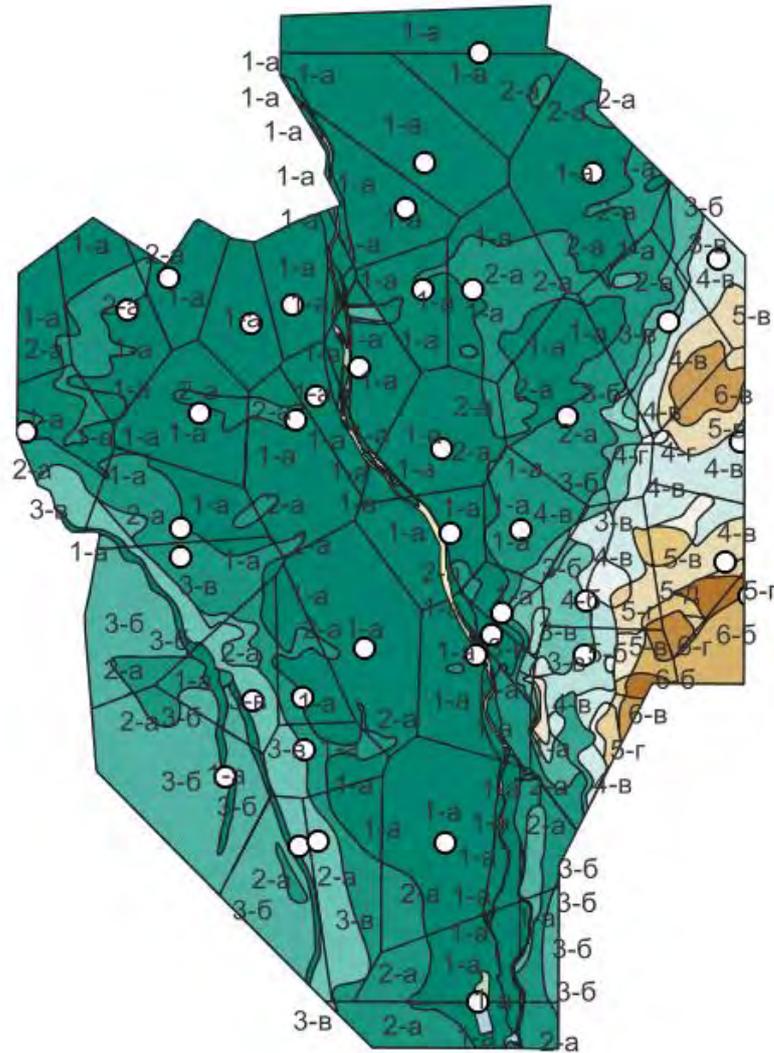


Рисунок П3.9. Деление схемы инженерно-геологического районирования на подобласти диаграммой Вороного

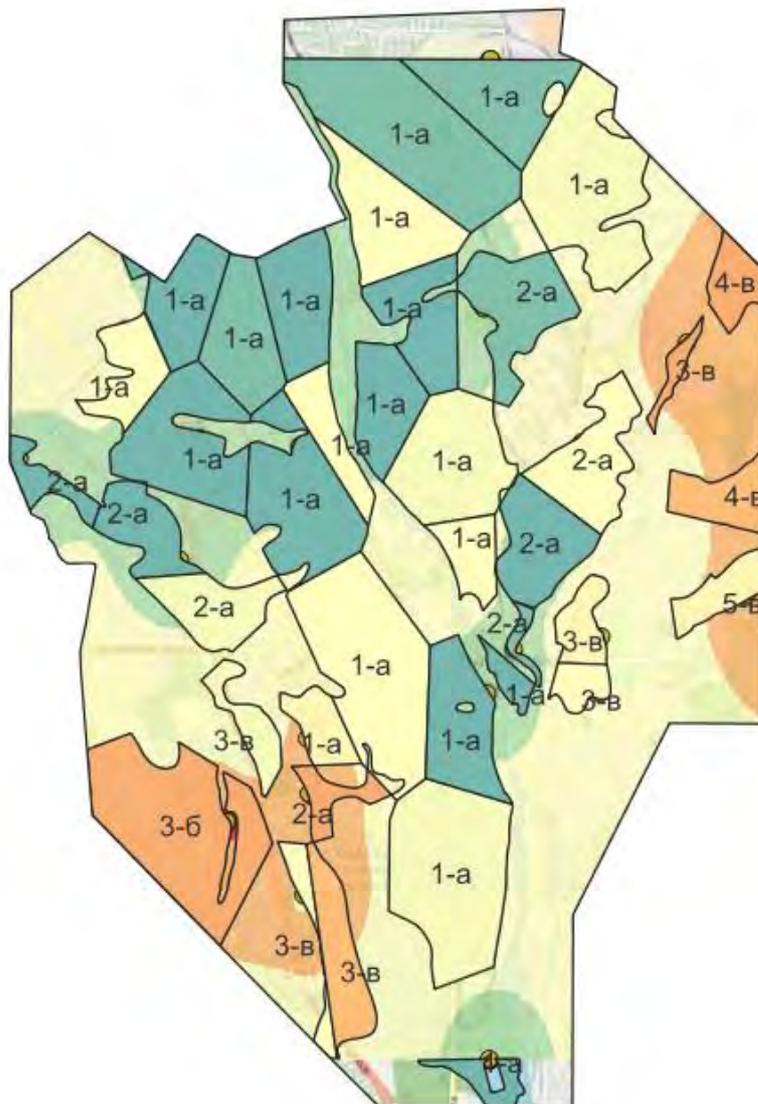


Рисунок ПЗ.10. Дифференциация внутри каждой категории комплекса ИГЭ

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 – рисунок 11) показатели по участкам 3б и 3в аналогичны (соизмеримы V_s , резонансные частоты при условии одинаковой мощности), что позволило отнести эти два участка, по наихудшим 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.

Выделение зон с различной сейсмичностью

На территории г. Владикавказа подлежащего сейсмическому микрорайонированию валунно-галечниковые отложения, залегающие под суглинистым покровом мощностью до 5 м, в основном, флювиогляциального генезиса. Это подтверждается наличием на поверхности многочисленных крупных (до 5–7 м в диаметре) валунов изверженных пород, а также по горным выработкам (скважины, шурфы, траншеи). В связи с этим заполнитель в валунно-галечниковых образованиях, в основном, представлен глинистым материалом (глины песчанистые, суглинки), а их содержание в породе превышает 30–35%.

На отдельных локальных участках, ближе к пойме реки Терек, и в ее пойменной части материал заполнителя представлен песчаными образованиями.

Исходя из вышеизложенного, валунно-галечниковые грунты, распространенные в западной части территории СМР, по сейсмическим свойствам согласно СНиП II-7-81*, отнесены ко II категории. Позже отнесение указанных грунтов ко II категории было подтверждено инструментально.

Установлено, что галечники с глубин 5–10 метров представляют собой галечники с песчано-глинистым заполнителем > 30%, который на глубине > 10 метров, как правило, сменяется галечниками с песчано-глинистым заполнителем < 30%. На отдельных участках имеются выходы указанных грунтов (галечники с песчано-глинистым заполнителем < 30%) непосредственно на дневную поверхность.

Учитывая, что величина приращений интенсивности относительно эталонных, необводненных глинистых грунтов т/пластичной консистенции, к которым отнесена исходная сейсмичность или интенсивность равная 8 баллам, приращение интенсивности составляет:

- 1) для глинистых грунтов (мягкопластичные, текучей консистенции и т.д.) – + 1 балл;
- 2) для галечников с песчано-глинистым заполнителем > 30% – 0 баллов;
- 3) для галечников с песчано-глинистым заполнителем < 30% – -1 балл.

Таким образом, сейсмичность галечников с песчано-глинистым заполнителем > 30%, имеющих приращения равные 0 баллов, составит 8 баллов; сейсмичность галечников с песчано-глинистым заполнителем < 30%, характеризуемых приращением в – 1 балл, составит 7 баллов. И, наконец, сейсмичность глинистых грунтов (мягкопластичные, текучей консистенции и т.д.), характеризуемых приращением в +1 балл, составит 9 баллов.

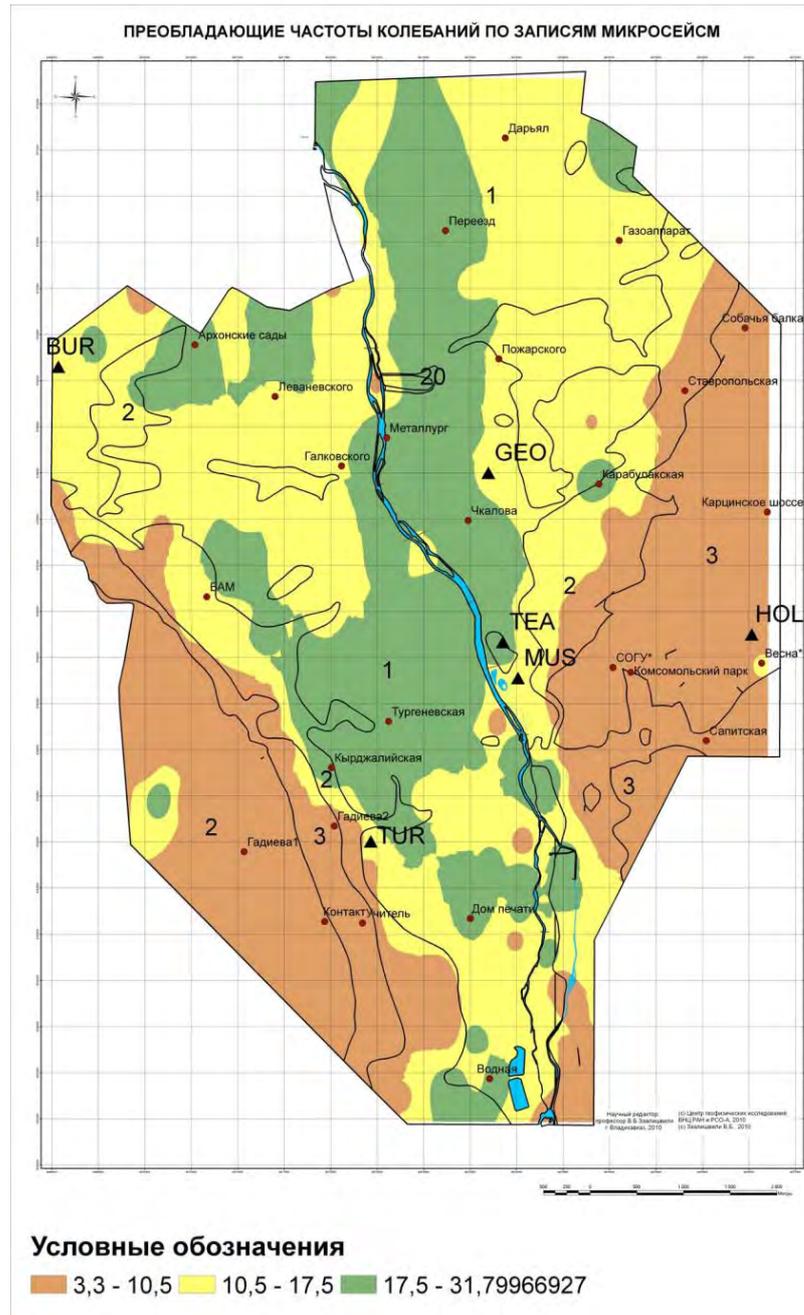


Рисунок ПЗ.11. Результаты дифференциации грунтов по признаку преобладающих частот колебаний и границы зон по карте инженерно-геологического районирования

На основе вышеизложенного была составлена карта-схема сейсмического микрорайонирования центральной части территории г. Владикавказа в масштабе 1:10 000. На указанной карте-схеме были выделены обширная зона с 8-балльной интенсивностью и более меньшая зона с 9-балльной интенсивностью.

Таким образом, на карте сейсмического микрорайонирования выделены зоны с 7, 8 и 9-балльными интенсивностями (сейсмичностью). К 7-балльной зоне отнесены участки, сложенные галечниками с песчано-глинистым заполнителем < 30%. К 8-балльной зоне

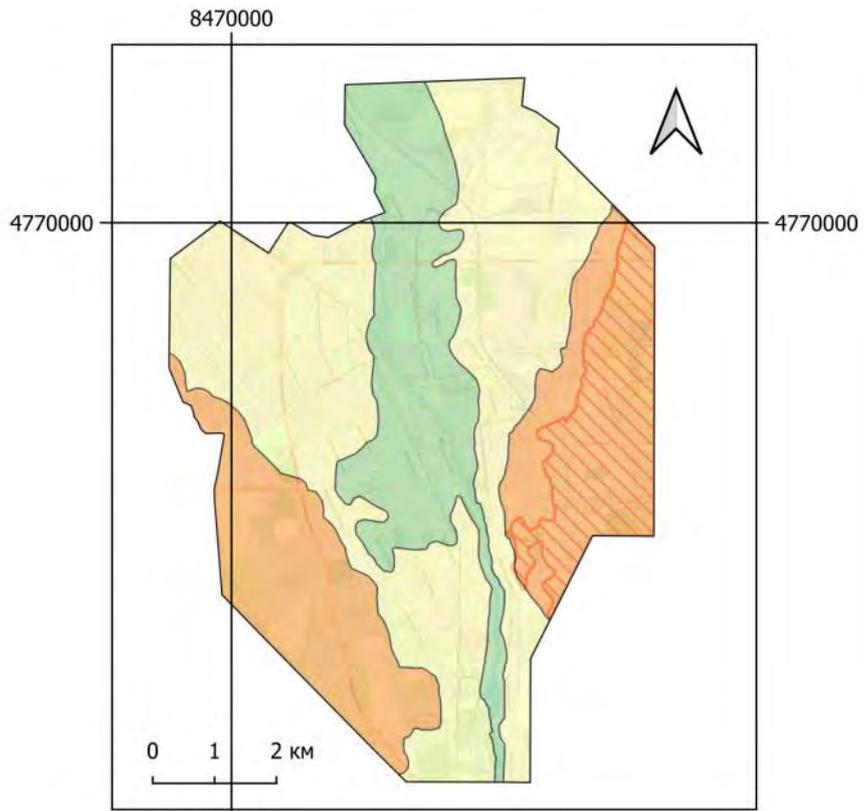
отнесены участки, сложенные глинистыми необводненными грунтами (п/тв. консистенции и т.д.) и галечниками с песчано-глинистым заполнителем $> 30\%$; к 9-балльной зоне отнесены участки, сложенные глинистыми обводненными грунтами (текучей консистенции и т.д.) и участки с наклоном превышающим 15° .

Необходимо отметить, что при фундировании на галечники с песчано-глинистым заполнителем $< 30\%$ сейсмичность участка составит 7 баллов. Такие участки из-за малого их распространения и сложности выделения точных границ по данным фондовых материалов были выделены в пойменной северной части города, но также могут присутствовать на отдельных участках 8-балльной зоны.

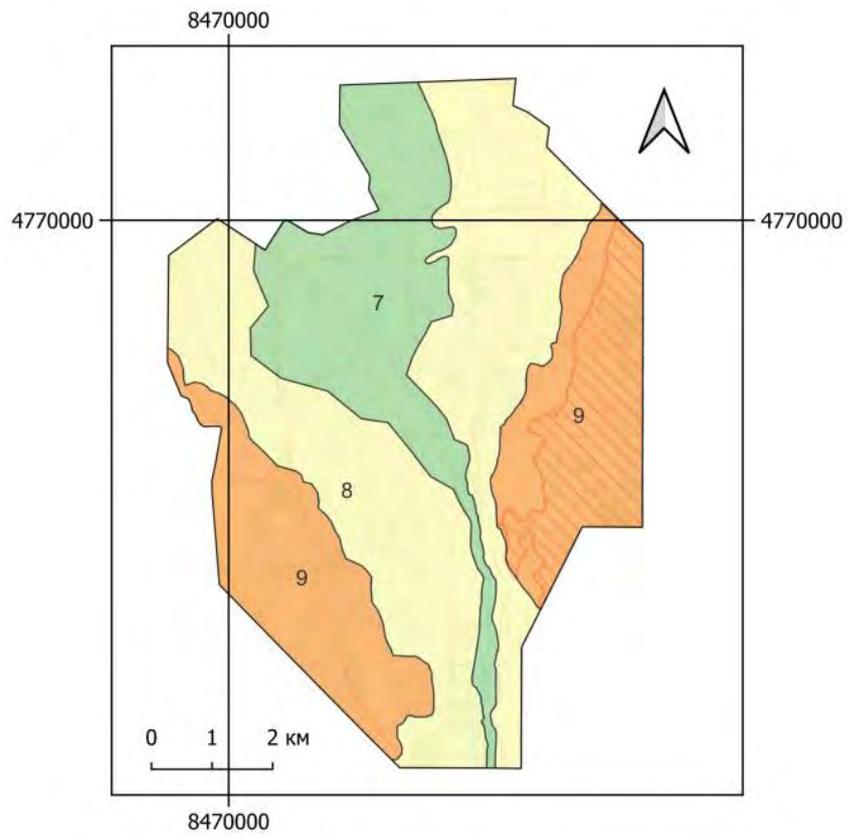
В процессе работы было выявлено отсутствие детальности в основе данных для построения карты инженерно-геологического районирования, в частности, содержание песчано-глинистого заполнителя было указано только для ряда скважин. Уточнение инженерно-геологической карты территории в задачи работы не входило. Тем не менее, была проведена большая работа по уточнению свойств грунтов современными геофизическими методами и оборудованием.

В связи с тем, что при проектировании и строительстве современных зданий и сооружений обязательным условием является проведение детальных инженерно-геологических изысканий на конкретной площадке строительства, результаты настоящего исследования вполне достаточны для сейсмостойкого строительства.

По результатам выполненной оценки построена уточненная карта-схема СМР территории г. Владикавказа – рисунок 126 [Заалишвили и др., 2024б]. Наблюдается различие в двух областях: 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).



а)



б)

Рисунок ПЗ.12. Исходная (а) и уточненная (б) карты СМР территории г. Владикавказа

Заключение

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.

Таким образом, на основе детальных исследований по критерию дисперсии разработана оригинальная 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, формирующей различный геоэкологический риск.

Литература

1. Аптикаев Ф.Ф. Параметризация записей сейсмических колебаний / Ф.Ф. Аптикаев // Вопросы инженерной сейсмологии. – 1981. – Вып. 21. – С. 3–8.
2. Аптикаев Ф.Ф. Параметры спектров реакции / Ф.Ф. Аптикаев, О.О. Эртелева // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2008. – № 56. – С. 23–25.
3. ГОСТ Р 57546-2017 "Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности" (утв. и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 19 июля 2017 г. N 721-ст). – Москва: Стандартинформ, 2017. – 32 с.
4. Гусев А.А. Стохастическое моделирование протяженного очага землетрясения для характеристики сейсмической опасности. 1. Обоснование и общая структура алгоритма / А.А. Гусев // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2013. – Т. 40. – № 1. – С. 5–18.
5. Заалишвили В.Б. Сейсмическое микрорайонирование по данным искусственного возбуждения колебаний грунтовой толщи: автореф. дис. ...канд. физ.-мат. наук: 04.00.22 / Заалишвили Владислав Борисович. – Тбилиси, 1986. – 21 с.
6. Заалишвили В.Б. Уточнение сейсмическими методами неупругих деформационных свойств грунтов в натуральных условиях на площадке проектируемой Нововоронежской АЭС-2: отчет о НИР / Заалишвили В.Б., Тимошук Е.П., Куранова О.И. и др. – Москва: АО ИСГИ. Фонды института «Атомэнергопроект», 1996.
7. Заалишвили В.Б. Инструментальный метод сейсмического микрорайонирования: научная монография / В.Б. Заалишвили. – Владикавказ: Изд-ие гос. научн. центра РСО-А, 1997. – 76 с.
8. Заалишвили В.Б. Физические основы сейсмического микрорайонирования. М.: ОИФЗ РАН, 2000. – 367 с.
9. Заалишвили В.Б. Оценка сейсмической опасности (сейсмическое микрорайонирование) территорий городов и населенных пунктов Республики Северная Осетия–Алания (первый этап). 3.2. Сейсмическое микрорайонирование территории центральной части г.Владикавказа: отчет о НИР / В.Б. Заалишвили, А.К. Джгамадзе, Д.А. Мельков, Х.О. Чотчаев, Б.В. Дзеранов и др. – Владикавказ: ГФЦЭД ВНЦ РАН и РСО-А. – Том 3, Книга 1, Книга 3, Книга 4, Том 6. – 2007. 268 с.
10. Заалишвили В.Б. Способ сейсмического микрорайонирования / В.Б. Заалишвили, Д.А. Мельков. – Патент Российской Федерации №2389044 от 10 мая 2010 г.
11. Заалишвили В.Б. Статистические характеристики расчета приращений сейсмической интенсивности при сейсмическом микрорайонировании / В.Б. Заалишвили, Д.А. Камболов, Д.А. Мельков, М.И. Фидарова // Устойчивое развитие горных территорий. – 2024б. – Т.16. – № 1 (59). – С. 345–357.
12. Заалишвили В.Б. Геоэкологические аспекты формирования интенсивности землетрясения на основе изучения инструментальных данных / В.Б. Заалишвили, Д.А. Мельков, М.И. Фидарова, Г.В. Шманатов // Геология и геофизика Юга России. – 2024в. – Т. 14. – № 2. – С. 45–60.
13. Методическое руководство по сейсмическому микрорайонированию. – М.: Наука, 1988. – 280 с.
14. Напетваридзе Ш.Г. Некоторые задачи инженерной сейсмологии. Тбилиси, Мецниереба, 1973, 162с.
15. Отчет о полевых испытаниях модернизированных источников СВ-10/100. – Гомель, 1985, – 46 с.
16. Рекомендации по сейсмическому микрорайонированию при инженерных изысканиях для строительства. – М.: Госстрой СССР, 1985. – 72 с. .

17. Республиканские строительные нормы. Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Нормы производства работ. РСН 60-86. Госстрой РСФСР. – М.: МосЦТИСИЗ Госстроя РСФСР, 1986. – 32 с..
18. Республиканские строительные нормы. Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Технические требования к производству работ. РС 65-87. Госстрой РСФСР. – М.: МосЦТИСИЗ Госстроя РСФСР, 1987. – 26 с.
19. Сейсмическое микрорайонирование территории Орджоникидзе: отчет о НИР. – Тбилиси: Институт строительной механики и сейсмостойкости им. К. Завриева АН Грузии, Машинопись, 1970. – 182 с.
20. Beresnev I.A. FINSIM – a FORTRAN Program for Simulating Stochastic Acceleration Time Histories from Finite Faults / I.A. Beresnev, G.M. Atkinson // Seismological Research Letters. – 1998. – Vol. 69. Issue 1. pp. 27–32. DOI: 10.1785/gssrl.69.1.27.
21. Zaalishvili V.B. Seismic microzoning of the town territory / V.B. Zaalishvili // Proceedings 2th Russian-Chines Regional Seminar on Earthquake Engineering. – 1992. – pp. 58–64.