

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования
«Санкт-Петербургский горный университет»

На правах рукописи

Холодилов Андрей Николаевич



НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ПРОГНОЗА ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ
ВЗРЫВНЫХ РАБОТ НА ОХРАНЯЕМЫЕ ОБЪЕКТЫ

Специальность 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант:
доктор технических наук, профессор
Господариков А.П.

Санкт-Петербург – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
 ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА В ОБЛАСТИ БЕЗОПАСНОСТИ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ ПО ВОЗДЕЙСТВИЮ СЕЙСМОВЗРЫВНЫХ И УДАРНЫХ ВОЗДУШНЫХ ВОЛН.....	17
1.1 Основные подходы к прогнозированию сейсмического воздействия взрывов	17
1.2 Современное состояние проблемы допустимого уровня динамического воздействия взрывных работ на охраняемые объекты.....	27
1.3 Нормативная база в области обеспечения безопасности охраняемых объектов и комфортного нахождения в них по колебаниям.....	32
1.4 Современные подходы к повышению точности прогноза динамического воздействия взрывных работ.....	39
1.5 Выводы по Главе 1.....	48
 ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОВМЕСТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА СЕЙСМИЧНОСТИ И ПОКАЗАТЕЛЯ ЗАТУХАНИЯ СЕЙСМОВЗРЫВНЫХ ВОЛН ДЛЯ ПРОГНОЗА СКОРОСТИ СМЕЩЕНИЯ ГРУНТА.....	50
2.1 Основные положения теоретической модели совместного определения коэффициента сейсмичности и показателя затухания.....	50
2.2 Апробация теоретической модели по результатам сейсмического воздействия массового взрыва на железнодорожный тоннель в районе карьера «Коршуновский» ПАО «Коршуновский ГОК» и следствия из нее.....	52
2.2.1 Характеристика охраняемого объекта и параметры буровзрывных работ...	53
2.2.2 Результаты воздействия массового взрыва на тоннель.....	54
2.2.3 Определение коэффициента сейсмичности и показателя затухания сейсмозрывных волн на основе разработанной теоретической модели.....	58
2.3 Проверка классификационного критерия по результатам экспериментального исследования сейсмического воздействия взрывных работ на охраняемый целик на карьере «Вуокса».....	64

2.3.1 Характеристика объекта, параметры буровзрывных работ, методика и результаты регистрации параметров сейсмозрывных волн.....	64
2.3.2 Оценка коэффициента сейсмичности по скоростям продольных и поперечных сейсмозрывных волн.....	68
2.3.3 Проверка соответствия коэффициента сейсмичности и показателя затухания сейсмозрывных волн функциональной связи между ними.....	71
2.4 Проверка классификационного критерия по результатам экспериментального исследования сейсмического воздействия технологических взрывов на надшахтные сооружения для условий ОАО «Ново-Широкинский рудник».....	73
2.4.1 Характеристика надшахтных сооружений и выбор критерия их сейсмической безопасности.....	73
2.4.2 Геологическая характеристика горных пород в зоне сотрясательного воздействия технологических взрывов.....	76
2.4.3 Параметры буровзрывных работ и методика регистрации велосиграмм....	78
2.4.4 Результаты исследования сейсмического воздействия массовых взрывов в подземных условиях.....	81
2.4.5 Определение коэффициента сейсмичности и показателя затухания сейсмозрывных волн при подземном взрывании с регистрацией на земной поверхности.....	83
2.5 Выводы по Главе 2.....	86
ГЛАВА 3 НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ КЛАССИФИКАЦИИ ВЗРЫВОВ ПО УРОВНЮ ИХ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ.....	88
3.1 Общие принципы классификации промышленных взрывов как сейсмических источников.....	88
3.2 Количественные критерии классификации сейсмических источников.....	93
3.3 Характерные особенности промышленных взрывов как источников сейсмического воздействия различных типов.....	96
3.3.1 Сейсмические источники повышенного воздействия.....	97
3.3.1.1 Обводненные грунты.....	97
3.3.1.2 Весьма крепкие горные породы.....	98
3.3.1.3 Крупномасштабные массовые взрывы.....	99

3.3.1.4	Масса одновременно взрывающихся зарядов взрывчатых веществ.....	100
3.3.1.5	Способ инициирования заряда взрывчатого вещества.....	102
3.3.2	Сейсмические источники нормального и пониженного воздействия по условиям ведения взрывных работ.....	103
3.3.2.1	Взрывание при ведении взрывных работ подземным способом с регистрацией сейсмических колебаний на земной поверхности.....	104
3.3.2.2	Массовые взрывы на карьерах с регистрацией сейсмических колебаний на земной поверхности.....	104
3.3.2.3	Взрывные работы в гражданском строительстве.....	106
3.3.2.4	Предварительное щелеобразование.....	106
3.4	Верификация границ классификации взрывов по уровню их сейсмического воздействия.....	107
3.5	Особенности отбора экспериментальных данных и их обработки при построении линейной регрессии скорости смещения.....	109
3.6	Статистические распределения коэффициента сейсмичности и показателя затухания сейсмозрывных волн.....	112
3.7	Выводы по Главе 3.....	118
ГЛАВА 4 НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ОБНАРУЖЕНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА НАЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ ПРИ ПОДЗЕМНОМ ВЗРЫВАНИИ.....		121
4.1	Постановка задачи и способ ее решения.....	121
4.2	Экспериментальное исследование сейсмозрывных волн в ближней зоне сейсмического воздействия одиночного взрыва взрывчатых веществ для условий Ново-Широкинского месторождения полиметаллических руд.....	127
4.3	Прогнозная оценка сейсмического воздействия технологических взрывов на охраняемые объекты Ново-Широкинского рудника по огибающей модуля скорости смещения.....	129
4.4	Аппроксимация волновых форм велосиграмм, полученных от технологических взрывов на Ново-Широкинском руднике.....	133
4.5	Прогноз сейсмического воздействия технологических взрывов на наземный охраняемый объект.....	142
4.6	Оценка достоверности определения параметров велосиграмм.....	144

4.7 Прогноз сейсмической обстановки перед обрушением кирпичной кладки.....	148
4.8 Принцип минимизации сейсмического воздействия технологических взрывов на основе выбора линии наименьшего сопротивления.....	152
4.9 Выводы по Главе 4.....	155
ГЛАВА 5 НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА КОЛЕБАНИЙ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ СОВМЕСТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ СЕЙСМОВЗРЫВНЫХ И УДАРНЫХ ВОЗДУШНЫХ ВОЛН.....	157
5.1 Теоретические положения способа аппроксимации эпюр колебательной скорости здания при воздействии на него ударных воздушных волн.....	157
5.2 Исследование воздействия ударных воздушных волн на жилой дом.....	159
5.3 Определение радиальных колебательных мод здания.....	160
5.4 Анализ динамического воздействия одиночным импульсом ударной воздушной волны на наземное сооружение.....	164
5.5 Прогноз колебательного процесса охраняемого объекта после воздействия на него импульса ударной воздушной волны.....	169
5.6 Функциональная зависимость между пиковой скоростью колебаний здания и пиковым избыточным давлением на фронте ударной воздушной волны.....	173
5.7 Оценка достоверности модельных параметров колебаний.....	175
5.8 Основные сведения об обогатительной фабрике №16.....	176
5.8.1 Краткая характеристика охраняемого объекта.....	176
5.8.2 Геологическая характеристика и физико-механические свойства горных пород района расположения охраняемого объекта.....	177
5.8.3 Краткая характеристика буровзрывных работ.....	178
5.9 Средства измерения параметров динамического воздействия взрывных работ на карьере.....	180
5.9.1 Измерительная установка для определения параметров ударных воздушных волн на основе цифрового осциллографа TDS3034B.....	180
5.9.2 Апробация измерительной установки в полигонных условиях.....	182
5.10 Оценка коэффициента сейсмичности многолетнемерзлых грунтов.....	183

5.11 Исследование и прогноз уровня воздействия сейсмозрывных волн от массовых взрывов и взрывов наружных зарядов взрывчатых веществ на обогатительную фабрику.....	185
5.12 Результаты исследования колебаний верхней части обогатительной фабрики при взрывании наружных зарядов взрывчатых веществ.....	191
5.13 Результаты совместных исследований динамического воздействия массовых взрывов и взрывов наружных зарядов взрывчатых веществ на обогатительную фабрику.....	193
5.14 Прогноз динамического воздействия карьерных массовых взрывов на охраняемый объект по фактору ударной воздушной волны.....	199
5.15 Определение параметров собственных колебательных мод обогатительной фабрики по эпюрам колебательной скорости.....	204
5.16 Анализ колебательных мод обогатительной фабрики при динамическом воздействии взрывных работ на карьере.....	211
5.17 Обсуждение совместного воздействия сейсмозрывных и ударных воздушных волн на охраняемый объект.....	215
5.18 Выводы по Главе 5.....	217
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	221
СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ.....	225
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	228
ПРИЛОЖЕНИЕ А Иллюстративный материал к главе 2.....	249
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт внедрения в АО «ЕВРАЗ ЗСМК».....	253
ПРИЛОЖЕНИЕ В Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017660214.....	254
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023614973.....	255
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023616009.....	256

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Буровзрывные работы нашли широкое применение при добыче твердых полезных ископаемых. При этом не более 15...20% энергии взрывчатых веществ идет на дробление горных пород. Часть неиспользуемой энергии расходуется на образование сейсмозрывных волн (далее - СВВ) и ударных воздушных волн (далее - УВВ). Последние характеризуются большим радиусом действия и являются причиной негативного воздействия на близлежащие производственные и социальные охраняемые объекты, существенно снижая их эксплуатационные характеристики вплоть до катастрофического разрушения несущих элементов, служат причиной дискомфорта пребывания в них производственного персонала и населения.

Технология буровзрывных работ постоянно совершенствуется: появляются новые промышленные взрывчатые вещества и средства их инициирования. Процесс внедрения новых технологических решений в производство, как правило, сопровождается изменением уже отработанных проектных параметров буровзрывных работ. В частности, это связано с погрешностями интервалов короткозамедленного взрывания широко используемых систем инициирования неэлектрического взрывания. Следствием этого может быть высокий уровень сейсмического воздействия на здания и сооружения.

В процессе отработки месторождения полезного ископаемого, особенно подземным способом, развивается обширная сеть горных выработок. В результате этого происходит перераспределение потоков сейсмической энергии от взрывного источника, которое создает предпосылки дополнительного сейсмического воздействия на охраняемые объекты.

Несмотря на достаточную изученность воздействия УВВ на наземные здания и сооружения относительно их раскачки по сравнению с аналогичным воздействием СВВ, периодически возникают претензии относительно высокого уровня колебаний объектов. Это относится к взрывам на карьерах, дроблению

негабаритов и утилизации боеприпасов взрывным способом. При этом уровень избыточного давления на фронте УВВ, как правило, не превышает 200 Па и часто бывает меньше указанного значения.

Таким образом, необходимость разработки научных основ прогноза динамического воздействия взрывных работ на охраняемые объекты является неотъемлемой частью обеспечения безопасного ведения буровзрывных работ.

Степень разработанности темы исследования

Фундаментальные основы воздействия УВВ и СВВ на здания и сооружения были заложены академиками М.А. Садовским, Е.И. Шемякиным, В.В. Адушкиным и др. Большой вклад в дальнейшие теоретические исследования по данной тематике и внедрение практических результатов в производственную практику внесли В.А. Белин, Е.К. Борисов, С.Д. Викторов, М.А. Ганопольский, А.П. Господариков, Н.Н. Гриб, А.А. Еременко, В.М. Закалинский, С.А. Козырев, Б.Н. Кутузов, С.В. Медведев, М.Г. Менжулин, П.С. Миронов, В.Н. Мосинец, В.С. Очиров, Л.В. Сафонов, А.А. Спивак, В.Н. Тюпин, Я.И. Цейтлин, Б.В. Эквист и др. Среди зарубежных ученых, предложивших различные формулы для оценки сейсмического воздействия взрыва, следует отметить Duvall N.I., Ambrasey N.R., Hendron A.J., Langefors U., Kihlstrom B. В последнее десятилетие проблема прогнозирования уровня воздействия промышленных взрывов на охраняемые объекты базируется на широком применении методов искусственных нейронных сетей (Khandelwal M., Singh T.N.).

Однако, существующие способы обеспечения безопасного ведения взрывных работ не позволяют в полной мере спрогнозировать реакцию охраняемых объектов даже в случае слабых воздействий СВВ и УВВ. Обозначенная проблема требует проведения экспериментально-теоретических исследований, позволяющих выявлять опасные резонансные проявления динамического воздействия взрывных работ на начальных стадиях их развития, на основе современных методологических подходов к определению динамических характеристик наземных зданий и сооружений, грунтов вблизи их оснований.

В целом, за последние десятилетия накоплен обширный экспериментальный материал по воздействию СВВ и УВВ на наземные объекты, который требует систематизации для развития научных основ в области обеспечения безопасного ведения буровзрывных работ. Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика по пункту 5 «Теоретические основы, математические модели и способы управления состоянием и поведением массивов горных пород и грунтов с целью обеспечения устойчивости горных выработок, подземных и наземных сооружений, предотвращения проявлений опасных горно-геологических явлений» и пункту 10 «Воздействие взрывов на массив горных пород, горные выработки, подземные и наземные сооружения, на окружающую среду».

Объект исследования – взрывные работы на месторождениях твердых полезных ископаемых, добываемых открытым и подземным способами.

Предмет исследования – динамические характеристики наземных зданий и сооружений, грунтов вблизи их оснований.

Цель работы – установление закономерностей пространственного и временного распределения СВВ и УВВ при ведении взрывных работ, позволяющих обосновать прогноз колебаний охраняемых объектов.

Идея работы – прогноз и управление динамическим воздействием при производстве взрывных работ для обеспечения безопасности охраняемых объектов необходимо осуществлять на основе экспериментально установленных закономерностей и теоретических моделей пространственного и временного распределения СВВ и УВВ.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения следующих **задач**:

- провести анализ современного состояния вопроса в области обеспечения безопасного ведения взрывных работ по воздействию СВВ и УВВ на охраняемые объекты;

- разработать теоретическую модель совместного определения коэффициента сейсмичности и показателя затухания сейсмозрывных волн (далее – показатель затухания) для повышения надежности прогноза скорости смещения грунта в основании охраняемого объекта;

- разработать научные основы классификации взрывов по уровню опасности их сейсмического воздействия на охраняемые объекты;

- разработать теоретическую модель обнаружения сейсмических воздействий как источников неучтенных опасностей для наземных охраняемых объектов при ведении взрывных работ в подземных условиях;

- провести исследование динамического воздействия на здания и сооружения при взрывании на земной поверхности и разработать способ определения колебательных мод наземных охраняемых объектов при импульсном воздействии УВВ и способ обнаружения опасного совместного воздействия СВВ и УВВ на охраняемый объект.

Таким образом, **актуальной задачей** исследований является реализация экспериментально-теоретического подхода к прогнозу динамического воздействия взрывных работ на охраняемые объекты.

Научная новизна работы:

1. Впервые установлены пространственные и временные закономерности скорости смещения грунта при ведении взрывных работ на карьерах с учетом зависимости между коэффициентом сейсмичности и показателем затухания, позволяющие существенно повысить надежность прогноза сейсмического воздействия на охраняемые объекты при меньшей выборке экспериментальных данных.

2. Впервые разработана классификация взрывных работ как сейсмических источников по степени их опасности: повышенного, нормального и пониженного воздействий на охраняемые объекты.

3. Установлены логнормальный и нормальный законы распределений коэффициента сейсмичности и показателя затухания соответственно, что

позволяет расширить возможности учета факторов, влияющих на количественные оценки прогноза воздействия СВВ на охраняемые объекты.

4. Установлены уровни сейсмического воздействия на наземные сооружения в зависимости от относительного вклада поверхностных и объемных СВВ в модуль вектора скорости смещения грунта, позволяющие выделить наиболее опасное воздействие поверхностных СВВ на охраняемые объекты.

5. Впервые определены условия возникновения и предупреждения опасных резонансных явлений в системе «грунт – охраняемый объект» при короткозамедленном взрывании по факторам как воздействия СВВ, так и совместного воздействия СВВ и УВВ на охраняемый объект.

Теоретическая значимость работы заключается:

1. В выявлении дополнительных источников сейсмических колебаний, представляющих потенциальную угрозу охраняемым объектам при ведении взрывных работ;

2. В установлении теоретических закономерностей между коэффициентом сейсмичности и показателем затухания;

3. В обосновании вида и параметров статистических распределений коэффициента сейсмичности и показателя затухания;

4. В установлении факта связи между уровнем динамического воздействия на охраняемый объект и смещением его колебательного спектра;

5. В доказательстве совместного воздействия СВВ и УВВ на охраняемый объект с учетом короткозамедленного взрывания.

Практическая значимость работы:

1. Разработаны научные основы прогноза сейсмического воздействия взрывных работ с учетом связи между коэффициентом сейсмичности и показателем затухания.

2. Разработаны принципы количественной классификации взрывных источников по их сейсмическому воздействию.

3. Разработан критерий безопасного ведения взрывных работ при наличии дополнительных источников сейсмических колебаний.

4. Разработаны подходы снижения совместного воздействия СВВ и УВВ на охраняемый объект.

5. Получен акт внедрения в АО «ЕВРАЗ ЗСМК» от 17.04.2023 (Приложение Б).

Реализация работы. Диссертационная работа выполнена в период с 2003 года по 2023 год на кафедре взрывного дела. Проведены научно исследовательские работы: «Экспертная оценка воздействия взрывных работ на обогатительную фабрику № 16 и нефтебазу, находящуюся в зоне горных работ, и разработка рекомендаций, обеспечивающих безопасность ведения горных и взрывных работ на карьере «Нюрбинский»» (2003г., 2004г.); научно исследовательская работа по контрактам № К39.05/09/03/0079, № К39.15/06/04.0063 «Разработка технологий и мер по снижению уровня опасного техногенного воздействия взрывных работ на горнодобывающих предприятиях и уменьшению потерь минерального сырья» (2003-2005 г.г.); научно исследовательская работа «Разработка технологических мероприятий по снижению уровня опасного воздействия взрывных работ на окружающую среду и повышение эффективности использования природных ресурсов», г/б № 6.30.008.2 (2007 г.); научно исследовательская работа «Отработка параметров буровзрывных работ в условиях Ново-Широкинского месторождения» по договору с ОАО «Ново-Широкинский рудник» (2010 г.); научно исследовательская работа «Исследование и экспертная оценка безопасности действующего газопровода при ведении вблизи него буровзрывных работ» по договору с ОАО «Ленгазспецстрой» (2011 г.); научно исследовательская работа № 5857 от 11.01.2012 г. «Разработка технологий и рекомендаций по снижению опасных факторов техногенного воздействия взрывных работ и уменьшению потерь минерального сырья на горнодобывающих предприятиях», проводимой по заданию Министерства образования и науки Российской Федерации (2012 г.).

Методология и методы исследования. В основу методологии исследований диссертационной работы легли труды ученых в области теории

сейсмике промышленных взрывов, УВВ, а также научные разработки, посвященные методам определения параметров СВВ и УВВ.

Использовались методы поиска и обработки научно-технической информации с помощью российской библиографической базы «РИНЦ» и зарубежной наукометрической базы «Scopus»; современные методы математической статистики и цифровой фильтрации при обработке и анализе экспериментальных данных; полигонные и промышленные исследования параметров СВВ и УВВ; математическое моделирование отклика наружных объектов и грунта на динамическое воздействие от взрывных работ.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Прогнозное значение скорости смещения грунта в основании охраняемых объектов по сейсмическому фактору безопасного ведения взрывных работ на карьерах необходимо определять классификационным критерием уровня сейсмического воздействия взрыва на основе коэффициента сейсмичности в диапазоне от 100 до 800 и показателя затухания в диапазоне 1,56-2,04.

2. Классификационные критерии для оценки опасности взрывов как сейсмических источников, характеризуемых колебательной скоростью, измеренной в см/с, по соотношению между показателем затухания - n в диапазоне 0,7-3,8 и коэффициентом сейсмичности K в диапазоне от 6 до $3 \cdot 10^3$ определяются следующим образом: сейсмические источники повышенного воздействия - $n < 0,23 \ln K + 0,33$, нормального воздействия - $0,23 \ln K + 0,63 \geq n \geq 0,23 \ln K + 0,33$ и пониженного воздействия - $n > 0,23 \ln K + 0,63$.

3. Прогноз уровня сейсмического воздействия на наземные сооружения в зависимости от интервалов времени короткозамедленного взрывания, а также оперативное обнаружение опасных колебаний в системе «грунт – охраняемый объект» при ведении взрывных работ в подземных условиях следует вести по способу аппроксимации волновых форм велосиграм с использованием эллиптических фильтров низкой частоты 2-го порядка.

4. Опасность взрывных работ на земной поверхности по фактору колебаний объектов, расположенных в зоне воздействия слабых ударных воздушных и

сейсмических волн, характеризуется совместным воздействием сейсмозрывной и ударной воздушной волн, приводящим к усилению колебаний при переходе от нижней части сооружения к его крыше до 15 раз, и снижением уровня колебаний при увеличении интервала времени короткозамедленного взрывания от 20 мс до 45 мс.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена:

- соответствием методологии анализа СВВ и УВВ научно доказанным и практически апробированным положениям теоретических и прикладных наук и непротиворечивостью разработанных в диссертационной работе теоретических моделей существующим научным представлениям;

- использованием известных методик и специализированного оборудования, применяемого в международной практике ведения взрывных работ, для регистрации и обработки СВВ и УВВ;

- статистически значимым объемом экспериментальных данных, полученным для широкого диапазона изменения основных параметров буровзрывных работ (весьма детально исследовано более 30 взрывов различного назначения);

- областью достоверного определения параметров СВВ и УВВ, в пределах которой устанавливается соответствие между модельными и экспериментальными кривыми;

- широкой географией измеренных и заимствованных экспериментальных данных (около сотни пар значений коэффициента сейсмичности и показателя затухания).

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях:

1. Закономерности динамического воздействия взрывных работ на охраняемые объекты. XXXI Международный научный симпозиум «Неделя горняка-2023» 30 января – 3 февраля 2023 г., Москва.

2. Современные методы прогнозирования динамического воздействия взрывных работ на охраняемые объекты. IV Международная научно-практическая

конференция: Санкт-Петербургский горный университет, 26-28 октября 2021 г., Санкт-Петербург.

3. Методика прогнозирования колебаний наземных объектов при импульсном воздействии воздушных ударных волн. XXVIII Международный научный симпозиум «Неделя горняка-2020» 27-31 января 2020 г., Москва.

4. Методология оперативного прогнозирования сейсмического действия массовых взрывов. II-я международная научно-техническая конференция «Инновационное развитие горнодобывающей отрасли», 14 декабря 2017 г., Кривой Рог, Украина.

5. Методология оценки сейсмической безопасности массовых взрывов, производимых на подземных рудниках вблизи надшахтных сооружений. «Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование». Международная научно-практическая конференция, посвященная 110-летию горного факультета: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 28-29 октября 2015 г., Санкт-Петербург.

6. A new approach in seismic safety evaluation for blasting operations performed by Russian mining companies. 14th SGEM GeoConference on Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining, 17-26 June 2014, Bulgaria.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования, разработке теоретических моделей, проведении полигонных и промышленных измерений, получении основных теоретических и практических результатов в области динамического воздействия взрывных работ на охраняемые объекты, в анализе и обобщении материалов, представленных в публикациях, которые выполнены в соавторстве.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 25 печатных работах (пункты списка литературы № 11-14, 65, 101-103, 142-152, 175, 201-205), в том числе в 10 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени

кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 5 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ (приложения В, Г, Д).

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 5 глав с выводами по каждой из них, заключения, словаря терминов, списка литературы, включающего 246 наименований, и 5 приложений. Диссертация изложена на 256 страницах машинописного текста, содержит 100 рисунков и 33 таблицы.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность научному консультанту доктору технических наук Господарикову А.П., доктору технических наук Белину В.А., доктору технических наук Ганопольскому М.И., доктору технических наук Еременко А.А. за ценные замечания при выполнении и обсуждении результатов исследований, сотрудникам кафедры взрывного дела за советы и помощь, оказанные при выполнении работы, а также членам ученого совета ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности» за вопросы, позволившие улучшить изложение основных положений диссертации.

ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА В ОБЛАСТИ БЕЗОПАСНОСТИ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ ПО ВОЗДЕЙСТВИЮ СЕЙСМОВЗРЫВНЫХ И УДАРНЫХ ВОЗДУШНЫХ ВОЛН

Академик М.А. Садовский по праву считается основоположником теории и практики в области безопасности взрывных работ по динамическим факторам взрыва: СВВ и УВВ [112]. В конце первой половины прошлого века М.А. Садовский установил надежную корреляцию между максимальной векторной скоростью смещения грунта u_{Σ} вблизи фундамента наземных зданий и сооружений и их степенью поврежденности. На основании принципа энергетического подобия им была обоснована формула, связывающая величину u_{Σ} с массой одновременно взрывааемых зарядов взрывчатого вещества Q и расстоянием R , вида (1.1):

$$u_{\Sigma} = K(\bar{R})^{-n}, \quad (1.1)$$

где $\bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{Q}}$ – приведенное расстояние, м/кг^{1/3},

K и n – параметры, определяемые из инструментальных измерений.

Докторская диссертация М.А. Садовского «Механическое действие воздушных ударных волн взрыва по данным экспериментальных исследований» (1952 г.) была посвящена решению вопросов определения таких параметров УВВ как избыточное давление на фронте УВВ, длительность положительной фазы, импульс УВВ и связи их с массой взрывчатого вещества и удаленностью от взрыва. М.А. Садовский сформулировал принципы расчета нагрузок на сооружения при воздействии на них УВВ. Идеи М.А. Садовского продолжили развитие в работах академиков В.В. Адушкина [3-5], Е.И. Шемякина [92, 158].

1.1 Основные подходы к прогнозированию сейсмического воздействия взрывов

Проблема сейсмического воздействия взрывных работ на охраняемые объекты связана с двумя взаимно исключаящими аспектами: ограничение

негативного эффекта с позиций безопасности и обеспечение необходимой производительности взрывных технологий относительно экономической эффективности горных работ. Компромисс достигается постоянным улучшением характеристик взрывчатых материалов, средств инициирования, конструкций зарядов, автоматизацией проектирования буровзрывных работ, мониторингом качества взрывов. Существенный вклад в развитие этой проблематики внесли В.Л. Барон, В.А. Белин, Е.К. Борисов, С.Д. Викторов, М.А. Ганопольский, А.П. Господариков, А.А. Еременко, В.М. Закалинский, С.А. Козырев, Б.Н. Кутузов, А.В. Лещинский, С.В. Медведев, М.Г. Менжулин, В.Н. Мосинец, Л.В. Сафонов, А.А. Спивак, В.Н. Тюпин, В.А. Фокин, А.Н. Ханукаев, Я.И. Цейтлин, Е.Б. Шевкун, Е.Н. Шер, Б.В. Эквист, N.R. Ambraseys, N.I. Duvall, A.J. Hendron, V. Kihlstrom, U. Langefors, и другие ученые. Основные результаты отражены в монографиях [8, 20, 71, 84, 87, 88, 137 156, 222], в справочных и научно-практических руководствах [165, 120], в учебных пособиях [75, 104, 119].

На практике для прогноза сейсмического воздействия взрывов используют линейную корреляционную зависимость между колебательной скоростью и приведенным расстоянием, которая вытекает из формулы (1.1), в виде (1.2):

$$\ln(v_{\Sigma}) = \ln(K) - n \cdot \ln\left(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}}\right), \quad (1.2)$$

где K – коэффициент сейсмичности,

n – показатель затухания.

Параметры K и n считаются независимыми и определяются методами линейного регрессионного анализа. Надежность прогноза обеспечивается весьма представительной выборкой экспериментальных данных по колебательным скоростям и приведенным расстояниям. Согласно рекомендациям OSMRE (the Office of Surface Mining Reclamation and Enforcement) [183] для установления надежной корреляционной связи между колебательной скоростью и приведенным расстоянием требуется не менее 30 пар по K и n , что является сдерживающим фактором при ведении взрывных работ на начальных этапах горного производства. Поэтому в ряде случаев [32, 88, 119, 133, 156] считается, что $n = 1,5$

(наиболее вероятное значение параметра), а для него определяется нормированный коэффициент сейсмичности $K_{1,5}$.

Аналогом формулы (1.1) служит выражение, заимствованное из статьи [54] и вытекающее из нормативного источника [29], вида (1.3):

$$v = v_0(R_0/R)^\alpha e^{-\delta(R-R_0)}, \quad (1.3)$$

где v_0 – амплитуда скорости смещения на расстоянии R_0 ,

δ – коэффициент поглощения,

α – показатель геометрического затухания СВВ (для поверхностной волны $\alpha = \frac{1}{2}$ [29], для объемной волны $\alpha = 1$ [232]).

В работе [54] в результате исследований затухания вертикальной компоненты скорости смещения поверхностной СВВ, сгенерированной взрывом камуфлетного заряда взрывчатого вещества массой 10 кг в лессовидных песках и супесях, получены следующие значения величин, входящих в формулу (1.3): $v_0 = 1,3$ см/с при $R_0 = 50$ м; $\delta = 0,045$ м⁻¹. Пересчет зависимости (1.3) через параметры формулы (1.1) привел к значениям $K = 2,7 \cdot 10^5$ и $n = 3,89$. Качество согласованности экспериментальных данных [54] и их аппроксимации с помощью формулы (1.2) демонстрируется рисунком 1.1.

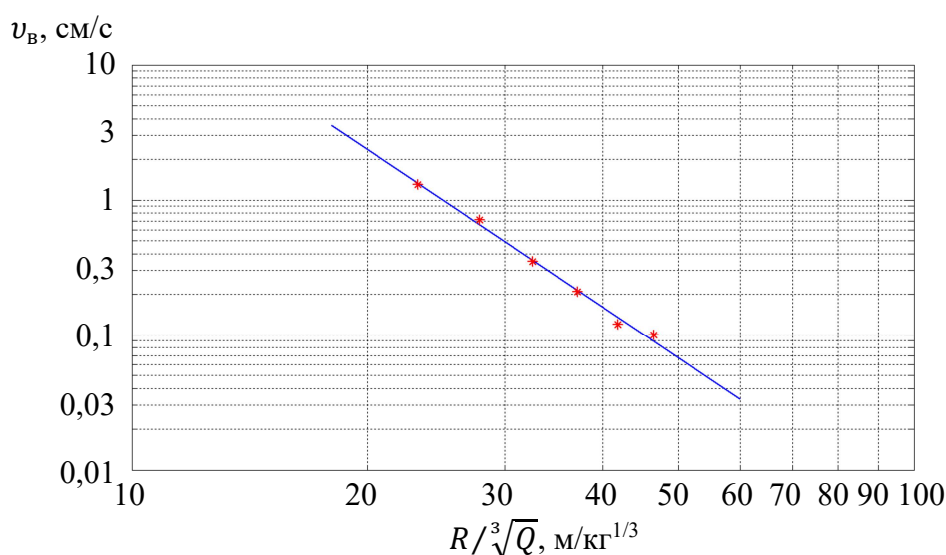


Рисунок 1.1 – Зависимость амплитуды вертикальной компоненты скорости смещения грунта от приведенного расстояния: сплошная линия – аппроксимация,

* - экспериментальные данные, заимствованные из [54]

Путем несложных алгебраических преобразований можно показать переход от формулы (1.3) к частному случаю формулы М.А. Садовского. Для этого воспользуемся подходом, изложенным в статье [232]. Были сделаны следующие допущения: среда считается непоглощающей, т.е. $\delta = 0$; рассматривается только поверхностная волна, распространяющаяся со скоростью c_R с преобладающей частотой колебаний f в слое грунта мощностью $h_{гр} = \frac{c_R}{3f}$. Тогда зависимость энергии, переносимой СВВ, от расстояния будет вида (1.4):

$$E(R) = E_0 \cdot R_0/R. \quad (1.4)$$

Объемная плотность энергии связана с амплитудным значением скорости смещения u_M выражением (1.5):

$$\varepsilon_v = \frac{1}{2} \rho u_M^2, \quad (1.5)$$

где ρ – объемная масса грунта.

Эффективный объем грунта, в котором переносится сейсмическая энергия, вычисляется по формуле (1.6):

$$V_c = \pi R^2 h_{гр} = \pi R^2 \frac{c_R}{3f}. \quad (1.6)$$

Учитывая, что $E(R) = \varepsilon_v V_c$, а также выражения (1.4), (1.6), получим выражение для амплитудного значения скорости смещения вида (1.7):

$$u_M = \sqrt{\frac{6E_0 R_0 f}{\pi \rho c_R}} R^{-1,5}. \quad (1.7)$$

Удобно связать R_0 с радиусом зоны начала сейсмического воздействия взрыва $R_{зс}$, а энергию сейсмических колебаний E_0 с удельной теплотой взрыва $\varepsilon_{взр}$ в виде $E_0 = K' \varepsilon_{взр} Q$, где K' доля энергии взрыва, переходящая в сейсмическую энергию. Тогда формула (1.7) примет вид (1.8):

$$u_M = \left(\frac{6K' \varepsilon_{взр} R_{зс} f}{\pi \rho c_R} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}} \right)^{-1,5}. \quad (1.8)$$

Сопоставляя (1.8) с (1.1), найдем, что $K = \left(\frac{6K' \varepsilon_{взр} R_{зс} f}{\pi \rho c_R} \right)^{1/2}$, $n = 1,5$. Отметим, что энергетический подход к сейсмическому воздействию взрыва рассмотрен так же в работе [135]. Дадим оценку коэффициента сейсмичности. Согласно [88] $R_{зс} = 120R_{скв}$, где $R_{скв}$ радиус взрывной скважины, в сейсмической воздействие

переходит порядка 1% энергии взрыва, т.е. $K' = 0,01$. Для аммонита бЖВ примем $\varepsilon_{\text{взр}} = 4 \cdot 10^6$ Дж/кг. Будем считать коэффициент сейсмичности для взрывных скважин $R_{\text{СКВ}} = 0,125$ м, пробуренных в нерудных породах с $\rho = 2,7 \cdot 10^3$ кг/м³. Остальные параметры примем согласно [232]: $f = 30$ Гц, $c_R = 1,8 \cdot 10^3$ м/с. После подстановки численных значений параметров в выражение для коэффициента сейсмичности получим:

$$K = \left(\frac{6 \cdot 0,01 \cdot 4 \cdot 10^6 \cdot 120 \cdot 0,125 \cdot 30}{3,14 \cdot 2,7 \cdot 10^3 \cdot 1,8 \cdot 10^3} \right)^{1/2} \approx 2,7 \text{ м}^{-5/2} \text{ с}^{-1} \text{ кг}^{-1/2}.$$

Откуда формула (1.8) примет следующий вид (1.8'):

$$v_M = 2,7 \left(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}} \right)^{-1,5} \text{ (м/с)} \text{ или } v_M = 270 \left(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}} \right)^{-1,5} \text{ (см/с)}. \quad (1.8')$$

Оценка параметров в формулах (1.8') соответствует дальней зоне сейсмического воздействия взрыва. Однако эти параметры получены при условии отсутствия поглощения СВВ горными породами. Отчасти такой подход справедлив для крупномасштабных взрывов, когда доминируют СВВ с малыми частотами колебаний, а также, когда сейсмическое воздействие массовых взрывов исследуется на больших приведенных расстояниях (до 10^5 м/кг^{1/3}). В частности, значения показателя затухания СВВ могут достигать до значений $n = 1,24$ [3] при прохождении сейсмической трассы в крепких слабонарушенных горных породах. В этом случае согласно [22] предложена линейная зависимость показателя затухания СВВ от ранга (размера) структурно-тектонических блоков.

С уменьшением масштаба взрыва преобладающие частоты сейсмических колебаний возрастают, а вместе с ними и резко возрастает коэффициент поглощения среды [30]. Поэтому показатель затухания СВВ реально может быть больше 1,5. В частности [46] при использовании $n = 1,5$ прогнозные оценки скорости смещения грунта превышали результаты измерений. Следует обратить внимание на то, что современные технологии короткозамедленного взрывания позволяют существенно снизить массу одновременно взрываемого заряда взрывчатого вещества. Здесь речь не идет о ближней зоне сейсмического воздействия взрыва, когда $n \approx 2$ [158].

Примечательно, что подход [232], приведший к частному виду формулы М.А. Садовского, изначально применялся для анализа данных, изучаемых с помощью формулы USBM (United States Bureau of Mines), в которой используется приведенное расстояние вида R/\sqrt{Q} . Считается [183, 227], что при отношении длины колонки заряда взрывчатого вещества к ее диаметру больше 6-и фронт СВВ является цилиндрическим и поэтому для обработки данных должна использоваться формула USBM, в противном случае – формула М.А. Садовского. Анализ литературных источников [173, 196] указывает на большое количество аналитических выражений, используемых для прогнозирования скорости смещения грунта, которые обобщаются в виде (1.9):

$$v_{\Sigma} = KR^a Q^b, \quad (1.9)$$

где K , a , b – параметры, определяемые экспериментально.

В таблицу 1.1 сведены формулы, наиболее часто используемые для прогноза скорости смещения грунта.

Таблица 1.1 - Формулы для прогноза скорости смещения грунта

Авторы	Вид
М.А. Садовский	$v = K(R/\sqrt[3]{Q})^{-n}$
United States Bureau of Mines (USBM)	$v = K(R/\sqrt{Q})^{-n}$
Индийский стандарт, В. Kihlstrom, U. Langefors	$v = K\left(\frac{Q}{R^{2/3}}\right)^{-n}$
A. Ghosh, J.J.K. Daemen [186]	$v = K(R/\sqrt{Q})^{-n} e^{-\alpha R}$
R. Rai, T. N. Singh [230]	$v = KR^{-b} Q^a e^{-\alpha R}$
Центральный научно-исследовательский институт горной промышленности, Индия [230]	$v = n + K\left(\frac{R}{\sqrt{Q}}\right)^{-1}$
Н.Н. Гриб и др. [45]	$v = a\left(\sqrt[3]{Q/R}\right)^3 + b\left(\sqrt[3]{Q/R}\right)^2 + c\left(\sqrt[3]{Q/R}\right) + d$

Как было показано выше, экспериментальные данные можно аппроксимировать выражениями, существенно отличающимися по виду. Разница будет заключаться в значениях коэффициента корреляции [173, 187, 230]. Однако предпочтение отдается формулам М.А. Садовского и USBM.

Из качественного анализа пар коэффициент сейсмичности – показатель затухания, представленных В.Н. Мосинцом [88], вытекает факт существования связи между этими параметрами. Установление такой связи позволило бы сократить объем выборки для определения явного вида формулы для прогнозирования колебательной скорости, а отклонение от такой связи дало бы возможность оценить взрывные работы по сейсмическому воздействию. Впервые на это было обращено внимание в статье [149]. Кроме того, в статье [242] для приведенного расстояния R/\sqrt{Q} имеются указания на факт наличия корреляционной связи между коэффициентом сейсмичности и показателем затухания.

Известно, что в коэффициенте сейсмичности учитываются как горно-геологические характеристики месторождения, так и особенности ведения взрывных работ. За последние 20-30 лет достигнуты большие успехи в снижении сейсмического воздействия взрыва путем управления короткозамедленным взрыванием при использовании систем инициирования неэлектрического взрывания и систем электронного взрывания [16, 159]. Теоретические исследования в области сейсмического воздействия массовых взрывов на карьерах приводят к выводу, что существуют предельные значения интервала замедления, при которых снижается это воздействие [123]. Однако существуют проблемы, связанные с точностью интервалов времени короткозамедленного взрывания систем инициирования неэлектрического взрывания, как при открытом, так и подземном способе разработке месторождений, что выражается отклонением интервалов замедления до 10% и более от номинальных значений и даже приводит практически к одновременному взрыванию групп зарядов с различными временами замедления [26, 27, 17, 43, 160]. Последнее обстоятельство объясняется в рамках вероятностного подхода [21]. Разработаны

мероприятия, позволяющие минимизировать этот недостаток средств инициирования [162-164, 190].

Влияние конструкции заряда взрывчатого вещества на сейсмическое воздействие взрыва рассмотрено в статье [28], а именно: показано, что рассредоточение заряда инертным промежутком и применение внутрискважинного замедления позволяет уменьшить сейсмический эффект до 68% при взрывании на карьере и регистрации в шахте.

Положение точки инициирования скважинного заряда может влиять на сейсмическое воздействие взрыва при ведении горных работ открытым способом [67, 197, 245,]. Исследованиями [67] показано, что при переходе от нижнего к верхнему инициированию сейсмическое воздействие взрыва увеличивается до 2-х раз, однако, может возрасти вертикальная компонента скорости смещения [245]. Согласно данным [197] по мере удаления от эпицентра взрывных работ влияние положения точки инициирования на эффективность снижения сейсмического воздействия нивелируется.

Выбор схемы взрывания также влияет на сейсмическое воздействие взрыва. В работе [76] сравниваются диагональная и последовательно-встречная схемы короткозамедленного взрывания. Преимущество последней схемы заключается в возможности выбора повышенных интервалов замедления поскважинного взрывания, обеспечивая отбойку на открытую поверхность и снижая влияние погрешностей систем инициирования неэлектрического взрывания на качество взрывных работ. Условие минимизации негативного воздействия поверхностных СВВ при порядной схеме взрывания рассмотрено в статье [90].

Эффективность снижения сейсмического воздействия взрывных работ достигается методами предварительного щелеобразования (сейсмического экранирования) в задачах снижения сейсмических нагрузок на здания и сооружения [77-78], обеспечения сохранности контурного массива [59, 136], устойчивости горных склонов [209]. В последнем случае предложена модифицированная формула М.А. Садовского, в которой отдельно учитывается расстояние по горизонтали D и перепад высот H , вида (1.10):

$$v = K \left(\frac{D}{\sqrt[3]{Q}} \right)^{-\alpha} \left(\frac{H}{\sqrt[3]{Q}} \right)^{-\beta}, \quad (1.10)$$

где α и β – эмпирические параметры.

Однако удовлетворительные результаты получаются и с применением обычной формулы М.А. Садовского. Влияние естественных сейсмических экранов (тектонических разломов) на снижение сейсмического воздействия взрывных работ изучалось в работе [188]. Наличие разлома в сравнительно однородном горном массиве снижает колебательную скорость в 1,5-2 раза.

По мере возрастания объемов выработанного пространства в процессе ведения горных работ в сочетании с естественной трещиноватостью, наличием тектонических нарушений создаются предпосылки повышенной сейсмичности на территориях горных предприятий и районах, примыкающих к ним, в частности, связанных с резонансными явлениями в горном массиве [49]. Резонансные явления связываются со слоистым строением осадочных пород, залегающих на скальном фундаменте. Это создает предпосылки избирательного усиления колебаний осадочной толщи (до 10-и раз) в результате интерференции сейсмических волн и при совпадении частот сейсмических колебаний с собственными частотами слоев толщи [57]. Проблема усугубляется при приближении частот резонансных колебаний грунта к собственным частотам колебаний охраняемых объектов. Резонансные явления выявляются геофизическими методами [66, 218], в результате моделирования динамических свойств грунта [57]. Следует отметить, что исследование резонансных явлений грунтов проводится в районах, в которых вероятны природные землетрясения. В частности, согласно [62] усиление сейсмических колебаний пропорционально величине $H^{0,17}$, где H – мощность осадочной толщи, м.

Техногенные землетрясения разрушительной силы вероятны в результате сочетания накопленной энергии в сейсмических очагах и энергии взрывов, проводимых на карьерах [5]. Мощное сейсмическое воздействие в удароопасных рудниках возможно в условиях накопленной энергии в породном массиве и энергии массовых взрывов при подземной разработке месторождений [50, 61, 64].

В статье [61] дополнительная компонента сейсмических колебаний связывается с вовлечением в движение структурных блоков массива, находящихся за зоной дробления горных пород, отмечается, что усиление сейсмических волн происходит вблизи разломов и крупных трещин.

Блочно-иерархическое строение горного массива исследовалось на примере карьера строительных материалов путем анализа амплитудно-частотных характеристик СВВ от массовых взрывов [97]. Выявлено наличие маятниковых волн, установлено, что с ростом продолжительности динамического воздействия на массив происходит немонотонный сдвиг максимумов спектральной плотности скорости смещения в область высоких частот. Исследование перехода СВВ из скальных в осадочные породы [166] также свидетельствует о формировании маятниковых волн и усилении смещений в осадочных породах по горизонтальным компонентам колебаний. Наблюдения за смещениями берегов разрывных нарушений горных пород в карьере трубки «Удачная» [111] привели к выводу, что даже слабое сейсмическое воздействие является причиной смещений блоков горных пород, а при сильных сейсмических нагрузках смещения характеризуется мгновенной и релаксационной стадиями развития, что в последнем случае приводит к замедленному распространению деформаций типа «медленных волн».

Отметим, что установлены корреляции между частотой технико-тектонических событий и массой потребленного взрывчатого вещества на территории Кузбасса [5], между частотой землетрясений и объемом взорванной горной массой на разрезе «Нерюнгринский» [44], между количеством сейсмических событий до и после взрыва и энергией сейсмической активности на подземных апатитовых рудниках в Мурманской области [60].

Согласно 116-ФЗ [128] горнодобывающие предприятия, использующие взрывные работы для добычи полезных ископаемых открытым способом, относятся к опасным производственным объектам. Причем класс опасности таких объектов непосредственно связан с объемом разработки горной массы, следовательно, и с объемом производимых взрывных работ. В частности,

наивысший II класс опасности устанавливается опасному производственному объекту, если объем разработки превышает 1 миллион кубических метров горной массы в год. Выше было отмечено, что уровень техногенного воздействия на окружающую среду сильно коррелирует с количеством потребленного взрывчатого вещества на горнодобывающих предприятиях. Таким образом, угрозы аварий зданий и сооружений, находящихся в зоне динамического воздействия взрывных работ, наиболее вероятны для горнодобывающих предприятий, относящихся к опасным производственным объектам II класса опасности.

1.2 Современное состояние проблемы допустимого уровня динамического воздействия взрывных работ на охраняемые объекты

Если раньше при решении вопросов по обеспечению безопасного ведения взрывных работ основное внимание уделялось сохранности охраняемых объектов, то в настоящее время фокусируются на воздействие вибрации зданий и сооружений от СВВ и УВВ на производственный персонал и жителей поселений, примыкающих к земельному отводу горных предприятий (М.И. Ганопольский, В.А. Белин, В.И. Куликов и другие ученые и специалисты). В настоящее время не существует количественных методик, позволяющих прогнозировать уровень колебаний конкретных охраняемых объектов для проектируемых взрывных работ. Основная информация о таком уровне получается на основе инструментальных замеров в ходе производства опытно-промышленных взрывов или мониторинга. При этом колебательные характеристики охраняемых объектов используются в прогнозе динамического воздействия взрывных работ в ограниченном объеме.

Воздействие УВВ на наземные сооружения и основные параметры УВВ, характеризующие это воздействие такие, как избыточное давление на фронте УВВ, длительность положительной фазы УВВ, удельный импульс фазы сжатия УВВ хорошо изучены и описаны в работах [8, 31, 34, 75, 100 112, 130, 156, 165], установлены условия аномального усиления воздействия УВВ, связанные с явлениями фокусировки УВВ при инверсионной стратификации атмосферы [68].

Выработанные рекомендации и правила на этих и других исследованиях УВВ позволяют обеспечивать сохранность охраняемых объектов при ведении взрывных работ, но не позволяют прогнозировать ухудшение строительных конструкций при многократных динамических воздействиях, дискомфорт производственного персонала и жителей поселений, находящихся в зоне влияния горных работ. Наибольшее количество жалоб населения возникает при дроблении негабаритов наружными зарядами взрывчатого вещества, утилизации боеприпасов с истекшим сроком хранения взрывным способом [154].

Влияние техногенной сейсмичности, обусловленной ведением взрывных работ при открытом способе разработки месторождений полезных ископаемых, на население изучалось в работах [108, 140]. Основные выводы сводятся к следующему: прямое воздействие вибрации не представляет опасности для здоровья жителей в силу кратковременности взрывов и привыканием жителей к их периодичности; негативное восприятие техногенной сейсмичности населением соответствует 6-8 радиусам зоны, отвечающей 3-4 баллам по шкале МСК-64, разработанной С.В. Медведевым; в процессе длительного производства взрывных работ развиваются повреждения строительных конструкций в виде развития трещин, особенно там, где не производилось детальных инженерно-геологических изысканий грунта [108]. Особое внимание уделяется генерируемым СВВ инфразвуковым колебаниям, которые по частотному диапазону накладываются на резонансные колебания внутренних органов человека [108].

Следует констатировать, что наиболее неблагоприятное динамическое воздействие взрывных работ будет при одновременном сочетании резонанса грунта в основании охраняемого объекта, резонанса самого объекта и резонанса внутренних органов человека. Отсюда вытекает важность, на первый взгляд, мало значимой проблемы воздействия слабых СВВ и УВВ на окружающую инфраструктуру. Так, согласно [52] наложение резонансных характеристик грунтов и зданий может служить причиной усиления колебаний последних в 20 и более раз относительно обычных условий.

Сравнительный анализ уровня воздействия СВВ и УВВ от массовых взрывов на карьерах проведен в работах [36-38]. Анализ проводился для акустических волн (УВВ с избыточным пиковым давлением до 100 Па) и СВВ относительно колебаний многоэтажных зданий, удаленных от мест ведения взрывных работ до нескольких километров. Избыточное давление описывалось с помощью формулы (1.11):

$$\Delta P = k(R/\sqrt[3]{Q})^{-\alpha}, \quad (1.11)$$

где k и α – эмпирические коэффициенты.

В сферическом приближении фронта акустической волны с достаточной точностью можно положить $\alpha = 1$. Анализ эпюр колебаний зданий показал, что слабая УВВ приводит к раскачке строительной конструкции до 3-х раз больше, чем предшествующая ей СВВ. При этом колебательная скорость здания оказывается пропорциональной удельному импульсу фазы сжатия УВВ [37].

Дальнейшее развитие решения проблемы, рассматриваемой в настоящем параграфе, с учетом требований санитарных норм отражено в работах [24, 32, 33, 72, 106]. В статье [32] на основе систематизации предельных значений вибрационных скоростей по условиям категорий общей вибрации произведена оценка допустимых масс одновременно взрывааемых зарядов взрывчатого вещества по сейсмическому фактору для различных радиусов санитарно-защитных зон с использованием формулы М.А. Садовского для заданных $K = 250$ (для вибрационной скорости, выраженной в см/с) и $n = 1,5$. Отмечается, что такой подход к безопасному ведению взрывных работ может стать серьезным ограничением для их производительности, однако, он нашел свое развитие в работе [72] при исследовании сейсмического воздействия подземного взрыва на жилую инфраструктуру, расположенную на подрабатываемой территории (город Губкин). Помимо районирования территории по балльности согласно шкале С.В. Медведева выявлены условия негативного восприятия населением динамического воздействия взрывных работ в соответствии с санитарными нормами.

В статье [33] уточнены радиусы воздействия взрывного шума, источником которого являются слабые УВВ при ведении взрывных работ на земной поверхности, распространяющие практически со скоростью звука. Так, если в ранней работе [155] при расчете соответствующих радиусов в качестве предельного значения избыточного давления на фронте УВВ принималось 200 Па, то в статье [33] использовалось значение 90 Па согласно требованиям ГОСТ 23552-79 «Самолеты гражданской авиации. Допустимые уровни звукового удара на местности и методы его измерения». Следует отметить, что в настоящее время пока не существует стандартов, регламентирующих шумовое воздействие взрыва.

В работе [106] излагается методика оценки шумового воздействия взрывных работ на примере угледобывающих предприятий Кемеровской области, которая основывается на стандартизированных закономерностях распространения звука на местности. Соответствующая методика реализована в виде вычислительного программного продукта.

Отметим труды зарубежных ученых, посвященные изучению вибрационных явлений, обусловленных динамическим воздействием взрывных работ на охраняемые объекты [184, 206, 213, 217, 243]. В статьях [184, 217] избыточное давление на фронте УВВ при производстве взрывных работ на карьерах аппроксимировалось с помощью формулы (1.11), причем значение показателя степени α менялось от 1,77 [184] до 1 [217]. Во всех случаях избыточное давление было меньше 100 Па. Однако доминирующие частоты СВВ и УВВ находились в наиболее опасном диапазоне для человека 4-14 Гц: при частотах ниже 2 Гц тело реагирует всей массой; сидячий человек испытывает резонанс в интервале частот 4-6 Гц, а стоящий человек – при частотах вблизи 6 и 12 Гц [184]. В работе [213] приведены результаты сейсмического мониторинга по данным более чем полутысячи измерений при строительстве транспортного тоннеля в Словении буровзрывным способом относительно восприятия человеком уровня вибрации в соответствии с национальными стандартами. Наиболее высокий уровень

вибрации отмечался в весенние месяцы строительства, едва ощутимые и в средней степени ощутимые колебания наблюдались летом.

Наиболее адекватная оценка восприятия динамического воздействия взрывных работ человеком может быть произведена путем опроса населения с последующей статистической обработкой полученных ответов. В работе [206] отмечается, несмотря на то, что наибольший вес пиковой скорости колебаний для оценки допустимого воздействия СВВ на сооружения соответствует диапазону частот колебаний 2-20 Гц, для человека нет практической разницы между взвешенной и невзвешенной вибрационной (колебательной) скоростью. В абсолютных величинах замечена сильная реакция примерно 20% опрошенных на вибрационную скорость 2 см/с. Результаты исследований [243] показывают, что существует нелинейная зависимость между комфортом человека и амплитудой скорости колебаний. При этом индекс поглощенной энергии колебаний является лучшей характеристикой по сравнению с колебательной скоростью. Установлены различия в комфортности для различных групп людей. Результаты применения корреляционного анализа показали, что коэффициенты корреляции варьируются от 0,28 до 0,34 между комфортом и факторами: взрывной шум, шум окружающей среды, вибрация окружающей среды и текущая деятельность.

Следует отметить, что активные исследования по рассматриваемой проблематике проводились на кафедре взрывного дела Санкт-Петербургского горного университета [103]. Основной вывод, вытекающий из анализа полученных результатов, формулируется следующим образом: «Современные методики оценки действия сейсмозрывных и ударных воздушных волн не учитывают их совместного действия, что позволяет говорить о необходимости проведения комплекса исследований, направленных на пересмотр и разработку критериев оценки совместного действия СВВ и УВВ». Несмотря на то, что статья опубликована в 2004 г., проведенный литературный анализ еще раз подтверждает актуальность этого вывода.

1.3 Нормативная база в области обеспечения безопасности охраняемых объектов и комфортного нахождения в них по колебаниям

В 2008 г. в Российской Федерации был введен ГОСТ Р 52892-2007 [41] в области вибрационного воздействия на здания, в том числе и сейсмического воздействия при производстве взрывов. В соответствии с этим документом основными параметрами вибрации являются пиковое значение скорости колебаний и доминирующая частота колебаний. В качестве нормативного значения скорости, принимаемого для оценки уровня воздействия на охраняемый объект, берется величина (1.12):

$$v_{\Pi} = \max(v_{\Pi x}, v_{\Pi y}, v_{\Pi z}), \quad (1.12)$$

где $v_{\Pi x}$, $v_{\Pi y}$, $v_{\Pi z}$ – пиковые значения компонент вибрационной скорости в 3-х взаимно перпендикулярных направлениях ($v_{\Pi z}$ – вертикальная компонента).

В частности, в шведском стандарте [237] принимается в рассмотрение только вертикальная компонента скорости, что соответствует представлениям о соотношении между амплитудами горизонтальной и вертикальной компонент скорости смещения в поверхностной волне [84].

Следует сделать важное замечание. В отечественной практике для оценки сейсмического воздействия взрыва принимается значение максимальной векторной скорости, вычисляемое по формуле (1.13):

$$v_{\Sigma} = \sqrt{\max(v_{\Pi x}^2) + \max(v_{\Pi y}^2) + \max(v_{\Pi z}^2)}. \quad (1.13)$$

В зарубежной практике (частично и в отечественной практике) помимо параметра v_{Π} используется пиковое значение модуля вибрационной скорости, вычисляемое по формуле (1.14):

$$v_{\Pi M} = \max(\sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}), \quad (1.14)$$

где v_x , v_y , v_z – значения компонент скорости для одного момента времени.

Принципиальная разница между параметрами v_{Σ} и $v_{\Pi M}$ заключается в том, что компоненты скорости смещения достигают своих пиковых значений в

различные моменты времени. Поэтому параметр v_{Σ} еще называют псевдовекторной скоростью, а параметр $v_{\text{пм}}$ – истинной векторной скоростью [239]. Практическая простота использования параметра v_{Σ} легко объясняется возможностями аппаратуры, которая применялась вплоть до 80-х годов 20 века. Измерения проводились, в основном, с регистрацией сигнала на аналоговом осциллографе. Поэтому визуально достаточно просто определялись пиковые значения каждой компоненты скорости смещения, по которым вычислялось значение параметра v_{Σ} . Однако, из каждой велосигаммы бралось только одно значение, а остальные игнорировались, следовательно, для получения надежных оценок коэффициента сейсмичности и показателя затухания СВВ требовался большой массив экспериментальных данных.

Применение 3-х различных определений скорости смещения грунта для оценки сейсмического воздействия взрыва может вызвать путаницу. Практически значение v_{Σ} может превышать значение $v_{\text{пм}}$ до 40%, а значение $v_{\text{пм}}$ – значение $v_{\text{п}}$ до 10% [239], но обычно разница между значениями v_{Σ} и $v_{\text{пм}}$ составляет порядка 20-30% [47]. Однако с точки зрения обеспечения безопасности охраняемого объекта применение максимальной векторной скорости накладывает более жесткие требования к ведению взрывных работ по сейсмическому фактору и соответствует физическому принципу повреждаемости строительных конструкций относительно плотности потока энергии сейсмических колебаний.

За рубежом и в отечественной практике для определения основных параметров сейсмического воздействия взрыва широко используются сейсмографы серий MiniMate [215] и BlastMate [177] канадской фирмы InstanTel. Эти приборы надежны, просты в использовании и имеют интуитивно понятный программный интерфейс и соответствуют ГОСТ Р 52892-2007. Пример фрагмента отчета автоматически формируемого с помощью специализированной программы Blastware приведен на рисунке 1.2. В этом случае величина $v_{\text{п}}$ обозначается с использованием аббревиатуры PPV (Peak Particle Velocity), а величина $v_{\text{пм}}$ – с использованием аббревиатуры PVS (Peak Vector Sum).

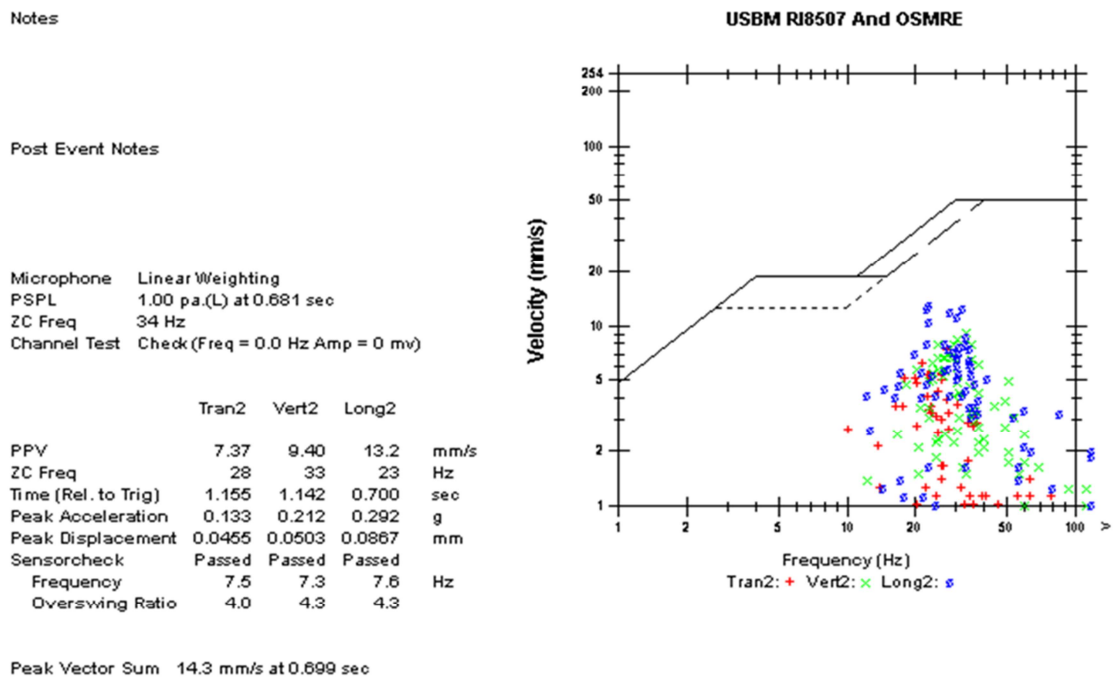


Рисунок 1.2 – Пример отчета измерений параметров СВВ с помощью BlastMate

Стандарт [41] регламентирует методику измерений вибрации, однако, предельные значения параметров вибрации для тех или иных охраняемых объектов носят рекомендательный или справочный характер. В отечественной практике для оценки допустимого сейсмического воздействия на охраняемые объекты используются федеральные нормы и правила [127], отраслевые правила [121], региональные документы [56]. Для дополнительного анализа сейсмического воздействия могут использоваться результаты более ранних исследований [105]. Следует отметить, что в отечественных нормативных документах частота преобладающих сейсмических колебаний не является решающим параметром для оценки предельного воздействия СВВ. Хотя, например, в работе В.А. Фокина [132] показано, что с ростом преобладающей частоты сейсмических колебаний увеличивается предельно допустимая скорость смещения грунта. Как правило, при анализе амплитудно-частотных характеристик сейсмических колебаний грунта обращают внимание на возможность резонансных явлений (п.1.2). Сравнительный обзор применения отечественных и зарубежных нормативных документов в области допустимого сейсмического воздействия взрывных работ на охраняемые объекты приведен в статьях [24, 26, 63, 183, 214].

Наиболее жесткие требования по сейсмическому фактору предъявляются в немецком стандарте [183, 212]. В таблице 1.2 сопоставлены предельно допустимые значения параметра $v_{\text{п}}$ согласно немецкому стандарту [182] и параметра $v_{\text{с}}$ из технических правил [121].

Таблица 1.2 - Допустимые значения скорости смещения $v_{\text{доп}}$ для зданий и сооружений различного назначения согласно DIN 4150-3 [182] и технических правил [121]

Описание	$v_{\text{доп}}$, см/с			
	Доминирующая частота колебаний, Гц			$v_{\text{доп}}$ горизонтальных колебаний верхних этажей для всех частот
	1-10	10-50	50-100	
Здания, используемые для коммерчески целей; промышленные здания и здания похожих конструкций	2 (3) ^{*)}	2-4 (3)	4-5 (3)	4
Жилые здания и здания с аналогичным проектом и / или использования	0,5 (1)	0,5-1,5 (1)	1,5-2,0 (1)	1,5
Здания и сооружения, которые из-за их определенной чувствительности к вибрации, не соответствуют перечисленным в п. 1 и 2, а так же имеющие особую ценность	0,3	0,3-0,8	0,8-1,0	0,8

Примечание ^{*)} – в круглых скобках представлены значения из технических правил [121] для многократно повторяющихся взрывов.

Согласно техническим правилам [121] допустимые значения скорости смещения грунта для одних и тех же объектов нормируются для однократно и многократно повторяющихся взрывов. Для однократных взрывов значение параметра $v_{\text{доп}}$ увеличивается до 3-х раз. В зависимости от технического состояния строительных конструкций (разного рода дефектов) параметр $v_{\text{доп}}$ уменьшается в 5-10 раз. В отличие от немецкого стандарта в отечественном документе не учитываются доминирующая частота сейсмических колебаний и горизонтальная раскачка верхней части охраняемого объекта. Отметим, что при

использовании технических правил [121] создаются предпосылки «вольной» трактовки определения предельно допустимой скорости смещения грунта.

Неоднозначность параметра предельной скорости смещения в основании охраняемого объекта, прежде всего, обусловлена его статистической природой. Эта неоднозначность может быть уменьшена путем применения современных методов общей диагностики строительных конструкций [51], вибрационной диагностики скрытых дефектов зданий и сооружений путем анализа их колебательного спектра [69], диагностики «in situ» по смещению берегов трещин в несущих элементах строительных конструкций при динамическом воздействии взрывных работ [80]. Отметим, что перечисленные методы диагностики носят ограниченный характер.

В литературе по сейсмической безопасности взрывов ведется дискуссия относительно допустимых значений предельной скорости смещения грунта и самого параметра. Так, в статье [86] для одного и того же объекта допустимая скорость смещения грунта может быть больше до полутора раз в ближней зоне сейсмического воздействия взрыва, чем в дальней зоне. С одной стороны, это связано с преобладанием объемных СВВ и их большим затуханием в ближней зоне, с другой стороны – с более высокими частотами сейсмических колебаний по сравнению с дальней зоной, что соответствует стандартам [41, 182].

Среди кинематических параметров: смещение, скорость смещения, ускорение смещения статистически наиболее значимым параметром является максимальная векторная скорость, которую целесообразно принимать в качестве критерия повреждаемости зданий по сейсмическому фактору [96]. Так, в работе [246] в дополнение к отмеченному критерию проведено изучение применимости энергетического критерия сейсмической безопасности. Предпосылки возможных повреждений зданий и сооружений рассматривались с позиций следующих факторов: первичного прохождения сейсмической волны и кумуляции пластических деформаций. В последнем случае важную роль играет явление гистерезиса при циклическом нагружении сооружения. Поэтому повреждения зданий могут происходить при допустимых скоростях смещения в результате

кумуляции пластических деформаций. Развитие дефектов в виде трещин в стыках оконных проемов (концентраторов механических напряжений) при многократных динамических нагрузках было изучено в статье [85].

В работе [62] отмечается, что при расположении охраняемых объектов на мощных осадочных грунтах по мере удаления от мест ведения взрывных работ помимо скорости смещения необходимо учитывать и сами смещения грунта, что связано с увеличением «кажущихся» периодов колебаний СВВ. В случае протяженных охраняемых объектов существуют предельно допустимые относительные деформации, которые не превышают значения $5 \cdot 10^{-4}$ [120]. При этом относительные деформации пропорциональны скорости смещения грунта [18]. Если в качестве характеристик динамического воздействия взрыва принять пиковые значения механических напряжений, возникающих в элементах строительных конструкций (балки, плиты), то эти напряжения также оказываются пропорциональными скорости смещения грунта [41].

Согласно справочному приложению «Требования к мониторингу общей безопасности объектов» ГОСТа 31937-2011 [42] выражение для определения значения риска «нанесения зданию (сооружению) ущерба определенного уровня при опасном воздействии данной интенсивности за срок службы объекта» имеет вид (1.15):

$$P = P(H) \cdot P(A/H) \cdot P(T/H) \cdot P(D/H) \cdot C, \quad (1.15)$$

где $P(H)$ - вероятность возникновения опасности;

$P(A/H)$ и $P(T/H)$ - вероятности встречи опасности с рассматриваемым объектом в пространстве и времени соответственно;

$P(D/H)$ – вероятность нанесения ущерба данного уровня;

C - отношение стоимости ущерба к стоимости объекта.

Дадим грубую оценку величине P . Согласно [127] примем $P(D/H) = 0,1$ в смысле возникновения легких повреждений объекта. Не будет большой ошибкой считать, что $P(T/H) = 1$, $P(D/H) = 1$ и $P(H) = 1$ в условиях того, что охраняемые объекты испытывают динамическое воздействие многократно повторяющихся в пространстве и времени взрывных работ. Тогда из ГОСТа

31937-2011 [42] следует, чтобы значение риска P не превысило недопустимого значения, равного $5 \cdot 10^{-5}$, значение параметра C должно быть меньше $5 \cdot 10^{-4}$ за срок службы охраняемого объекта (например, 50 лет). Очевидно, что отношение затрат даже на текущий косметический ремонт охраняемого объекта к его стоимости превысит $5 \cdot 10^{-4}$ за срок службы охраняемого объекта и это при условии отсутствия возможности возникновения дополнительных опасностей при ведении взрывных работ, упомянутых выше. Поэтому снижение уровня риска возникновения аварийной ситуации на охраняемом объекте в рассматриваемом примере требует неотложных мероприятий по управлению динамическим воздействием взрывных работ на охраняемые объекты.

Предельно допустимые вибрации для персонала организаций и жителей поселений от взрывных работ (характеризуемых как общие и прерывистые вибрации) согласно действующим нормативным документам [82, 113] в большинстве случаев характеризуются предельной колебательной скоростью охраняемого объекта, которая не должна превышать 1 см/с в инфразвуковой области частот спектра независимо от значений скорости смещения грунта в основании сооружений.

В зарубежной практике ведения взрывных работ вибрация оценивается по ее ощущению человеком. В таблице 1.3 сопоставлены реакции человека по значениям вибрационной скорости согласно стандартам: британскому (BS 5228-2) [178] и USBM [206].

Как следует из таблицы 1.3, по комфортному пребыванию жителей поселений, примыкающих к зонам ведения взрывных работ, скорость колебаний в помещениях не должна превышать 0,2-0,3 см/с, что накладывает более жесткие ограничения по скорости смещения грунта вблизи фундамента жилого дома и тем более по избыточному пиковому давлению на фронте УВВ. В частности, при избыточном пиковом давлении 50 Па возможны жалобы населения, а давление свыше 130 Па считается недопустимым [206].

Таким образом, динамическое воздействие взрывных работ на здания и сооружения является источником опасностей не только для самых объектов, но и

ухудшает условия труда работников горнодобывающих предприятий, а также комфортность пребывания жителей близлежащих поселений.

Таблица 1.3 - Реакция человека относительно уровня вибрационной скорости

USBM [206]		BS 5228-2 [178]	
Ощущения	Вибрационная скорость, см/с		Ощущения
Не ощущаются	0,0025...0,0076	< 0,014	Вибрации могут быть просто заметны в самых чувствительных ситуациях для большинства частот вибрации
Едва ощущаются	0,0076...0,0254		
Отчетливо ощущаются	0,0254...0,0762	< 0,03	Вибрации ощутимы в жилых помещениях
Весьма отчетливо ощущаются	0,0762...0,254	< 0,1	Вполне вероятно, что вибрации в жилых помещениях вызовут жалобу жителей без разъяснений и предварительных предупреждений
Вызывают чувство беспокойства	0,254...0,762	< 1,0	Вибрации, вероятно, будут невыносимой
Очень беспокоят	0,762...2,54		

1.4 Современные подходы к повышению точности прогноза динамического воздействия взрывных работ

Бурное развитие вычислительных методов в последние 10-15 лет не обошли стороной и горную науку, в частности, в области разработки методов прогнозирования скорости смещения грунта [168, 170, 171, 181, 198, 200, 207, 211, 212, 216, 231, 234, 235, 244], избыточного давления на фронте УВВ [193, 194, 220], основанных на искусственных нейронных сетях. Общие вопросы, связанные с архитектурой, типами искусственных нейронных сетей, их применением изложены, например, в монографии [99]. Вопросы, касающиеся реализации алгоритмов конкретных искусственных нейронных сетей в виде программного кода с использованием расширений MatLab, рассмотрены в учебно-справочном

издании [83]. Обзор применения разных модификаций искусственных нейронных сетей в прогнозировании скорости смещения грунта приведен в статье [228].

Рассмотрим кратко метод искусственных нейронных сетей согласно [99, 168]. В основе искусственной нейронной сети лежит нелинейное преобразование взвешенной суммы входных данных. В качестве передаточной функции используются сигмоидальная функция или функции гиперболического синуса или тангенса. Существует широкий выбор сетевых архитектур. Для прогнозирования параметров СВВ и УВВ обычно используется слоевая сетевая архитектура, состоящая из слоев входных и выходных нейронов и одного или несколько скрытых слоев. Наиболее универсальный алгоритм обучения реализован в многослойной сети обратного распространения, основанный на методе градиентного спуска. Однако, этот метод весьма чувствителен к локальным минимумам. Модификация алгоритма, предложенная Левенбергом-Марквардтом, устраняет этот недостаток. Отсутствует единый способ выбора необходимого количества нейронов в скрытых слоях. Кроме того, с увеличением количества нейронов резко усложняется искусственная нейронная сеть. Практически искусственная нейронная сеть строится путем тренировки на основе наборов известных входных и выходных данных и установления весов внутренних слоев. Для этого обычно используется массив из нескольких десятков и даже сотен групп данных, из которых примерно 60-70% групп задействуется на тренировку искусственной нейронной сети, а остальные группы – для ее верификации. Оптимальность построенной искусственной нейронной сети устанавливается с помощью коэффициента корреляции (детерминированности), средней квадратичной ошибки и средней абсолютной ошибки. Качество готовой искусственной нейронной сети иллюстрируется с помощью графика линейной регрессии между предсказанными и измеренными значениями скорости смещения (избыточного давления) для одного и того же набора данных. Результативность прогноза искусственной нейронной сети зависит от тщательности подготовки входных параметров, в частности, от их масштабирования.

Коротко рассмотрим практические результаты применения искусственных нейронных сетей в прогнозе скорости смещения. В работе [235] сопоставлены возможности линейной регрессии и искусственной нейронной сети с обратным распространением. Для ускорения сходимости и повышения точности прогноза использовалась предварительная подготовка тестовых данных на основе линейной регрессии относительно $R/\sqrt[3]{Q}$. Точность предсказания с использованием искусственной нейронной сети оказалась примерно в 4 раза выше, чем с использованием линейной регрессии. В статье [207] в качестве входных данных для искусственной нейронной сети обратного распространения использовались: эпицентральное расстояние, полная масса взрывчатого вещества на взрыв, максимальная масса взрывчатого вещества на ступень замедления, длина колонки заряда взрывчатого вещества. Установлено, что прогноз в наибольшей степени чувствителен к эпицентральному расстоянию. В статье [244] с помощью искусственной нейронной сети с 8-ю входными параметрами исследовалось влияние преобладающей частоты сейсмических колебаний на точность предсказания скорости смещения. Для исключения влияния похожих групп параметров на тренировку искусственной нейронной сети ее топология выбиралась с использованием теории грубых множеств. В статье [234] использовалась искусственная нейронная сеть с 10-ю входными параметрами, среди которых были физико-механические параметры горных пород: модуль Юнга, коэффициент Пуассона, плотность, скорость распространения продольных СВВ.

Рассмотрим применение искусственных нейронных сетей для прогнозирования избыточного давления на фронте УВВ. В статье [194] подтверждена эффективность искусственной нейронной сети на основе генетического алгоритма для условий гранитного карьера с входными параметрами: масса одновременно взрываемого заряда взрывчатого вещества, расстояние от взрыва до точки наблюдения. Тот же результат следует и для искусственной нейронной сети, оптимизированной с помощью империалистского конкурентного алгоритма как социального аналога генетических алгоритмов

[193]. Для условий угольного разреза искусственная нейронная сеть использовалась в статье [220].

В целом, при прогнозировании динамического воздействия взрывных работ с применением искусственных нейронных сетей достигается высокая точность с коэффициентом детерминированности, как правило, не меньше 0,95, что существенно превышает точность традиционных методов (с помощью формул М.А. Садовского, USBM и др.). Однако искусственная нейронная сеть представляет собой «черный ящик», т.е. результат не может быть выражен в виде аналитических выражений, что не допускает простую проверку результатов прогноза практикующими инженерами – горняками в случае сомнительных ситуаций. Выбор архитектуры искусственной нейронной сети, методов ее оптимизации происходит по принципу «давайте попробуем». Как отмечено в статье [200]: «искусственные нейронные сети являются хорошим инструментом, когда не известны, в достаточной мере, теоретические основы исследуемого явления». Поэтому любые неконтролируемые отклонения в технологии буровзрывных работ могут создать предпосылки возникновения ошибочного прогноза.

Отметим другие современные методы прогнозирования сейсмического воздействия взрывных работ: метод классификационного и регрессионного дерева [199]; метод, основанный на разновидностях алгоритма роевого интеллекта (поведении кукушки как гнездового паразита) [185]; метод оптимизации формулы М.А. Садовского с помощью квантово-генетического алгоритма [229]; метод, реализованный с помощью алгоритма «имитация отжига» [236]; метод размерного анализа [181]. За исключением метода [199] в остальных случаях получают аналитические выражения для скорости смещения. Однако точность прогноза с помощью перечисленных методов меньше, чем при применении искусственных нейронных сетей.

Численные методы прогнозирования сейсмического воздействия взрывных работ как результат фундаментального подхода в геодинамике тоже получили свое развитие. В ближней зоне сейсмического воздействия взрыва эта задача

уверенно решается путем векторного сложения вкладов от элементарных участков цилиндрического заряда в компоненты скорости смещения грунта с помощью MatLab [172]. С использованием метода конечных разностей разработана и реализована на языке JavaScript математическая модель воздействия СВВ на подземную горную выработку [40]. В моделировании сейсмического воздействия при открытом и подземном способах ведения буровзрывных работ широко используются специализированные программные продукты: AUTODYN [195], FLAC3D [210] и др. Особенностью применения численных методов является необходимость знания физико-механических параметров горных пород, аналитических выражений, описывающих процессы образования СВВ, а при сопоставлении результатов численного моделирования с результатами экспериментов и решение трудоемких обратных задач.

В настоящее время существуют сравнительные обзоры традиционных и современных подходов в области прогнозирования сейсмического воздействия взрыва, объясняющие преимущества последних, например [241]. Несмотря на это, даже в последних исследованиях сейсмического воздействия подземного взрыва на наземные сооружения подтверждается высокая эффективность формулы М.А. Садовского [189].

В процессе разработки современных методов прогнозирования в научной литературе широко представлена информация о параметрах сейсмического воздействия взрыва для разнообразных условий ведения взрывных работ, что дает надежную основу для построения классификаций взрывных работ по сейсмическому воздействию с использованием формулы М.А. Садовского.

В сводной таблице 1.4 представлены параметры линейных регрессий, аппроксимирующих сейсмическое воздействие взрывов, производимых при разработке рудных и нерудных месторождений, месторождений твердого минерального топлива как подземным, так и открытым способами, при строительстве дамб, транспортных тоннелей, котлованов. География ведения взрывных работ охвачена территориями таких стран как Российская Федерация, Украина, Сербия, Хорватия, Италия, Египет, Тунис, Турция, Иран, Киргизия,

Южная Корея, Китай, Индия, Малайзия. Кроме того, представлены данные о мощных химических и ядерных подземных взрывах.

Таблица 1.4 - Сводка по параметрам линейных регрессий относительно скорости смещения СВВ для приведенного расстояния $R/\sqrt[3]{Q}$, м/кг^{1/3}

<i>K</i>	<i>n</i>	<i>r</i> ²	Объем выборки	Источник
1	2	3	4	5
42,46	1,4264	0,8532	30	[170]
126,8	1,8596	0,8373	8 из 32	[219]
729,6	2,2852	0,5381	19	[240]
20,29	1,0215	0,5891	31	[224]
190,2	1,5398	0,3167	18 из 32	[233]
933,5	1,8487	0,9372	12 из 22	[184]
181,7	1,2195	0,922	57 из 60	[217]
58,16	0,9385	0,2893	20	[234]
103,6	0,9683	0,5245	15 из 20. Диаметр скважин 250-311 мм	[234]
119	1,7455	0,1846	36	[244]
1622	2,5578	0,5987	18 из 36 (сейсмический экран 6-50%)	[244]
933	1,7184	0,8059	10	[169]
219	1,842	0,743	>60	[209]
190	1,5623	0,8707	10 из >60 перепад высот до половины горизонтального расстояния	[209]
13,06	1,1327	0,5974	37	[212]
17,6244	0,8388	0,8398	20	[246]
127	1,5	-	-	[111]
217	1,54	0,752	50	[94]
10	1	-	> 30	[157]
70	1,5	-	-	[39]
569	1,8	0,56	> 30	[91]
80	1,3	0,56	> 30	[91]
2153	2,2033	0,52	19	[78]

Продолжение таблицы 1.4

1	2	3	4	5
183,77	1,6196	0,8474	> 30	[89]
59,51	1,3718	0,9366	10	[134]
37,42	1,1377	0,889	9	[134]
74,06	1,2737	0,9165	6	[134]
200	1,6	-	-	[74]
45	0,91	-	> 60	[16]
2700	2,01	-	17	[16]
127	1,59	-	-	[131]
176	1,33	0,56	14 взрывов	[53]
392	1,97	0,71	> 10	[160]
813	1,77	-	22	[25]
770	1,71	-	18	[3]
400	1,53	-	> 30	[3]
72	1,24	-	> 20	[3]
386	1,35	-	> 10	[3]
185	1,5	0,782	126	[93]
1280	1,95	-	> 40	[93]
$3,43 \cdot 10^4$	3,87	0,7	12, $R < 50$ м	[173]
1590	2,65	0,75	17, $R > 50$ м	[173]
270	1,92	-	-	[88]
200	1,75	-	-	[88]
650	2,0	-	-	[88]
750	2,0	-	-	[88]
256	1,8	-	-	[88]
200	1,52	-	-	[88]
330	1,85	-	-	[88]
115	1,5	-	-	[88]
230	1,2	-	-	[88]
265	1,57	-	-	[88]
310	1,5	-	-	[88]

Продолжение таблицы 1.4

1	2	3	4	5
115	1,6	-	-	[88]
106	1,5	-	-	[88]
286	2,0	-	-	[214]
22	0,94	0,73	134	[235]
120	1,2	-	-	[10]
181	1,58	0,92	-	[168]
6,83	0,71	0,896	85	[185]
61,7	1,4	0,56	> 30	[174]
110	1,6	0,828	33	[187]
1323	1,9	0,483	34	[216]
32,9	0,97	0,2	154	[200]
134,4	1,509	0,67	95	[230]
214	1,647	0,85	43	[230]
98,4	1,337	0,74	95	[230]
81,2	1,29	0,43	69	[231]
319,4	2,086	0,75	78	[192]
127	1,691	0,779	12	[216]
2034	3,08	0,81	48	[236]
40	1,079	0,56	120	[198]
59,6	1,19	0,56	116	[181]
288	1,734	0,69	9	[226]
37,4	1,209	0,828	10	[176]
282	1,58	0,72	582	[223]
412	1,894	0,86	-	[191]
519	1,843	0,95	-	[191]
601	2,256	0,89	-	[191]
343	1,602	0,68	> 500	[180]
302	1,69	0,74		[180]
133	1,552	0,72		[180]
91,5	1,33	0,96	-	[221]

Продолжение таблицы 1.4

1	2	3	4	5
201	1,4	0,79	-	[221]
732	1,925	>0,9	> 50	[6, 158]
195	1,55	-	12	[100]
250	1,7	-	-	[161]
140	2,25	-	-	[161]
450	1,8	-	-	[161]
$1,29 \cdot 10^6$	1,75	-	-	[6]
$1,43 \cdot 10^6$	1,65	-	-	[6]
158	1,464	0,842	7	[58]
$3,6 \cdot 10^4$	2,87	0,67	> 20	[160]
$3,26 \cdot 10^4$	2,7	-	6	[25]
652	2,0	0,95	18	[11]
827	2,0	-	-	[12]
670	2,8	-	-	[142]

Примечание. Значения коэффициента сейсмичности приведены для скоростей смещения, выраженных в см/с.

Параметры линейных аппроксимаций, в основном, соответствуют дальней зоне сейсмического воздействия взрыва, однако, не претерпевают существенных изменений при переходе из ближней зоны в дальнюю зону. В ряде случаев эти параметры получены путем статистической обработки численных значений по массам одновременно взрывааемых зарядов взрывчатого вещества, расстояниям и скоростям смещения, приведенных в оригинальных статьях. По времени охвата экспериментальные данные соответствуют периоду от 70-х годов прошлого века и практически до настоящего момента. Следует отметить, что за этот период времени технология ведения буровзрывных работ претерпела ряд изменений, в частности, это касается взрывчатых материалов, средств инициирования, методов проектирования и др.

Особенность данных, представленных в таблице 1.4, заключается еще и в том, что они получены разными учеными и специалистами в условиях отсутствия единой нормативной базы. Поэтому параметры линейных регрессий соответствуют как максимальной векторной скорости, так и пиковому значению модуля скорости смещения (PVS). Принимая во внимание, что в линейные регрессии входит логарифм скорости и небольшую разницу между отмеченными скоростями, следует полагать с учетом случайных погрешностей практическую тождественность параметров линейных регрессий. Несмотря на то, что в большинстве случаев имеется подробное описание условий получения сейсмических данных, решение об исключении некоторых данных из статистических совокупностей должно приниматься с учетом значений коэффициента регрессии (детерминации r^2). Подробное обсуждение совокупностей по коэффициенту сейсмичности и показателю затухания проводится в третьей главе.

1.5 Выводы по Главе 1

1. Проведен анализ современного состояния вопроса в области безопасности взрывных работ по воздействию СВВ и УВВ на охраняемые объекты. В настоящее время отсутствует единая нормативная база относительно параметров предельно допустимого воздействия на охраняемые объекты. В последнее время свое развитие получила проблема не только обеспечения сохранности зданий и сооружений, но и условий комфортного пребывания людей в них, в частности, обеспечения нормальных условий труда работников горнодобывающих предприятий, что ужесточает требования к снижению динамического воздействия взрывных работ.

2. Несмотря на бурное развитие прогностических методов оценки динамического воздействия взрывных работ на охраняемые объекты формулы М.А. Садовского и USBM сохраняют свою актуальность благодаря простоте и малому количеству параметров, подлежащих определению. Качественный анализ

литературных данных по коэффициенту сейсмичности и показателю затухания СВВ указывает на наличие функциональной связи между этими параметрами, что создает предпосылки улучшения сейсмического прогноза с использованием указанных формул и создания классификации взрывов по уровню их сейсмического воздействия.

3. Наличие резонансных свойств грунтов в основании охраняемых объектов является основной причиной многократного усиления их колебаний. Дифференциация колебаний, связанных с непосредственным воздействием взрывного источника, и резонансных колебаний грунта возможна с использованием феноменологической модели, в основе которой лежит формула М.А. Садовского и преобразование, описывающее отклик породного массива на динамическое воздействие.

4. Совмещение резонансных свойств грунтов, охраняемых объектов, размещенных на них, а также резонансов внутренних органов людей, находящихся в охраняемых объектах, создает предпосылки нанесению ущерба объектам и выраженного дискомфорта людям даже при минимальном динамическом воздействии взрывных работ, особенно при воздействии УВВ. Поскольку такие воздействия характеризуются серией импульсов, то становится весьма актуальной задача минимизация этих воздействий с учетом собственных колебаний охраняемых объектов.

5. Исследование совместного воздействия СВВ и УВВ на наземные объекты является мало исследованной проблемой и в тоже время весьма актуальной задачей с точки зрения выявления механизмов, вызывающих сильную горизонтальную раскачку высотных зданий и сооружений, приводящую, в частности, к ухудшению условий труда работников горнодобывающих предприятий.

ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОВМЕСТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА СЕЙСМИЧНОСТИ И ПОКАЗАТЕЛЯ ЗАТУХАНИЯ СЕЙСМОВЗРЫВНЫХ ВОЛН ДЛЯ ПРОГНОЗА СКОРОСТИ СМЕЩЕНИЯ ГРУНТА

В настоящей главе приводится научное обоснование принципа обеспечения безопасности на предприятиях горнодобывающей промышленности по фактору сейсмического воздействия взрывных работ на охраняемые объекты за счет повышения надежности прогнозных оценок скорости смещения грунта в основании охраняемых объектов на основе классификационного критерия уровня сейсмического воздействия взрыва.

2.1 Основные положения теоретической модели совместного определения коэффициента сейсмичности и показателя затухания

На примере массового взрыва покажем, как, имея один пункт регистрации велосиграмм, появляется возможность совместного определения коэффициента сейсмичности и показателя затухания [149].

Будем рассматривать массовый взрыв как последовательность частично взаимодействующих относительно СВВ i -х мгновенных взрывов, характеризующихся массами заряда взрывчатого вещества Q_i и средними расстояниями до пункта регистрации сейсмозрывных колебаний R_i . В частности, для i -й ступени замедления: Q_i – сумма масс скважинных зарядов взрывчатого вещества; R_i – среднее арифметическое значение расстояний от скважинных зарядов взрывчатого вещества до пункта регистрации. Тогда для значения модуля вектора скорости смещения существует дискретная экспериментальная функция вида (2.1):

$$v_m(t_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^3 v_j^2 \left(\frac{R_i(t_i)}{\sqrt[3]{Q_i(t_i)}} \right)}, \quad (2.1)$$

где v_j – компоненты скорости смещения;

t_i – время срабатывания i -й ступени замедления, отсчитываемое от момента взрыва заряда взрывчатого вещества в ступени нулевого замедления.

Аппроксимацию функции (2.1) представим в виде (2.2):

$$v_{\text{ма}}(t_i) = K_a \left(\frac{R_i(t_i)}{\sqrt[3]{Q_i(t_i)}} \right)^{-n_a}, \quad (2.2)$$

где K_a и n_a – параметры аппроксимации, являющиеся соответствующими оценками K и n .

В то же время, регистрируемое значение модуля вектора скорости смещения посредством аналогово-цифрового преобразования сигнала сейсмических датчиков компонент скорости смещения, представляет собой функцию вида (2.3):

$$v_{\text{м}}(t_k) = \sqrt{\sum_{j=1}^3 v_j^2(t_k)}, \quad (2.3)$$

где t_k – текущий момент (квант времени) дискретизации (выборки) измерительного сигнала.

Обычно при сейсмических измерениях дискретизация сигнала производится через 0,5-2 мс, а время замедления взрывания в карьерных массовых взрывах может достигать до 100 мс. Поэтому, чтобы сравнить величины $v_{\text{м}}(t_i)$ и $v_{\text{м}}(t_k)$, а так же и $v_{\text{ма}}(t_i)$ необходимо применить к ним одно и то же временное преобразование. После временного преобразования индексы i и k переменной времени t становятся тождественными.

Подходящим временным преобразованием будет операция низкочастотной цифровой фильтрации. После такого преобразования будут получены сглаженные зависимости модуля скорости смещения от времени или огибающие функций (2.1)-(2.3). Особенностью фильтрации сигнала является то, что в каждый момент времени в преобразуемом сигнале учитывается вся предыстория состояний исходного сигнала. Это позволяет учесть частичное взаимодействие относительно СВВ в серии мгновенных взрывов. Процедура фильтрации сигналов с помощью цифровых фильтров является стандартной. Подробное описание теории цифровых фильтров и их применение можно найти, например, в [35].

Частота среза f_{cp} должна быть меньше обратной величины интервала времени замедления взрывания и выбирается путем компромисса между степенью «гладкости» огибающей модуля скорости смещения и сохранением в огибающей «информации о величине $R_i/\sqrt[3]{Q_i}$ ». Ниже будет показано, что параметры K_a и n_a слабо чувствительны к значению f_{cp} .

Тогда задача сводится к нахождению параметров K_a и n_a путем решения нелинейной задачи методом наименьших квадратов, т.е. минимизации функции вида (2.4):

$$F(K_a, n_a) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[K_a \left(\frac{R_i(t_i)}{\sqrt[3]{Q_i(t_i)}} \right)^{-n_a} - u_{ма}(t_i) \right]^2}, \quad (2.4)$$

где N – количество ступеней замедления.

В качестве оценки параметра K_a используем выражение [19] вида (2.5):

$$K_a = A \cdot \sqrt[3]{\frac{C_p}{\rho} \left(1 - \frac{4}{3} \frac{C_s^2}{C_p^2} \right)^2}, \quad (2.5)$$

где C_p – скорость распространения продольных сейсмических волн, м/с;

C_s – скорость распространения поперечных сейсмических волн, м/с;

ρ – плотность грунта, кг/м³;

A – масштабный коэффициент.

Если модуль скорости смещения u_m измерять в см/с, массу заряда взрывчатого вещества Q – в кг, а расстояние R в м, то масштабный коэффициент $A = 1000$.

2.2 Апробация теоретической модели по результатам сейсмического воздействия массового взрыва на железнодорожный тоннель в районе карьера «Коршуновский» ПАО «Коршуновский ГОК» и следствия из нее

Предлагаемая выше модель совместного определения коэффициента сейсмичности и показателя затухания была апробирована при исследовании

сейсмического воздействия на железнодорожный тоннель крупномасштабным взрывом, произведенным на карьере Коршуновского ГОКа 20.05.2005 г.

2.2.1 Характеристика охраняемого объекта и параметры буровзрывных работ

Охраняемый объект – железнодорожный тоннель, расположенный на участке между станциями Коршуниха – Вихорека Восточно-сибирской железной дороги, находится в зоне влияния горных работ, производимых на железорудном карьере «Коршуновский». Исследования сейсмического воздействия взрывных работ на тоннель были продиктованы тем, что фронт горных работ в перспективе будет проходить над осью действующего тоннеля. Наибольшая мощность горных пород, залегающих над тоннелем по кровле, колеблется около 120 м. Протяженность тоннеля составляет 950 м. По почве высотная отметка залегания тоннеля меняется от 372 м до 364 м от восточного до западного порталов.

По данным инженерно-геологических изысканий, выполненных ЗАО «Востсибтранспроект» в 2003г. в связи с предстоящим проведением работ по реконструкции тоннеля, вмещающие горные породы представлены суглинками щебенистыми вблизи порталных сооружений, далее по мере продвижения к середине тоннеля – доломитами алевритистыми слабой и средней крепости и очень низкой прочности, доломитами алевритовыми крепкими и средней низкой прочности и доломитами алевритистыми слабой и средней крепости очень низкой прочности. Категория крепости по СНиП IV-2-82: III-VII. Коэффициент крепости горных пород по М.М. Протодяконову составляет $f=1-4$. Коэффициент фильтрации горных пород лежит в интервале 0,1-100 м/сут, объемная масса пород – 1,95-2,5 г/см³ при истинной плотности 2,7 г/см³, скорость продольных волн для наиболее крепких и прочных горных пород, залегающих над тоннелем – 2600-4600 м/с, и для поперечных волн – 1750-2570 м/с.

Параметры буровзрывных работ. Согласно проекту массового взрыва работы проводились на вскрышном уступе (высота 195-180 м). Взрываемые породы объемом 143,5 тыс. м³ представлены, в основном, слоями аргиллитов и

алевролитов крепостью $f = 4-6$. Диаметр скважинных зарядов взрывчатых веществ составлял 250 мм с линейной плотностью 47 кг/м, глубина скважин составляла, в основном, 15-18 м, в том числе перебур 2,5-3 м. Часть скважин была обводнена, в большинстве случаев высота столба воды не превышала 3 м, в редких случаях скважины были обводнены практически на всю глубину. Скважинный заряд взрывчатого вещества состоял из промежуточного детонатора (две шашки ТПП-600, инициируемых с помощью волноводов СИНВ-С); основного штатного рассыпного взрывчатого вещества.

Сетка скважин составляла $8 \times 9 \text{ м}^2$, линия сопротивления по подошве уступа для скважин первого ряда – 2-15 м. Поверхностная сеть монтажа: детонирующий шнур с замедлителями РПД-100 (рисунок 2.1). Всего было взорвано 238 скважинных зарядов взрывчатого вещества общей массой 95,4 тонны. Средний удельный расход взрывчатого вещества составил $0,665 \text{ кг/м}^3$. Заряды взрывчатого вещества распределялись на 50 ступеней замедления. Максимальная масса заряда взрывчатого вещества в ступени замедления доходила до 3540 кг.

2.2.2 Результаты воздействия массового взрыва на тоннель

Исследование параметров СВВ проводилось в 3-х пунктах регистрации (рисунок 2.2): представителями Горного университета (пункты Р1 и Р2) и представителем ОАО «Ленметрогипротранс» (пункт Р3). Велосиграммы регистрировались сейсмическими датчиками СВ-30 [117], сигнал с которых записывался с помощью цифрового осциллографа TDS3034B [238] (пункт Р2) и аналогово-цифрового преобразователя (далее - АЦП) Е-330 (пункт Р1) с частотой дискретизации 1 кГц. Жесткость контакта сейсмических датчиков обеспечивалась посредством строительного гипса. На рисунке 2.3 показан измерительный комплекс в пункте Р2 (западный портал строящегося тоннеля). Пункты Р1 и Р3 находились в непосредственной близости от западного и восточного порталов действующего тоннеля соответственно. На рисунке 2.4 приведены примеры велосиграмм компонент скорости смещения, полученных в пункте Р2.

В таблицу 2.1 сведены результаты воздействия СВВ массового взрыва на железнодорожный тоннель.

Согласно результатам, приведенным в таблице 2.1, невозможно получить корректные результаты регрессионного анализа. Поэтому, оценка коэффициента сейсмичности K проводилась при фиксированном показателе затухания $n = 1,5$, а оценка показателя затухания n – при фиксированном коэффициенте сейсмичности $K = 530$, вычисленном по формуле (2.5) для скоростей $C_p = 2600$ м/с, $C_s = 1750$ м/с и плотности $\rho = 2700$ кг/м³, характерных для доломитов алевролитистых слабой и средней крепости.

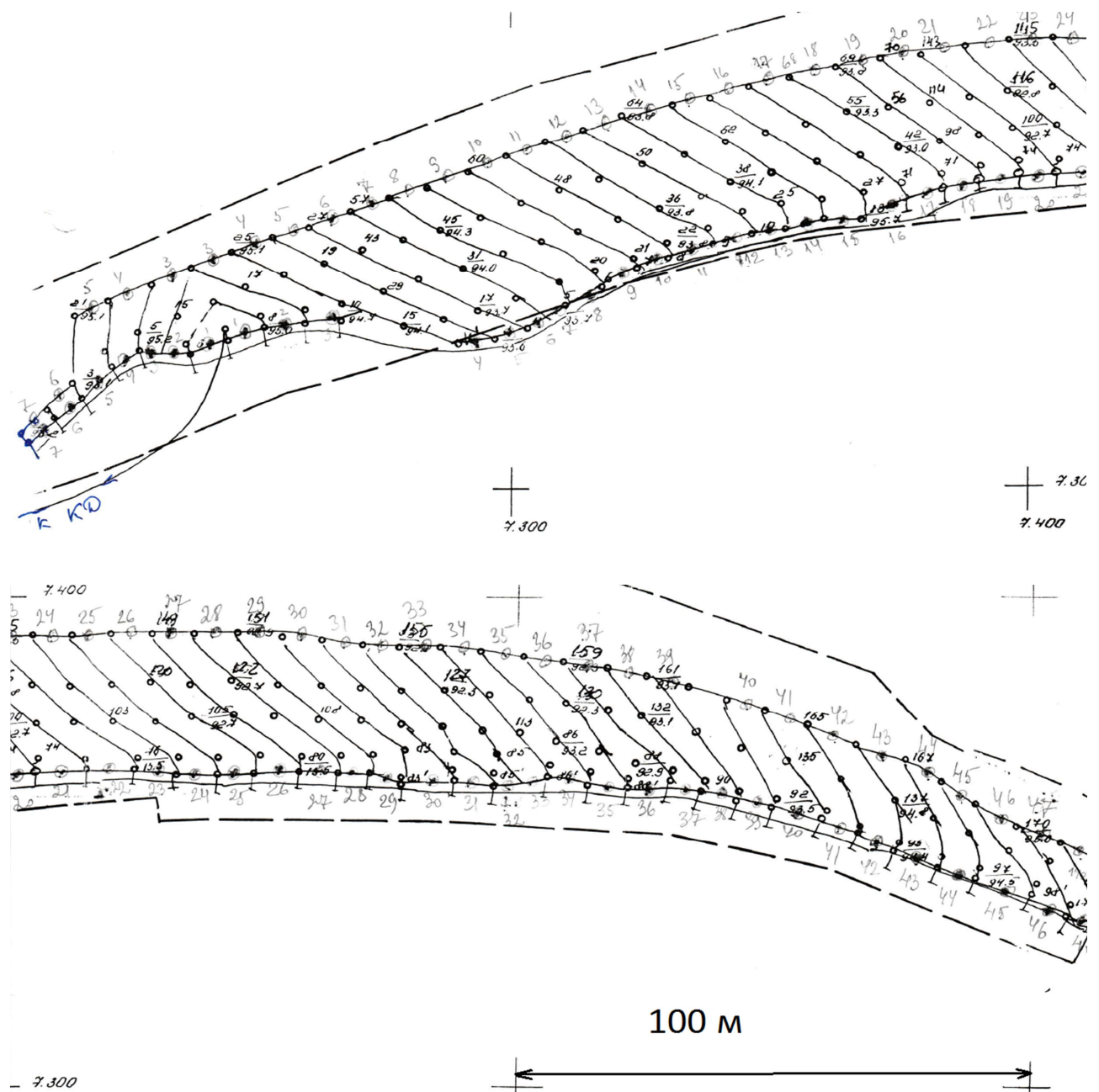


Рисунок 2.1 – Схема монтажа взрывной сети

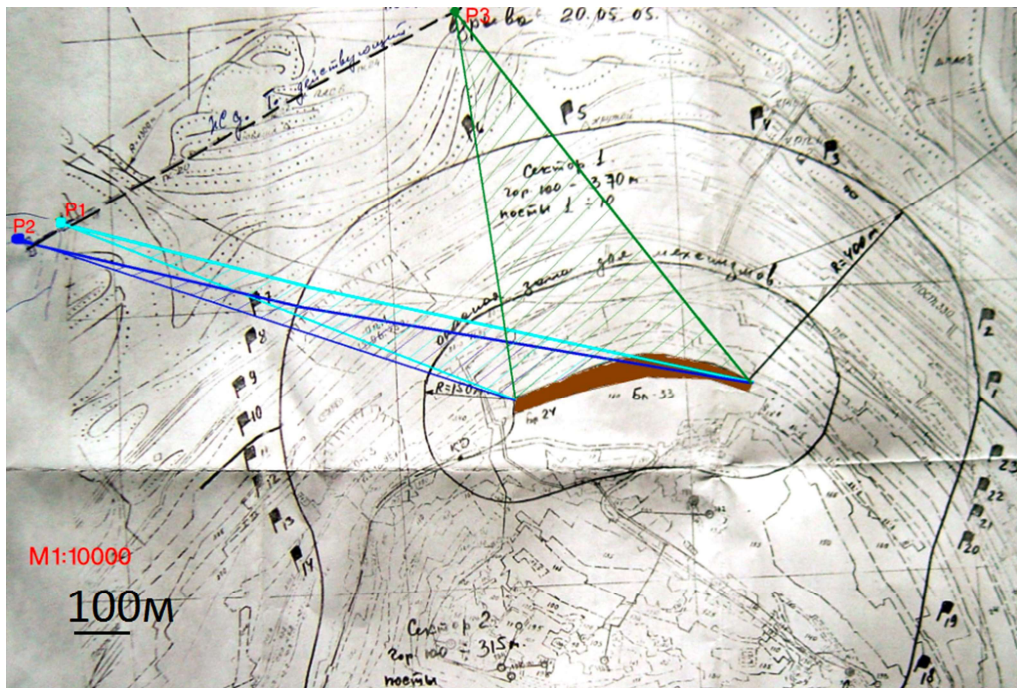


Рисунок 2.2 – Схема расположения пунктов регистрации СВВ P1 – P3 на ситуационном плане [201]



Рисунок 2.3 – Измерительный комплекс в пункте P2. Сейсмические датчики компонент скорости смещения: 1 – вертикальной; 2 – радиальной (в направлении на взрыв); 3 – тангенциальной (перпендикулярно направлению на взрыв)

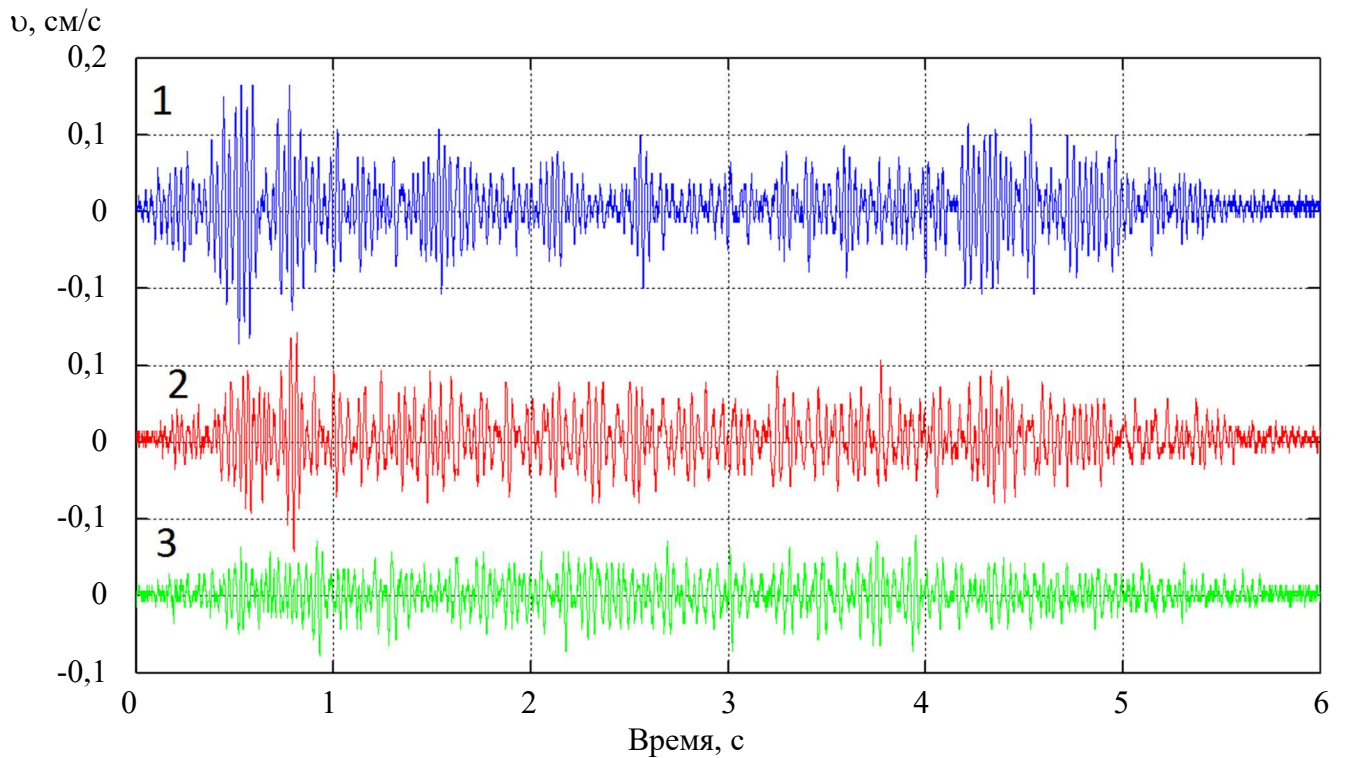


Рисунок 2.4 – Велосиграмы компонент скорости смещения:

1 – вертикальной; 2 – радиальной; 3 - тангенциальной

Таблица 2.1 - Результаты воздействия СВВ массового взрыва на железнодорожный тоннель

Пункт	R , м	v_{Σ} , см/с	Условие	
			$n = 1,5$	$K = 530$
			K	n
P1	900	0,07	32	2,19
P2	970	0,24	122	1,85
P3	700	0,16	50	2,12

Примечания: 1. Расстояние R рассчитывалось по сейсмическому лучу (с учетом перепада высотных отметок) и соответствовало положению ступени замедления с максимальной массой скважинных зарядов взрывчатого вещества. 2. Оценки K и n вычислялись для $Q = 3540$ кг (п.2.2.1).

Из анализа таблицы 2.1 следует:

1. При значении $n = 1,5$ в пунктах P1 и P3 получается весьма заниженные значения коэффициента сейсмичности, лишь для пункта P2 значение коэффициента сейсмичности согласуется с данными, взятыми из литературных источников. Например, в [39] приводятся результаты сейсмического воздействия (сопоставимого по массе взрываемого взрывчатого вещества) массового взрыва на Шерегешевском руднике Горной Шории: $K = 70$, $n = 1,5$. В остальных случаях приводятся значения коэффициента сейсмичности гораздо больше;

2. При значении $K = 530$ полученные значения показателя затухания коррелируют с литературными данными. При этом повышенные значения показателя затухания в пунктах P1 и P3 соответствуют условиям регистрации сейсмического воздействия массового взрыва: на подземную часть тоннеля воздействуют объемные сейсмические волны, которые быстрее затухают, чем поверхностные, особенно при распространении в низко прочных трещиноватых горных породах. В пункте P2 регистрируются и объемные и поверхностные СВВ.

Следует отметить, что в настоящем параграфе оценки по K и n получены по данным взрыва только одной ступени замедления с наибольшей массой взрывчатого вещества, остальные ступени замедления не принимались в рассмотрение.

2.2.3 Определение коэффициента сейсмичности и показателя затухания сейсмозрывных волн на основе разработанной теоретической модели

Указанный недостаток, отмеченный в п.2.2.2, позволяет устранить теоретическая модель, разработанная в п.2.1. Для этого рассмотрим условия применимости параметров массового взрыва:

1. Из анализа рисунков 2.1-2.2 следует весьма удачное расположение пункта P2 относительно взрываемого блока;

2. Отбойка горной массы производится в направлении, противоположном направлению на пункт P2, что позволяет регистрировать сейсмический сигнал от всей колонки скважинного заряда взрывчатого вещества;

3. Сейсмическая трасса проходит в узком секторе, что обеспечивает изменение эпицентрального расстояния практически в направлении инициирования взрыва. При этом протяженность блока составляет порядка 400 м, что соизмеримо с удаленностью пункта регистрации от взрываемого блока.

4. Благодаря большому интервалу времени замедления (100 мс) массовый взрыв соответствует последовательности частично взаимодействующих относительно СВВ 50-и мгновенных взрывов с весьма вариативными массами взрывчатого вещества.

Условия (1-4) уникальны с точки зрения регистрации сейсмического воздействия на охраняемый объект от крупномасштабного массового взрыва.

Используя велосиграны компонент скорости смещения (рисунок 2.4), получим зависимость модуля скорости смещения от времени, а путем усреднения этой зависимости во временном окне, соответствующему интервалу времени замедления 100 мс, - огибающую кривую (рисунок 2.5). По сути, огибающая кривая модуля скорости смещения является реализацией функции (2.3). В частности, из рисунка 2.5 видна разница между максимальной векторной скоростью смещения (0,24 см/с) и пиковым значением модуля скорости смещения (0,185 см/с), составляющая $\approx 25\%$.

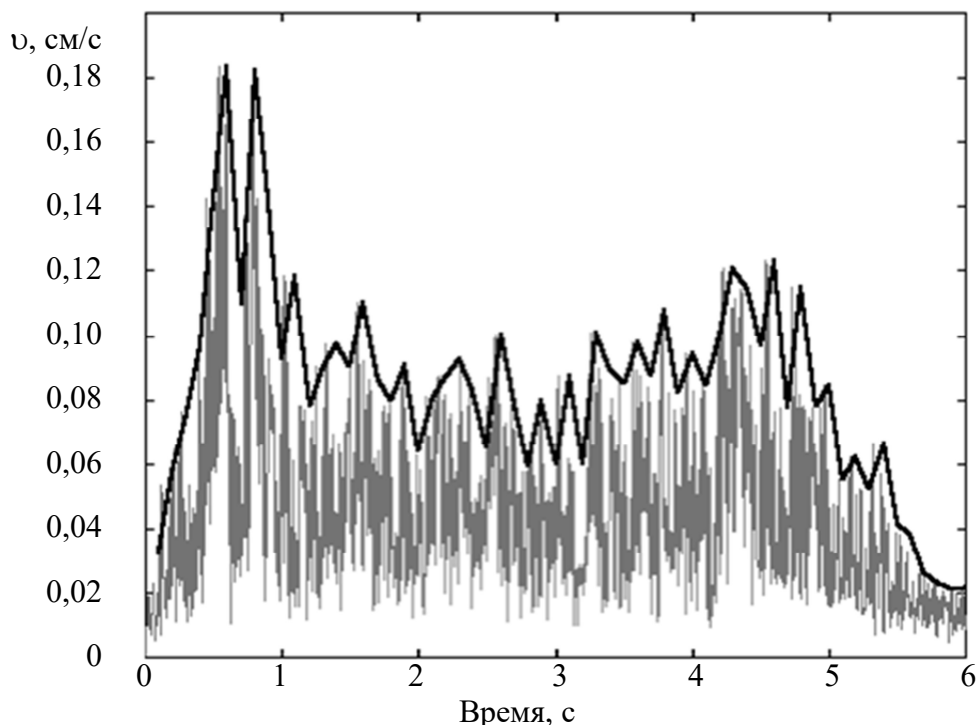


Рисунок 2.5 – Зависимости модуля скорости смещения и его огибающей (жирная кривая) от времени [149]

На рисунке 2.6 показаны графики дискретных зависимостей масс зарядов в ступенях замедления и средних расстояний от пункта регистрации до ступеней замедления. По этим данным вычислялась дискретная зависимость приведенного расстояния от времени (величина в круглых скобках в выражении (2.2)).

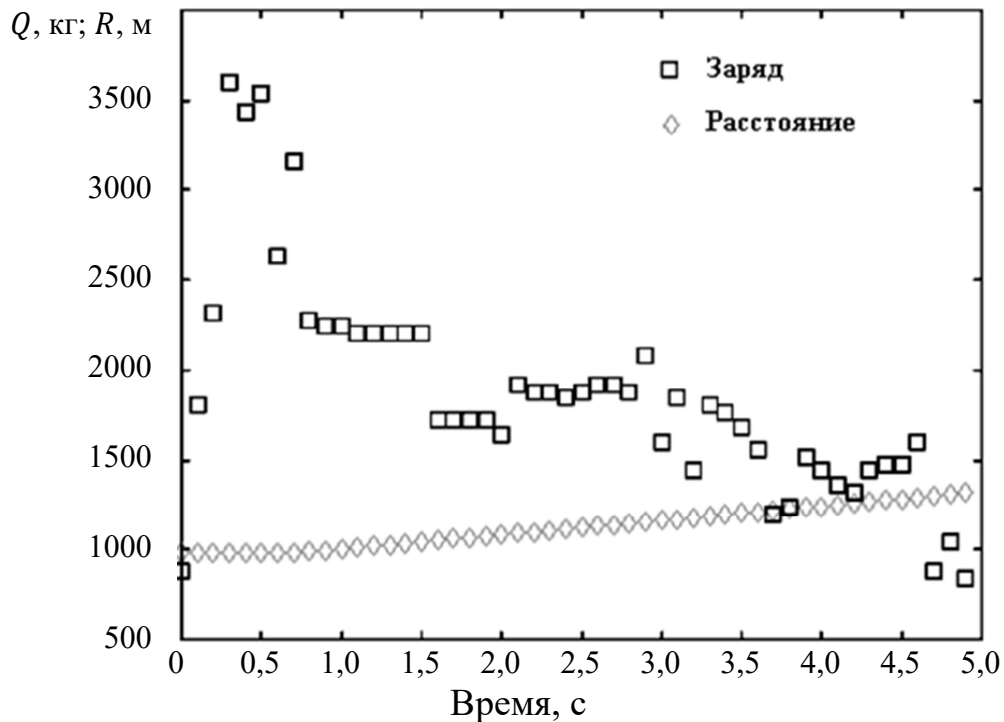


Рисунок 2.6 – Зависимости дискретных масс заряда взрывчатого вещества и средних расстояний от времени [149]

Согласно теоретической модели, необходимо применить операцию низкочастотной цифровой фильтрации с одинаковыми параметрами фильтров к огибающей кривой модуля экспериментальной скорости смещения (рисунок 2.5,) и к аппроксимации модуля модельной скорости смещения согласно выражению (2.2). Результаты фильтрации представлены на рисунке 2.7.

Для широкого диапазона частот среза фильтра установлено (рисунок 2.7), что параметры K_a и n_a аппроксимации модуля модельной скорости смещения практически не зависят от частоты среза, в то время как средняя квадратичная ошибка, представляющая собой величину $F(K_a, n_a)/N$, растет по мере увеличения частоты среза. При задании начального приближения K_a больше 400 для каждого K_a определяется оптимальное значение n_a , но при этом средняя квадратичная ошибка практически не изменяется. Надо отметить, что аппроксимация модуля модельной скорости смещения является достаточно

точным приближением к огибающей кривой модуля экспериментальной скорости смещения примерно для первой половины времени длительности массового взрыва. Расположение экспериментальной зависимости над ее аппроксимацией для второй половины времени длительности массового взрыва можно объяснить неучтенным дополнительным сейсмическим эффектом от падающей взорванной горной массы, который может наблюдаться после начала взрывания до 2,4 с согласно [76]. Еще одним объяснением этого факта будет наличие сейсмического очага наибольшего размера для последних ступеней замедления, что создает предпосылки увеличения длительности сейсмического воздействия [122].

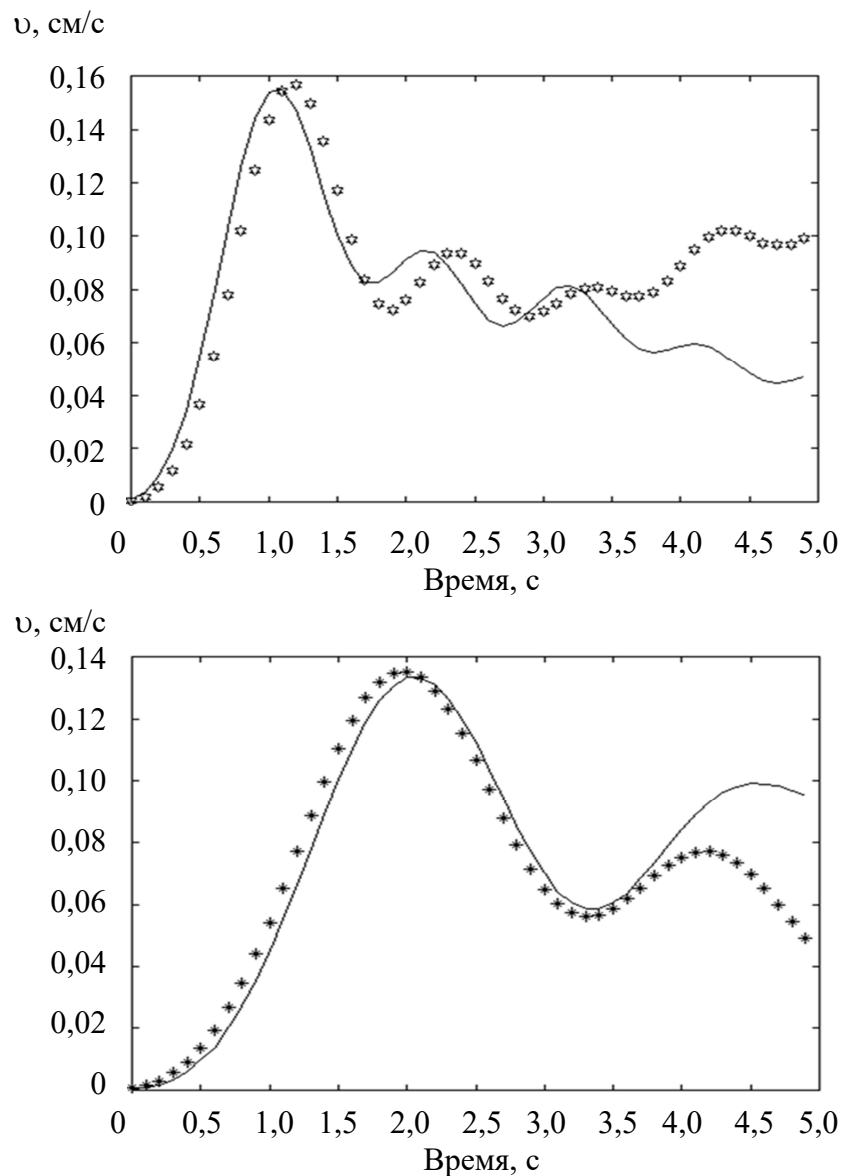


Рисунок 2.7 – Отфильтрованные зависимости модуля скорости смещения:

$f_{cp} = 1$ Гц – верхний рисунок; $f_{cp} = 0,5$ Гц – нижний рисунок.

Сплошная кривая – аппроксимация. ☆, ★ эксперимент [201]

Из анализа рисунка 2.7 следует, что средняя квадратичная ошибка принимает минимальное значение. Последнее означает, что оптимальным результатом минимизации функции (2.4) будет не одна пара значений K_a и n_a , а, вообще говоря, бесконечное множество пар значений, т.е. задавая, например K_a , всегда найдется такое n_a , при котором средняя квадратичная ошибка будет минимальна. Данный вывод проиллюстрирован рисунком 2.8.

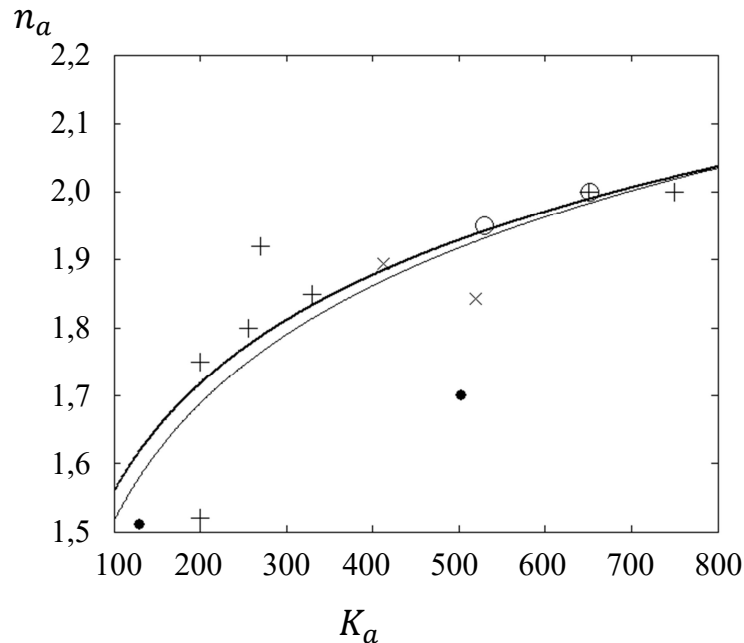


Рисунок 2.8 – Зависимости показателя затухания от коэффициента сейсмичности (верхняя кривая). «+» - данные согласно [88] и их аппроксимация (нижняя кривая) [175].

«•» - согласно [1, 2]. «x» - согласно [191]. «o» - согласно [11, 149]

Анализ рисунка 2.8 приводит к весьма важному заключению о том, что существуют не просто пары значений K_a и n_a , при которых достигается минимизация функции вида (2.4), а существует функциональная связь между коэффициентом сейсмичности и показателем затухания [175], которую можно представить в виде формулы (2.6):

$$n = 0,23 \ln(8,8K). \quad (2.6)$$

Подобный факт с физической точки зрения легко объяснить фундаментальным свойством поглощающих сред – условием причинности [125], когда свойство среды относительно распространения сейсмических волн можно представить в виде комплексной величины. Роль действительной части будет

выполнять коэффициент сейсмичности, характеризующий жесткость среды (в частности, это качественно объясняет функциональную связь коэффициента сейсмичности со скоростями распространения СВВ по формуле (2.5)), а мнимой части – показатель затухания, характеризующий поглощение среды, с одной оговоркой, если рассматривать эти величины как функции частоты. Из формул (2.5)-(2.6) так же следует, что с увеличением скорости распространения продольной СВВ растет и показатель затухания, что соответствует выводам статьи [138]. Отметим, что условие причинности широко известно в области физики, объясняющей процесс распространения электромагнитных волн в твердых телах, описываемый функцией диэлектрической проницаемости, как соотношения Крамерса-Кронига [141].

Используя формулу М.А. Садовского и формулу (2.6), получим выражение для прогноза пикового значения модуля скорости смещения [175] вида (2.7):

$$v_{\text{пм}} = K \left(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}} \right)^{-0,23 \ln(8,8K)} \quad (2.7)$$

Пространственное представление прогнозного пикового значения модуля скорости смещения в координатах $\left(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}}; K \right)$ приведено на рисунке 2.9.

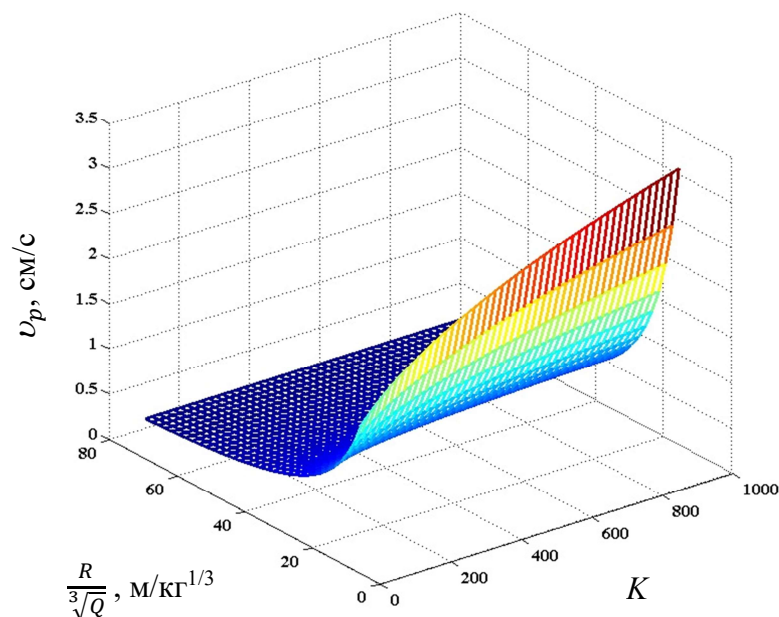


Рисунок 2.9 – Зависимость прогнозного пикового значения модуля скорости смещения от приведенного расстояния и коэффициента сейсмичности [175]

Таким образом, прогнозное пиковое значение модуля скорости смещения грунта в основании охраняемого объекта по сейсмическому фактору безопасного ведения взрывных работ, по крайней мере, на карьерах определяется классификационным критерием уровня сейсмического воздействия взрыва (2.5-2.7) на основе показателя затухания сейсмической волны в диапазоне 1,56-2,04 и коэффициента сейсмичности в диапазоне 100-800. Вопросам отклонения экспериментальных точек от зависимости (2.6) посвящена глава 3.

Практически важно знать величину сейсмобезопасной массы заряда одной ступени замедления [114], определяемую по формуле (2.8):

$$Q_{сб} = \left(\frac{v_{пр}}{K}\right)^{\frac{3}{n}} \cdot R^3, \quad (2.8)$$

где $v_{пр}$ – предельно допустимая скорость смещения.

Далее рассмотрим вопрос, как будет изменяться сейсмобезопасная масса взрывчатого вещества, например, для средней части интервала по $K = 400 \dots 600$ [151]. Используя формулы (2.6), (2.8) для фиксированных значений $v_{пр}$ и R , получим $\frac{Q_{сб}(K=400; n=1,89)}{Q_{сб}(K=600; n=1,98)} = 1,2$.

Оценка коэффициента сейсмичности по формуле (2.5) и показателя затухания по формуле (2.7) для условий карьера «Коршуновский» дает следующие значения: $K = 530$, $n = 1,95$. Если сравнивать значение показателя затухания, полученное по формуле (2.6) и приведенное в таблице 2.1 ($n = 1,85$), то получим удовлетворительное согласие в пределах ошибки измерений.

2.3 Проверка классификационного критерия по результатам экспериментального исследования сейсмического воздействия взрывных работ на охраняемый целик на карьере «Вуокса»

2.3.1 Характеристика объекта, параметры буровзрывных работ, методика и результаты регистрации параметров сейсмозврывных волн

Характеристика объекта. Гранитный карьер «Вуокса» расположен в Выборгском районе Ленинградской области. Взорванная горная масса

используется для производства щебня. Проблема заключается в том, что откос нерабочего борта расположен на расстоянии около 200 м от берега реки Вуокса. По плану развития горных работ предусмотрено дальнейшее углубление карьера на десятки метров ниже уровня поверхности воды в реке. По сути, нерабочий борт является водоразделом между бассейном реки и выработанным пространством карьера, т.е. целиком – охраняемым объектом, подвергающимся воздействию взрывных работ. Целик представлен гранит-диоритами крепостью $f = 12 - 14$. По данным гидрогеологических исследований минеральный состав воды, поступающей в выработанное пространство карьера в отсутствие активного выпадения осадков и таяния снегов, идентичен минеральному составу воды в реке Вуокса. Характер фильтрации воды – напорный, по естественным трещинам целика. Согласно проведенным ранее научно-исследовательским работам по сохранности гранитного массива на блочных карьерах Ленинградской области сотрудниками кафедры взрывного дела Горного университета, а также в соответствии с работами [121, 165] рекомендована предельная скорость смещения грунта 16 см/с по границе карьера при многократном воздействии на него СВВ от массовых взрывов.

Параметры массового взрыва, произведенного 11.03.2011г. Общая масса взрывчатых веществ (тротиловые шашки и сибирит) составила 44,1 т (удельный расход заряда взрывчатого вещества 1,46 кг/м³) и была рассредоточена равномерно по 60-и сухим скважинам диаметром 250 мм с сеткой 5,5×5.5 м², линией сопротивления по подошве уступа 8...10 м, средней высота уступа 15,5 м. Высота колонки заряда взрывчатого вещества была 13 м, забойки – 4 м, перебур по 1-у ряду – 2 м, для остальных скважин – 1 м. Применялось короткозамедленное взрывание с замедлением 67 мс 12 ступеней электрическим способом с детонирующим шнуром и пиротехническими реле по поверхности и СИНВ-С по две нитки в скважинном заряде взрывчатого вещества (промежуточные детонаторы располагались на уровне подошвы уступа). Нулевая ступень замедления представляла скважину с массой заряда взрывчатого вещества 720 кг,

в том числе 120 кг взрывчатого вещества в перебуре. На рисунке 2.10 приведена схема монтажа взрывной сети.

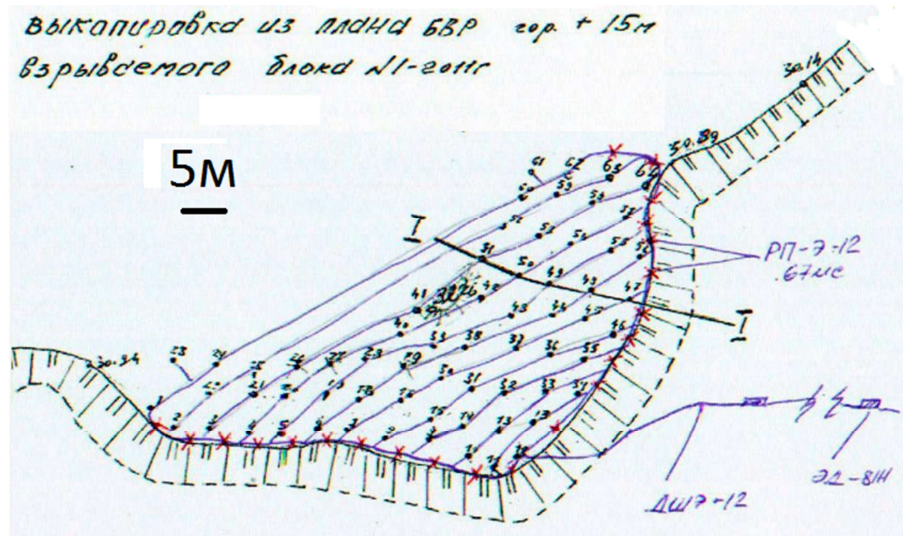


Рисунок 2.10 – Схема монтажа взрывной сети

Методика и результаты регистрации параметров сеймовзрывных волн. Измерения проводились с помощью сеймостанций MiniMate Plus (V 8.12-8.0) с трехкомпонентным сейсмическим датчиком и BlastMate III/8 (V 8.12-8.0) с двумя трехкомпонентными сейсмическими датчиками и кабелем-удлинителем. Были выбраны три точки сейсмических измерений (рисунок 2.11), из которых две точки лежали на профиле: эталонный заряд взрывчатого вещества – точка, лежащая вблизи охраняемого целика (Т.2.2), и точка (Т.2.1). Вид на точки измерений со стороны скважины с эталонным зарядом показан на рисунке 2.12.

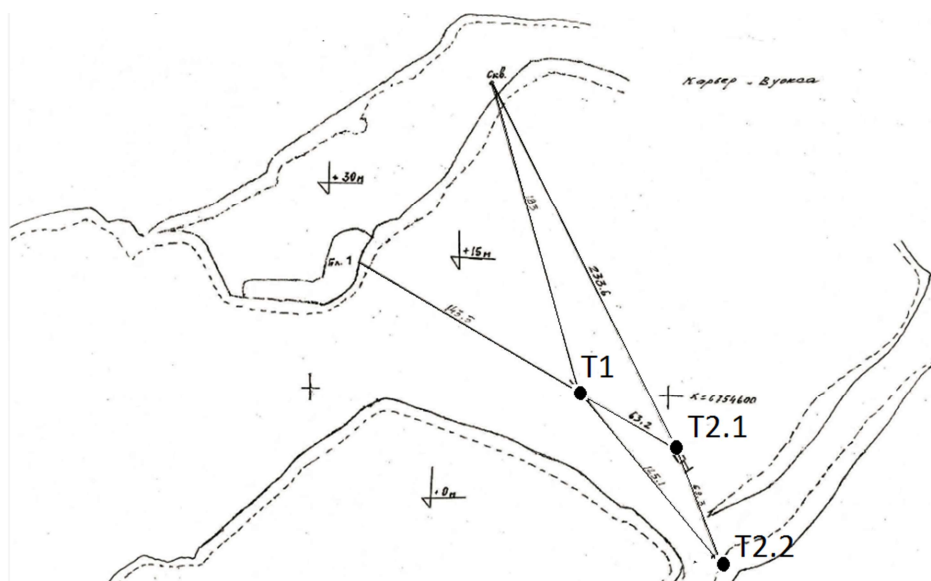


Рисунок 2.11 – Схема размещения точек регистрации СВВ на плане карьера [12]

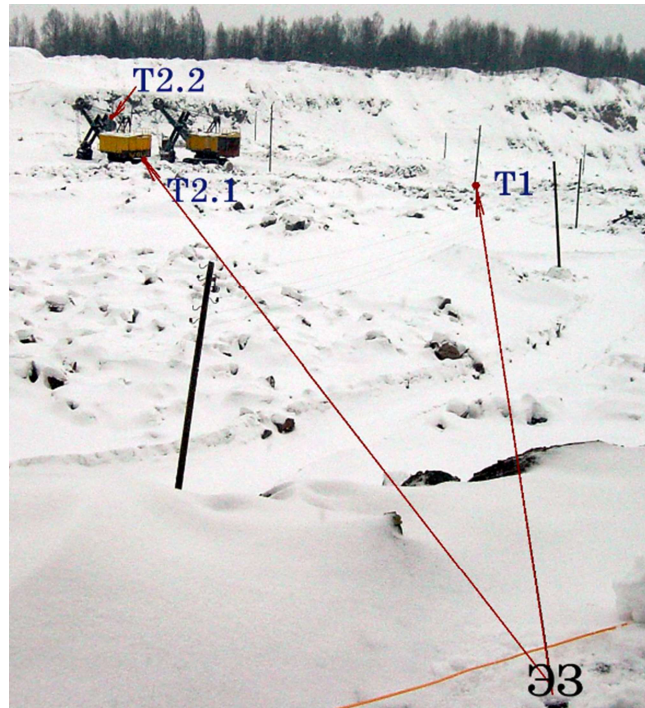


Рисунок 2.12 – Вид на точки измерений со стороны места заложения эталонного заряда взрывчатого вещества

Измерения по профилю (Т.2.1-Т.2.2) производились с помощью сейсмостанции BlastMate III/8, измерения в Т1 - с помощью сейсмостанции MiniMate Plus. Сейсмические датчики фиксировались на грунте пригрузом из мешков с отсевом массой 12-15 кг. Сейсмостанции были настроены на интервал дискретизации 1/2048 с и продолжительность записи велосиграмм 10 с. Запись начиналась с момента первого вступления сейсмических колебаний.

Параметры эталонного заряда взрывчатого вещества выбирались в соответствии с требованием заложения колонки заряда не выше подошвы обуриваемого уступа (отметка +15 м) под массовый взрыв. Скважина с эталонным зарядом взрывчатого вещества не подвергалась засыпке забоечным материалом. Таким образом, обеспечивалось формирование сейсмических волн за счет бризантного воздействия взрыва. Масса заряда взрывчатого вещества рассчитывалась по формуле М.А. Садовского с предварительными параметрами $K = 300$, $n = 1,5$ для скорости смещения $v_{\Sigma} \geq 1$ см/с и расстояния $R = 302,9$ м

до точки Т.2.2: $Q_{\text{эз}} \geq \left(\frac{v_{\text{п}}}{K}\right)^{\frac{3}{n}} \cdot R^3 = \left(\frac{1}{300}\right)^{\frac{3}{1,5}} \cdot 302,9^3 = 309$ кг. Фактическая масса заряда взрывчатого вещества сибирита в колонке высотой 7 м составила 362 кг.

Первым был взорван эталонный заряд взрывчатого вещества, затем через 0,67 с началось инициирование массового взрыва. Результаты регистрации параметров СВВ приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Результаты регистрации параметров СВВ [12]

Точка	Взрыв эталонного заряда взрывчатого вещества			Массовый взрыв		
	R , м	$v_{\text{пм}}$, см/с	v_{Σ} , см/с	R , м	$v_{\text{пм}}$, см/с	v_{Σ} , см/с
T1	183	1,19	1,42	143,5	2,11	2,85
T2.1	233,6	0,9	1,09	206,7	1,42	1,93
T2.2	302,9	0,89	1,06	262,5	1,43	1,78

Как следует из таблицы 2.2, значение максимальной векторной скорости смещения v_{Σ} больше пикового значения модуля скорости смещения $v_{\text{пм}}$ на $\approx 20\%$ при взрыве эталонного заряда взрывчатого вещества и до 35% при массовом взрыве. Для точек T2.1 и T2.2 различие в скоростях смещения меньше.

2.3.2 Оценка коэффициента сейсмичности по скоростям продольных и поверхностных сейсмозрывных волн

Исходя из условий проведения массового взрыва (рисунки 2.10-2.10), оказывается невозможным применение модели совместного определения коэффициента сейсмичности и показателя затухания: отсутствует вариация масс зарядов взрывчатого вещества, средних расстояний от ступеней замедления до точек регистрации СВВ, отбойка горной массы ведется в направлении к точкам регистрации. Однако остается возможность оценки коэффициента сейсмичности согласно выражению (2.5) и следствию из разработанной модели, представленному в виде формулы (2.7).

Для надежной оценки коэффициента сейсмичности определялись значения скоростей распространения СВВ по данным синхронизированных измерений велосиграмм по профилю от взрыва эталонного заряда взрывчатого вещества. В отличие от сейсморазведочных измерений при взрыве заряда взрывчатого вещества большой массы слабая поперечная СВВ маскируется мощной поверхностной СВВ [126]. Поэтому ограничимся определением скоростей продольной и поверхностной СВВ путем сравнения зависимостей модуля скорости смещения от времени, полученных по профилю T2.1-T2.2 (рисунок 2.13).

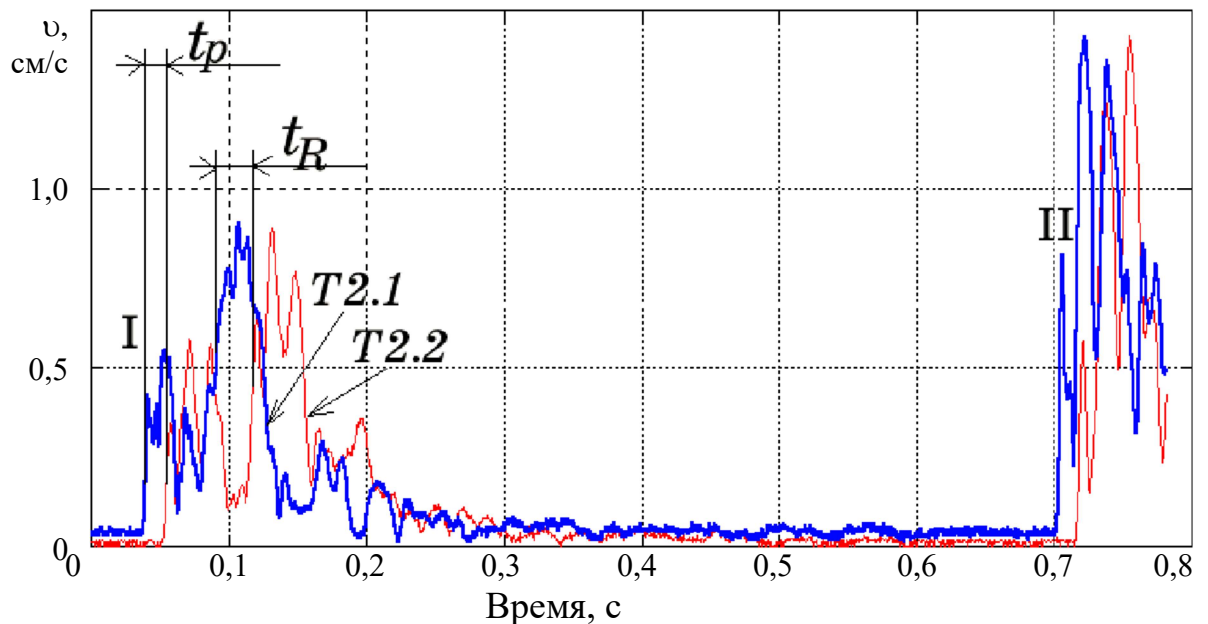


Рисунок 2.13 – Зависимости модуля скорости смещения от времени в точках измерений T2.1 и T2.2: I – взрыв эталонного заряда взрывчатого вещества, II – массовый взрыв [12]

На рисунке 2.13 показано, как определяется задержка распространения продольных СВВ t_p и поверхностных СВВ t_R . Согласно данным таблицы 2.2 и рисунка 2.13 получим для скоростей распространения:

- продольной СВВ $C_p = (302,9 - 233,6)/14,7 = 4,71$ км/с;

- поверхностной СВВ $C_R = (302,9 - 233,6)/28 = 2,48$ км/с.

В предположении изотропии гранитного массива [109] для скорости распространения поперечной волны справедлива формула [126] вида (2.9):

$$C_s = C_p \sqrt{(1 - 2\nu)/[2(1 - \nu)]}, \quad (2.9)$$

где ν – коэффициент Пуассона.

С учетом формулы (2.9) коэффициент Пуассона находится из уравнения [55] вида (2.10):

$$C_R = C_p \frac{0,87+1,12\nu}{1+\nu} \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}}. \quad (2.10)$$

Откуда $\nu = 0,26$ и $C_s = 2,68$ км/с. По формуле (2.5) с учетом $\rho = 2700$ кг/м³ получим $K = 827$.

Дадим оценку показателю затухания по $v_{\text{пм}}$. Для этого используем наибольшее значение скорости смещения, полученное от взрыва эталонного заряда взрывчатого вещества (таблица 2.2). Для коэффициента затухания получим: $n_1 = \frac{\ln(v_{\text{пм}}/K)}{\ln(\sqrt[3]{Q_{93}}/R)} = \frac{\ln(1,19/827)}{\ln(\sqrt[3]{362}/183)} = 2,0$ (то же – по значению v_{Σ} : $n_2 = 1,95$).

Сравним прогнозные и измеренные значения скоростей смещения от массового взрыва. Согласно рисунку 2.13 пиковое значение модуля скорости смещения соответствует 0-й ступени замедления ($Q = 720$ кг). Результаты вычислений сравнительных значений по $v_{\text{пм}}$ и v_{Σ} представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 - Результаты вычислений значений параметров $v_{\text{пм}}$ и v_{Σ} для массового взрыва

Точка	T.1	T2.1	T2.2
$v_{\text{пм}}$, см/с	3,21 (2,11)	1,55 (1,42)	0,96 (1,43)
v_{Σ} , см/с	3,69 (2,85)	1,81 (1,93)	1,14 (1,78)

Примечание: для удобства в скобках приведены измеренные значения скоростей смещения.

Как следует из таблицы 2.3, прогнозные значения по $v_{\text{пм}}$ меньше прогнозного значения по v_{Σ} не более чем на 18%. Расчетное значение скорости смещения на малых расстояниях от эпицентра взрыва оказывается завышенным, на больших расстояниях – занижено. Последнее связано с влиянием продольных и поверхностных СВВ: на малых расстояниях сейсмическое воздействие продольных СВВ больше. Однако продольные волны затухают быстрее поверхностных волн. Это следует также из рисунка 2.13.

Если аппроксимировать расчетные значения скорости с постоянным коэффициентом сейсмичности $K = 827$ в предположении линейной зависимости показателя затухания от расстояния, то получим практическую оценку прогнозного сейсмического воздействия массового взрыва по формуле (2.11):

$$v = 827 \left(\sqrt[3]{Q/R} \right)^{n_0 - 0,002(R-140)}, \text{ см/с}, \quad (2.11)$$

где $n_0 = 2,14$ для $v_{\text{пм}}$; $n_0 = 2,09$ для v_{Σ} .

Правомерность такого представления показателя затухания рассматривается в главе 3.

Отметим, что для рассматриваемого массового взрыва нулевая ступень замедления формирует сейсмический экран, который ослабевает сейсмическое воздействие на целик более мощных ступеней замедления [12].

2.3.3 Проверка соответствия коэффициента сейсмичности и показателя затухания сейсмозрывных волн функциональной связи между ними

Выразим коэффициент сейсмичности через приведенное расстояние и скорость смещения, используя формулу (2.7). После несложных алгебраических преобразований для коэффициента сейсмичности получим выражение (2.12):

$$K_{\phi} = \exp \left[\frac{\ln(v_{\text{пм}}) + 0,5 \cdot \ln \left(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}} \right)}{1 - 0,23 \cdot \ln \left(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}} \right)} \right]. \quad (2.12)$$

Выражение (2.12) теряет физический смысл при обращении знаменателя дроби в ноль и отрицательных значениях знаменателя при условии: $\frac{R}{\sqrt[3]{Q}} < 77,3$.

Определим значения K_{ϕ} по данным измеренных скоростей смещения для исследованных взрывов по формуле (2.12) и показателя затухания СВВ по формуле (2.6). Соответствующие расчеты представлены в таблице 2.4.

Как следует из анализа таблицы 2.4, для практических оценок прогнозных значений скоростей смещения по формуле (2.7) опытный взрыв и точка регистрации должны удовлетворять более строгому неравенству (2.13):

$$\frac{R}{\sqrt[3]{Q}} < 30. \quad (2.13)$$

Таблица 2.4 - Результаты расчета коэффициента сейсмичности и показателя затухания

Взрыв эталонного заряда взрывчатого вещества				
Точка		Т.1 $(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}} = 25,7, \text{ м/кг}^{1/3})$	Т2.1 $(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}} = 32,8, \text{ м/кг}^{1/3})$	Т2.2 $(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}} = 42,6, \text{ м/кг}^{1/3})$
$u_{\text{пм}}$	$K_{\phi 1}$	1217	4151	$3,72 \cdot 10^5$
	$n_{\phi 1}$	2,13	2,42	3,45
u_{Σ}	$K_{\phi 2}$	2440	$1,1 \cdot 10^4$	$1,3 \cdot 10^6$
	$n_{\phi 2}$	2,29	2,64	3,74
Массовый взрыв				
Точка		Т.1 $(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}} = 16, \text{ м/кг}^{1/3})$	Т2.1 $(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}} = 23,1, \text{ м/кг}^{1/3})$	Т2.2 $(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}} = 29,4, \text{ м/кг}^{1/3})$
$u_{\text{пм}}$	$K_{\phi 1}$	366	1009	981
	$n_{\phi 1}$	1,86	2,09	2,08
u_{Σ}	$K_{\phi 2}$	840	$3,05 \cdot 10^3$	$2,62 \cdot 10^4$
	$n_{\phi 2}$	2,05	2,38	2,84

Полученные значения коэффициента сейсмичности и показателя затухания с условием (2.13) согласуются с литературными данными (глава 1). В таблице 2.5 приведены значения скоростей смещения грунта от массового взрыва по данным $K_{\phi 1}$, $n_{\phi 1}$ и $K_{\phi 2}$, $n_{\phi 2}$, полученным от взрыва эталонного заряда в Т.1.

Если сравнить результаты вычислений прогнозных оценок по $u_{\text{пм}}$ и u_{Σ} , приведенных в таблицах 2.3, 2.5, то в пределах погрешности $\approx 30\%$ прогнозные оценки соответствуют измеренным значениям. Отметим отличие в подходах к определению коэффициента сейсмичности и показателя затухания, рассмотренных в предыдущем и настоящем параграфах. Подход с использованием процедуры определения этих параметров по данным скоростей СВВ требует, как минимум, две точки регистрации, подход с использованием классификационного критерия (2.7) при выполнении условия (2.13) – одну точку.

Таблица 2.5 - Результаты вычислений значений параметров $u_{\text{пм}}$ и u_{Σ} для массового взрыва, полученные по данным взрыва эталонного заряда

Точка	T.1	T2.1	T2.2
$u_{\text{пм}}, \text{см/с}$	3,30 (2,11)	1,51 (1,42)	0,91 (1,43)
$u_{\Sigma}, \text{см/с}$	4,24 (2,85)	1,84 (1,93)	1,06 (1,78)

Примечание: для удобства в скобках приведены измеренные значения скоростей смещения.

Если взять значение $K = 827$, принятое для прогноза скоростей смещения в п.2.3.2, и подставить его в формулу (2.6), то получим значение показателя затухания: $n = 0,23 \ln(8,8K) = 0,23 \ln(8,8 \cdot 827) = 2,05$, близкое к значениям n_0 в формуле (2.11). Последнее является подтверждением функциональной связи между коэффициентом сейсмичности и показателем затухания для условий карьера строительных материалов «Вуокса».

В заключении рассмотрим выполнимость условия (2.13) для оценки коэффициента сейсмичности по формуле (2.12) от массового взрыва, произведенного на карьере «Коршуновский» (п. 2.2.2.). В результате вычислений получим: $\frac{R}{\sqrt[3]{Q}} = \frac{970}{\sqrt[3]{3540}} \approx 64 > 30$. Таким образом, попытка оценки коэффициента сейсмичности по формуле (2.12) дает некорректное значение параметра. Тем не менее, и в этом случае связь между параметрами K и n функциональна.

2.4 Проверка классификационного критерия по результатам экспериментального исследования сейсмического воздействия технологических взрывов на надшахтные сооружения для условий ОАО «Ново-Широкинский рудник»

2.4.1 Характеристика надшахтных сооружений и выбор критерия их сейсмической безопасности

На Ново-Широкинском руднике основная проблема ведения буровзрывных работ обозначилась в марте 2010 г. в виде реализованной угрозы аварии, когда произошло частичное обрушение надшахтного сооружения административно-

бытового комплекса после проведения технологического взрыва по отбойке руды на IV блоке (рисунок 2.14).



Рисунок 2.14 – Частичное обрушение каменной кладки здания административно-бытового комплекса [14]

На промышленной площадке рудника в зону сейсмического воздействия технологических взрывов попадают здания и сооружения следующих типов (рисунок А1 приложения А):

- металлокаркасные (современная достроенная часть здания административно-бытового комплекса);
- крупнопанельные (здание обогатительной фабрики);
- деревянные (старое здание административно-бытового комплекса), смешанного типа с кирпичной кладкой наружных стен (часть здания административно-бытового комплекса, примыкающего к клетевому стволу (рисунок 2.14), здание подъемных машин);
- одноэтажные каркасные складские помещения;
- сооружения с металлическим каркасом башенного типа со значительным заглублением (стволы шахты «Клетевой» и «Скиповой»).

Основная часть зданий и сооружений была построена в 80-е годы 20-го века, в том числе постройки с кирпичной кладкой наружных стен. Визуальный

анализ остатков разрушенной стены здания административно-бытового комплекса (рисунок 2.14) указывает на недостаточную связь стены с несущими балками здания. Практически стена оказалась свободно стоящей на фундаменте. То же отмечается и для кирпичной стены здания подъемных машин. Наблюдается заметное горизонтальное отклонение верхней части стены в виде непрерывной щели (рисунок 2.15).



Рисунок 2.15 – Щель (показана стрелкой) между стеной и крышей в здании подъемных машин

Следует констатировать, что наименьшая сейсмическая устойчивость упомянутых объектов ожидается у зданий со стенами кирпичной кладки. Несмотря на отсутствие прямых указаний нормативной документации, такие здания следует относить к категории «ветхих каменных зданий» при условии, что они являются «не аварийными». Для аварийных зданий отсутствуют какие-либо критерии сейсмической безопасности, поскольку их разрушение может произойти от факторов, связанных с состоянием самого здания.

Для группы близко расположенных зданий в качестве величины критерия сейсмической безопасности выбирается наименьшее значение скорости смещения, отвечающее состоянию объекта с самой низкой сейсмической устойчивостью. Для условий Ново-Широкинского рудника такими объектами являются часть здания административно-бытового комплекса старой постройки и здание подъемных машин.

Допустимые значения скоростей смещений в основаниях вышеуказанных объектов приведены в таблице 14.1 [121] соответственно в п.п. 2 и 3 и составляют

3 и 5 см/с. В примечаниях к таблице 14.1 [121] указывается, что «для зданий с деформациями в несущих конструкциях допустимые значения скоростей смещения снижаются в зависимости от конкретного состояния». По п.2 «при отдельных изолированных трещинах, строительных дефектах, в т.ч. при большом количестве дефектов, не снижающих несущую способность конструкции, - в 3-5 раз». По п.3 «при сквозных протяженных трещинах, нарушающих связь конструктивных элементов и снижающих несущую способность конструкции, а также для ветхих зданий - в 5-10 раз».

Принимая во внимание отсутствие экспертной оценки состояния несущих конструкций охраняемых объектов, будем ориентироваться на значения допустимых скоростей смещений по п.2 и п.3 не более 1,0 см/с.

2.4.2 Геологическая характеристика горных пород в зоне сотрясательного воздействия технологических взрывов

Охраняемые объекты расположены на скальном основании, сложенном, в основном, пироксен-плагиоклазовыми андезитовыми порфиритами, которые граничат: в направлении по лучу, соединяющему середину здания административно-бытового комплекса с серединой 2-го блока Главного рудного тела, с плагиоклазовыми андезитовыми порфиритами; в направлении по лучу, соединяющему середину здания административно-бытового комплекса с серединой 4-го блока V рудного тела с лавобрекчиями, переходящими в плагиоклазовые андезитовые порфириты.

Современные рыхлые отложения, залегающие над скальными породами, имеют примерно одинаковую мощность около 6 м и представлены со стороны земной поверхности средним и крупным галечником, погруженным в песчаную глину, со стороны скальных пород – глиной. Отложения не обводнены.

Тектонические разломы 2 и 3 (рисунок А1 приложения А) расположены в юго-западной части рудного тела и не пересекаются лучами, соединяющими надшахтные здания и сооружения с блоками, в которых ведутся или будут вестись добычные работы.

Рудное тело представлено пиритизированными метасоматитами хлорит-доломитового, кварц-хлорит-доломитового состава, преимущественно брекчиевидной текстуры. В большинстве случаев оруденение приурочено к жильным и прожилковым выделениям доломита и кварца, наиболее богатое оруденение – к кварцевым прожилкам. Вмещающие породы состоят из андезитов, андезитовых порфиритов, их лавобрекчий и туфов. Вторичные изменения вмещающих пород заключаются в их окварцевании, пиритизации, карбонатизации, хлоритизации, каолинизации. Падение рудного тела составляет 63° - 72° , рудное тело направлено в юго-западном направлении, таким образом, по мере отработки месторождения место производства технологических взрывов будет удаляться от надшахтных сооружений рудника.

Все породы разбиты сеткой разно ориентированных трещин. Крупные трещины, в основном, заполнены глинистым материалом. Серии трещин могут образовывать зоны тектонически ослабленных пород мощностью 1-1,5 м. Как правило, это одна-две трещины с раскрытием от 2,0 см и длиной до 10 м с глинистым материалом. Встречаются трещины с полыми участками длиной до 1,0 м и раскрытием до 1 см. Система распределения трещин, их плотность, размеры и взаимная ориентировка обуславливают наличие в горном массиве отдельностей различной крупности и формы. Серии трещин могут образовывать зоны тектонически ослабленных пород. Средняя плотность распределения трещин во вмещающих породах – 3-6 трещин на 1 м^2 , в рудной зоне – 5-10 трещин на 1 м^2 . Руды и вмещающие породы устойчивы и средней устойчивости. Крепость руд $f = 8 - 15$, вмещающих пород – $f = 8 - 15$. Особенностью физико-механических свойств руд является их повышенная вязкость, которая является причиной повышенного удельного расхода взрывчатого вещества при их отбойке (до 4 кг/м^3). Многолетняя мерзлота в пределах месторождения не имеет площадного распространения. Мощность мерзлоты 35-45 м. Максимальная мощность мерзлых пород приурочена к долинам.

Таким образом, фронт сейсмических волн от массовых взрывов до фундамента охраняемого объекта полностью проходит по неизменным породам

вне зон многолетней мерзлоты. Ожидается, что основное сейсмическое воздействие на охраняемый объект будут оказывать объемные продольные волны преимущественно с вертикальной компонентой скорости смещения грунта.

2.4.3 Параметры буровзрывных работ и методика регистрации велосиграмм

Параметры буровзрывных работ. Промышленная площадка рудника расположена на высотных отметках +917-937 м, очистные работы ведутся на горизонте 850 м. Ближайшее расстояние от взрывных скважин до земной поверхности (среднее значение высотной отметки около +905 м) составляет 12-15 м для подэтажного штрека 874 м. Отбойка руды проводится вертикальными веерами. В качестве основного взрывчатого вещества используется гранулит АС-8. Основное взрывчатое вещество инициируется с помощью патрона-боевика из патронированного аммонита 6ЖВ. Удельный расход взрывчатого вещества при формировании отрезной щели 6-6,5 кг/м³, при отбойке руды 1,2-3,6 кг/м³. Применяется электроволновой способ взрывания с обратным инициированием: первичный импульс передается от электродетонатора ЭД-3-Н через детонирующий шнур ДШ-А к пучку волноводов СИНВ-Ш и далее в патрон-боевик. Длина колонки заряда взрывчатого вещества в скважине составляет 1,5...13,3 м (среднее значение 9 м).

Сведения о параметрах массовых взрывов в подземных условиях приведены в таблице 2.6. Выкопировка из проекта буровзрывных работ показана на рисунке 2.16.

Методика регистрации велосиграмм. Основные пункты методики:

1. Измерение скоростей смещения грунта вблизи эпицентра взрыва;
2. Синхронная регистрация велосиграмм по сейсмической трассе;
3. Измерение скоростей смещения вблизи контакта фундамент - грунт;
4. Измерение скоростей смещения в верхней и нижней частях здания;
5. Дублирование измерений в отдельных точках регистрации СВВ.

Таблица 2.6 - Сведения о параметрах массовых взрывов в подземных условиях для оценки их сейсмического воздействия [11]

Взрыв ¹⁾	Место	Дата	Общая масса ВВ, кг	Номер ступени замедления									
				Масса взрывчатого вещества (ВВ), кг / замедление, мс									
				0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I	Блок №4, гор.864м, 874м	16.06.10	2986	272 / 0	356 / 50	179 / 100	297 / 150	344 / 200	371 / 250	234 / 320	336 / 350	349 / 400	248 / 450
II	Блок №2, гор.862м	22.06.10	889	188 / 0	188 / 50	188 / 100	178 / 150	147 / 200	-	-	-	-	-
III	Блок №3, гор.850м	23.06.10	1454	129 / 0	88 / 50	9 / 100	243 / 150	213 / 200	228 / 250	160 / 300	147 / 350	57 / 400	180 / 450
IV	Блок №4, гор.874м	27.06.10	2147	360 / 0	254 / 50	291 / 100	279 / 150	227 / 200	201 / 250	232 / 300	303 / 350	-	-
V	Блок №3, гор.864м, 874м	30.06.10	1748	458 / 0	471 / 50	444 / 100	375 / 150	-	-	-	-	-	-
VI ²⁾	Блок №2, гор.862м	06.07.10	3922	601/ 0	559 / 50	467 / 100	518 / 150	560 / 200	411 / 250	342 / 300	464 / 350	-	-

Примечания:

¹⁾ Технологические взрывы II, III предназначались для формирования отрезной щели; технологические взрывы I, IV, V, VI – для отбойки руды;

²⁾ Экспериментальный взрыв.

Проведение измерений по пунктам 1-3 позволяет получить информацию о скоростях смещения в широком диапазоне приведенных расстояний, определить скорости распространения СВВ. Измерения по пункту 4 дают информацию о динамических характеристиках зданий. Выполнение последнего пункта методики необходимо для контроля надежности измерений параметров СВВ.

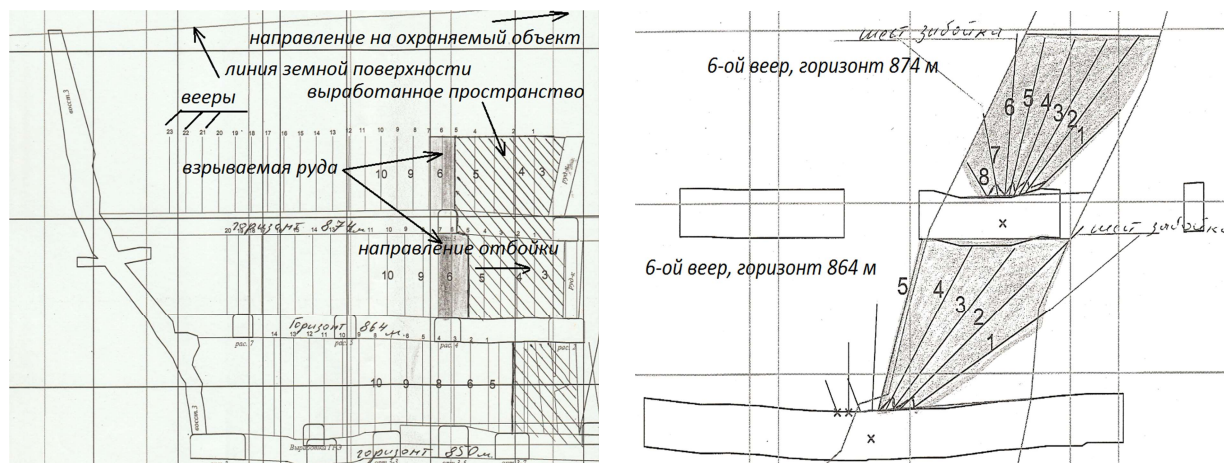


Рисунок 2.16 – Выкопировка из проекта буровзрывных работ

Для проведения измерений параметров СВВ использовались: сейсмическая станция «Minimax»; датчики СВ-30 и СВ-5; цифровой осциллограф TDS3034B; АЦП Е-330. Измерительная база (до 90 м) по п.2 методики обеспечивалась с помощью антивибрационных кабелей АВК-1. Контакт сейсмических датчиков с конструктивными элементами зданий обеспечивался с помощью алебастра или непосредственным заглублением в грунт.

Точка регистрации воздействия СВВ на надшахтные сооружения рудника располагалась на дне ниши воздухозаборника вентиляционной системы здания административно-бытового комплекса. Выбор местоположения точки регистрации обусловлен близостью контакта фундамента здания со скальным грунтом, а также примерно одинаковой удаленностью других сооружений рудника от массовых взрывов. Другие точки регистрации находились вдоль сейсмических трасс. Сведения о точках регистрации приведены в таблице 2.7, их изображения представлены на рисунках А2 – А8 приложения А, а также на ситуационном плане (рисунок А1). Пример расположения сейсмических датчиков СВ-5 по сейсмической трассе показан на рисунке А9 приложения А.

Таблица 2.7 - Сведения о точках регистрации СВВ

Описание	Рисунок
Дно ниши административно-бытового комплекса	А2
Чердак здания административно-бытового комплекса	А3
Скала возле восстающего №2 (блок №2 Главного рудного тела)	А4
Осадочные породы возле восстающего №2	А5
Осадочные породы вблизи восстающего №5 (блок №4)	А6
Плита дренажного колодца	А7
Фундамент опоры скипового ствола	А8

2.4.4 Результаты исследования сейсмического воздействия массовых взрывов в подземных условиях

Результаты исследования сейсмического воздействия массовых взрывов сведены в таблице 2.8. Примеры зарегистрированных волнограмм представлены на рисунках А10-А11 приложения А.

Из анализа таблицы 2.8 следует:

1. Вертикальная компонента скорости смещения является наиболее интенсивной, особенно, вблизи основания охраняемого объекта (точка 1). Поэтому достаточно ограничиться исследованием этой компоненты скорости смещения. Исключение составляет только одно измерение в середине сейсмической трассы;

2. Наибольшее расхождение между значениями параметров $v_{\text{пм}}$ и v_{Σ} наблюдается в точках 3, 5 (вблизи эпицентра) и 7 (фундамент опоры скипового ствола) до 35%, наименьшее – вблизи основания охраняемого объекта (<15%);

3. Сейсмическое воздействие массовых взрывов в подземных условиях не приводит к раскачке охраняемого объекта;

4. Наименьшее значение преобладающей частоты колебаний наблюдается при больших скоростях смещения, изменение преобладающей частоты колебаний с расстоянием от взрывов носит немонотонный характер;

5. Наблюдается соответствие между пиковыми значениями вертикальных компонент скоростей смещения, измеренных с помощью сейсмической станции и другими способами.

Таблица 2.8 - Результаты исследования сейсмического воздействия массовых взрывов в подземных условиях [11]

Взрыв ¹⁾	Сейсмическая станция ²⁾						Осциллограф			АЦП Е-330
	$v_{\text{пм}}$, см/с	v_{Σ} , см/с	$v_{\text{пр}}$, см/с; (f , Гц)	$v_{\text{пв}}$, см/с (f , Гц)	$v_{\text{пт}}$, см/с (f , Гц)	l_c , м; (номер точки ³⁾)	$v_{\text{пв}}$, см/с			$v_{\text{пв}}$, см/с
							1	2	3	
I	2,11	2,85	1,54 (21,8)	1,94 (32)	1,40 (30,1)	121 (3)	-			2,2 (121)
II	11,8	13,8	5,74 (21,1)	11,6 (23,5)	4,88 (20,5)	41 (4)	9,78 (44)	2,53 (86)	1,81 (111)	7,51 (41)
III	0,36	0,41	0,10 (20,0)	0,36 (25)	0,17 (29,3)	307 (1)	<0,1 ⁴⁾			0,35 (307)
IV	28,7	37,1	19,9 (13,3)	23,7 (12,9)	20,4 (13,5)	37 (5)	0,44 (223)	0,26 (278)	-	0,22 (312)
V	3,28	3,73	3,07 (28,4)	1,23 (16,9)	1,73 (14,4)	188 (6)	1,23 (188)	0,64 (220)	0,36 (262)	0,61 (296)
VI	0,67	0,85	0,41 (19,5)	0,52 (20,3)	0,53 (15,2)	267 (7)	2,11 (186)	1,30 (223)	0,52 (268)	0,7 (300)

Примечания:

¹⁾ порядковый номер совпадает с номером массового взрыва;

²⁾ пиковое значение модуля скорости смещения $v_{\text{пм}}$, максимальная векторная скорость v_{Σ} , пиковые значения компонент скорости смещения: радиальной $v_{\text{пр}}$, вертикальной $v_{\text{пв}}$, тангенциальной $v_{\text{пт}}$; f – преобладающая частота сейсмических колебаний; l_c – расстояние по сейсмическому лучу от горизонта, с которого велось бурение взрывных скважин, до точки регистрации;

³⁾ на рисунке А1 приняты обозначения точек регистрации: первая цифра – номер взрыва, вторая цифра – номер точки;

⁴⁾ не произошел запуск регистрации велосиграмм.

2.4.5 Определение коэффициента сейсмичности и показателя затухания сеймовзрывных волн при подземном взрывании с регистрацией на земной поверхности

В таблицу 2.9 сведены результаты применения регрессионного анализа совокупностей данных по $v_{\text{пм}}$, v_{Σ} и $v_{\text{пв}}$ для известных значений приведенных расстояний с целью определения коэффициента сейсмичности и показателя затухания по показаниям сейсмической станции «Minimax» (таблица 2.8). В качестве массы заряда принималась наибольшая масса заряда в ступенях замедления согласно таблице 2.6. На рисунке 2.17 представлены зависимости скоростей смещения от приведенного расстояния в соответствии с таблицей 2.9.

Таблица 2.9 - Результаты определения коэффициента сейсмичности и показателя затухания

$v_{\text{пм}}$		v_{Σ}		$v_{\text{пв}}$	
$K_{\text{пм}}$	$n_{\text{пм}}$	K_{Σ}	n_{Σ}	$K_{\text{пв}}$	$n_{\text{пв}}$
561	1,85	743	1,88	530	1,92

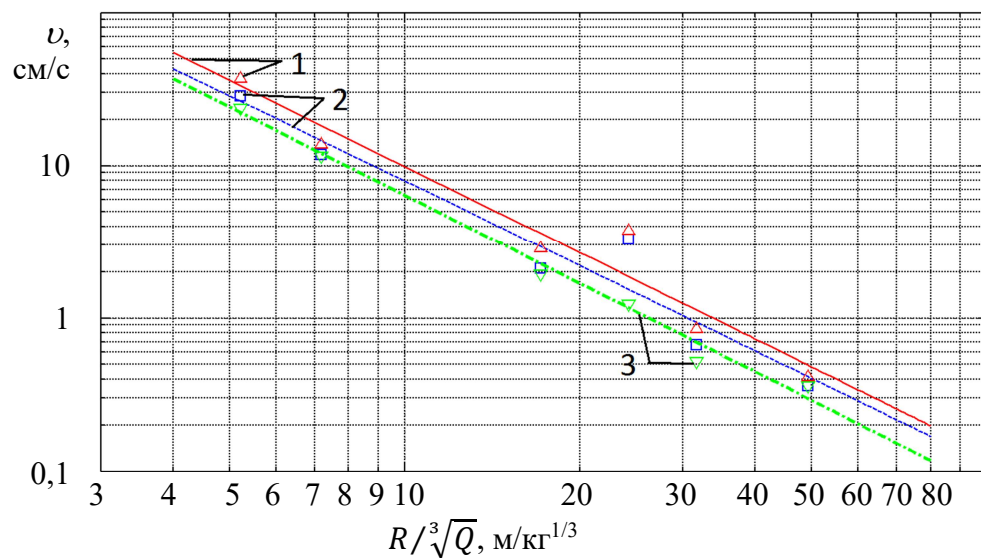


Рисунок 2.17 – Зависимости скоростей смещения от приведенного расстояния: 1 - v_{Σ} ; 2 - $v_{\text{пм}}$; 3 - $v_{\text{пв}}$. Прямые линии – аппроксимация; значки – эксперимент

Из анализа таблицы 2.9 следует, что в зависимости от способа определения смещения коэффициент затухания изменяется незначительно (линии регрессии практически параллельны), что позволяет достаточно легко осуществить переход от одного способа определения скорости смещения к другому путем умножения коэффициента сейсмичности на поправочный коэффициент (подробности в главе 3). Из анализа рисунка 2.17 вытекает, что экспериментальные точки пиковой вертикальной компоненты скорости смещения $v_{пв}$ гораздо лучше ложатся на линию регрессии.

Проведем оценку коэффициента сейсмичности по данным скоростей распространения СВВ. Из анализа велосиграмм вертикальной компоненты скорости смещения следует, что надежно может быть определена только скорость распространения продольной волны по началу вступления фронта волны. Анализировались велосиграммы, полученные в точках регистрации, которые характеризуются похожими условиями прохождения волн: точки, расположенные на грунте; точки, связанные с грунтом через бетонные кольца колодцев.

Для определения скорости брались две велосиграммы, зарегистрированные в точках с разными эпицентрными расстояниями (рисунок 2.18).

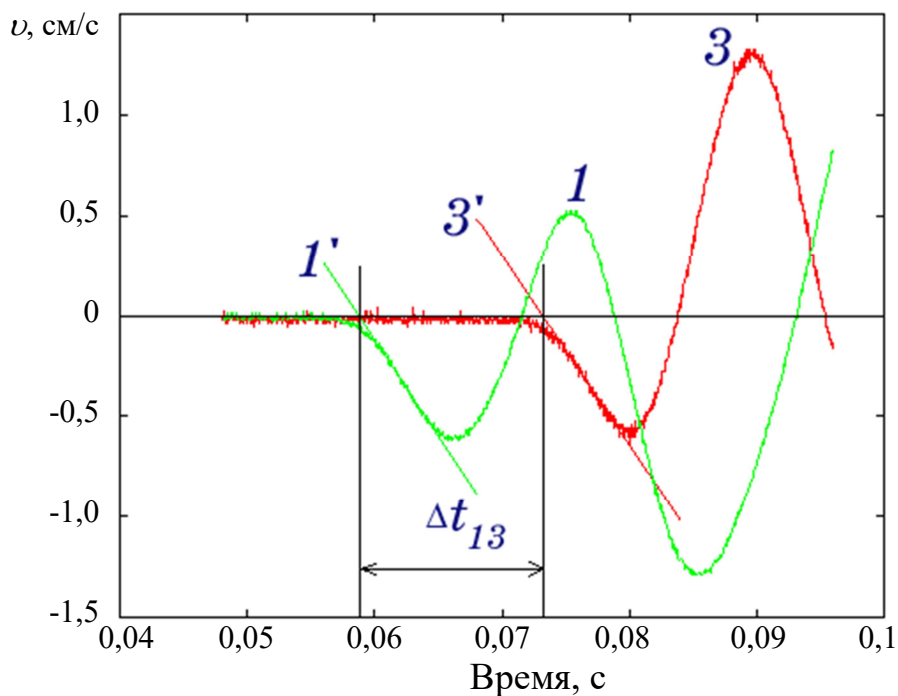


Рисунок 2.18 – Схема к определению времени задержки прихода продольной СВВ в 3-ю точку относительно 1-й точки (рисунок А9). 1' и 3' – аппроксимации вступлений СВВ [202]

Велосиграмма дальней точки приводилась по амплитуде к велосиграмме ближней точки [147]. Вступление фронта волны на велосиграмме аппроксимировалось прямыми по 50-100 точкам. По точкам пересечения прямых линий с осью времени определялась задержка распространения фронта волны. По эпицентральному расстояниям и расстояниям от массового взрыва до точек регистрации вычислялись кажущаяся и истинная скорости распространения продольной СВВ (таблица 2.10).

Таблица 2.10 - Результаты определения скоростей распространения сейсмических колебаний и оценки коэффициента сейсмичности

№ взрыва	$\Delta l_{пл}$, м	$\Delta l_{ист}$, м	$C_{рк}$, км/с	C_p , км/с	C_s , км/с	K
II	80	67	5,54	4,64	2,68	790
V	38,5	32	3,72	3,09	1,78	692
VI	38,5	37	4,32	4,15	2,39	764

Примечания: $\Delta l_{пл}$ - расстояние между точками в плане; $\Delta l_{ист}$ - разность расстояний от точек регистрации до фокуса взрыва; $C_{рк}$ - кажущаяся скорость распространения продольной СВВ; C_p - истинная скорость распространения продольной СВВ. C_s и K рассчитывались по формулам (2.9) и (2.5) соответственно с учетом физико-механических параметров вмещающих пород $\nu = 0,25$ и $\rho = 2,9 \cdot 10^3$ кг/м³.

Из таблицы 2.10 следует, что среднее значение скорости распространения продольных СВВ составляет 3,96 км/с, для которого $K = 750 \pm 80$ и $n = 0,23 \ln(8,8K) = 0,23 \ln(8,8 \cdot 750) = 2,02$. Значения K и n находятся в хорошем согласии со значениями аналогичных параметров, приведенных в таблице 2.9.

Проведем оценку коэффициента сейсмичности, используя формулу (2.12), по скоростям смещения и приведенному расстоянию для условий измерения сейсмической станцией «Minimax» (таблица 2.11).

Таблица 2.11 - Результаты оценки коэффициента сейсмичности по классификационному критерию уровня сейсмического воздействия подземного взрыва

Взрыв	I	II	III	IV	V	VI
$R/\sqrt[3]{Q}$, м/кг ^{1/3}	17,1	7,2	49,3	5,2	24,2	31,7
$K_{v\Sigma}$	1225	735	$27,2 \cdot 10^3$	$1,28 \cdot 10^3$	$54 \cdot 10^3$	$2,08 \cdot 10^3$
$K_{v_{пм}}$	515	552	$7,75 \cdot 10^3$	848	$33,4 \cdot 10^3$	650
$K_{v_{пв}}$	404	534	$7,75 \cdot 10^3$	623	848	189

Примечание: нижний индекс в обозначении коэффициента сейсмичности соответствует условию определения скорости смещения (таблица 2.9, рисунок 2.17).

Как следует из табл. 2.11, значения коэффициента сейсмичности $K_{v_{пм}}$ находятся в хорошем согласии со значениями $K_{п} = 561$ за исключением значения $K_{v_{пм}}$ для 3-го взрыва (приведенное расстояние не удовлетворяет условию (2.13)) и значения $K_{v_{пм}}$ для 5-го взрыва.

2.5 Выводы по Главе 2

1. Разработана теоретическая модель совместного определения коэффициента сейсмичности и показателя затухания по огибающей модуля скорости смещения от массового взрыва и определены условия ее применения.

2. Показано, что при регистрации сейсмозрывных волн в тоннеле от массового взрыва в карьере оценка коэффициента сейсмичности для показателя затухания $n = 1,5$ сильно занижена, а из оценки коэффициента сейсмичности по скоростям распространения СВВ следуют удовлетворительные значения показателя затухания.

3. При апробации теоретической модели совместного определения коэффициента сейсмичности и показателя затухания по огибающей модуля скорости смещения от массового взрыва, проведенного на карьере «Коршуновский», получена в явном виде функциональная связь между

показателем затухания и коэффициентом сейсмичности, которая сильно коррелирует с аналогичными параметрами из литературных источников.

4. Получено выражение, позволяющее прогнозировать пиковое значение модуля скорости смещения грунта как функцию от приведенного расстояния для интервала коэффициента сейсмичности 100-800.

5. Разработан способ определения коэффициента сейсмичности по данным о скоростях распространения продольных и поверхностных СВВ от взрыва одиночного заряда взрывчатого вещества.

6. Получено выражение для оценки коэффициента сейсмичности по известным пиковым значениям модуля скорости смещения грунта для приведенных расстояний меньше $30 \text{ м/кг}^{1/3}$.

7. Показано, что аппроксимации зависимостей максимальной векторной скорости смещения, пикового значения модуля скорости смещения и пиковой вертикальной компоненты скорости смещения при подземном взрывании с регистрацией на земной поверхности в пределах погрешности имеют одинаковый показатель затухания.

8. Разработан способ определения скорости распространения продольных волн от массовых взрывов по линейным аппроксимациям вступлений волн для оценки коэффициента сейсмичности.

Основные материалы главы 2 опубликованы в работах [11, 12, 14, 114, 147, 149, 151, 175, 201, 202].

ГЛАВА 3 НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ КЛАССИФИКАЦИИ ВЗРЫВОВ ПО УРОВНЮ ИХ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

3.1 Общие принципы классификации промышленных взрывов как сейсмических источников

В главе 1 (таблица 1.4) приведены данные по коэффициенту сейсмичности и показателю затухания, в главе 2 получено выражение функциональной связи между этими параметрами (2.6). Используя данные из табл. 1.4 и выражение (2.6), дадим графическую интерпретацию параметров линейных регрессий в системе координат: логарифм коэффициента сейсмичности – показатель затухания для скорости смещения, выраженной в см/с (рисунок 3.1). Из качественного анализа рисунка 3.1 вытекают следующие выводы:

1. Показатель затухания лежит в диапазоне 0,71-3,87 при изменении коэффициента сейсмичности – $6,83-1,4 \cdot 10^6$ с четко выраженной тенденцией возрастания n при увеличении K ;

2. Выделяются следующие характерные участки:

I. $6 < K < 3 \cdot 10^3$ – ограничивает область компактного распределения показателя затухания для подавляющего большинства взрывов;

II. $10^4 < K < 10^5$ – аномальное проявление сейсмического воздействия массовых взрывов;

III. $K > 10^5$ – мощнейшее сейсмическое воздействие подземных химических и ядерных взрывов.

Для последующего статистического анализа исключим точки, относящиеся ко II-у и III-у участкам (5 точек). Преобразуем формулу (2.6) к виду (3.1):

$$n = 0,23 \ln(K) + 0,5. \quad (3.1)$$

Первое слагаемое в (3.1) указывает на явную зависимость показателя затухания от коэффициента сейсмичности, второе слагаемое является постоянной величиной. Выясним физический смысл второго слагаемого. Для этого преобразуем выражение (2.7) с учетом (3.1) к виду (3.2):

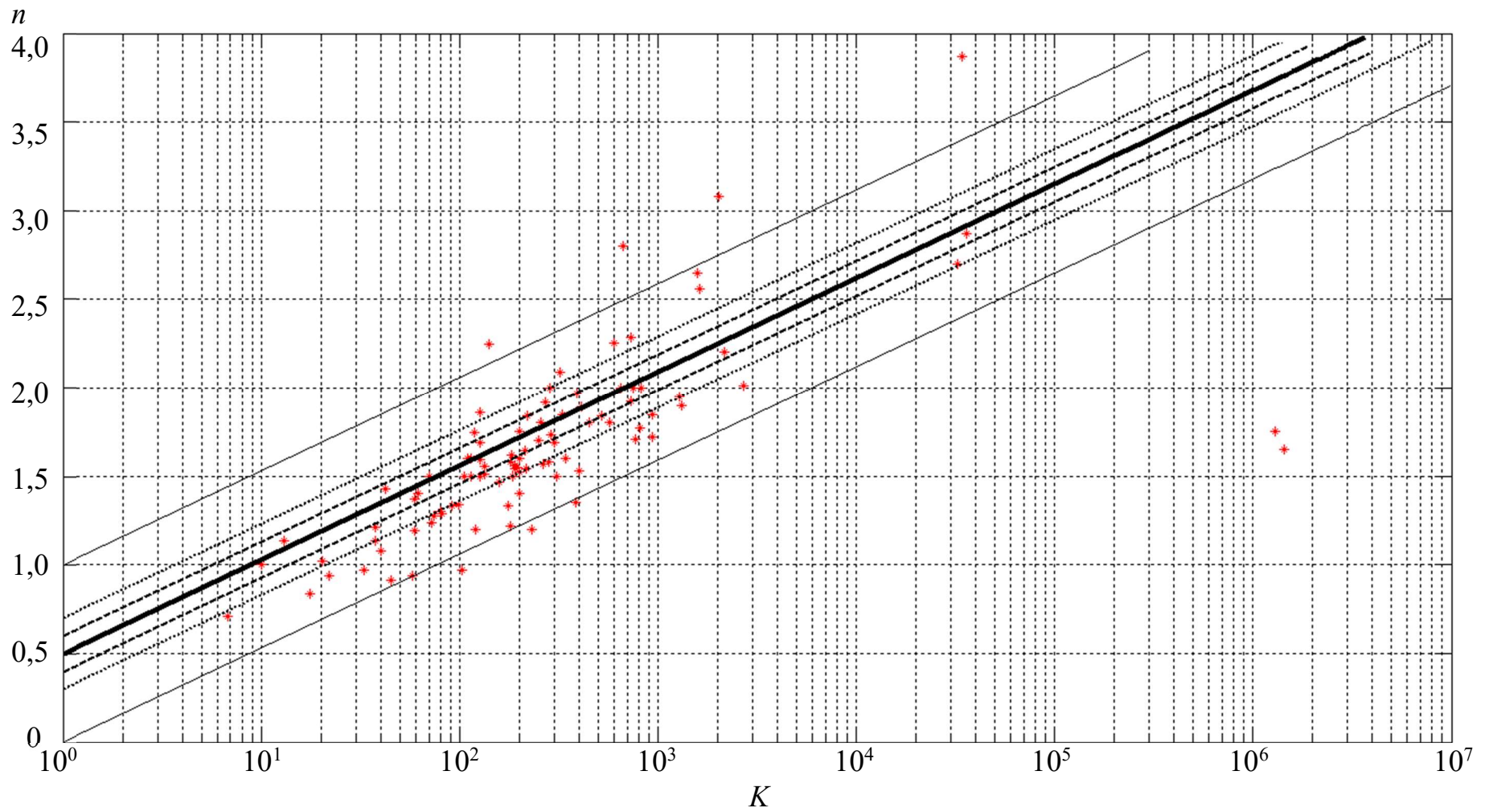


Рисунок 3.1 – Зависимости показателя затухания СВВ от коэффициента сейсмичности: сплошная толстая линия согласно зависимости (2.6); «*» - экспериментальные данные согласно таблице 1.4; штриховые линии - $\Delta n_{0,1} = 0,23\ln(8,8K) \pm 0,1$; пунктирные линии - $\Delta n_{0,2} = 0,23\ln(8,8K) \pm 0,2$; сплошные тонкие линии - $\Delta n_{0,5} = 0,23\ln(8,8K) \pm 0,5$

$$v = K \left(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}} \right)^{-0,23 \ln(K)} \cdot Q^{\frac{1}{6}} \cdot \frac{1}{\sqrt{R}}. \quad (3.2)$$

Из (3.2) следует, что $v \sim \frac{1}{\sqrt{R}}$, т.е. второе слагаемое в (3.1) указывает на тип источника. Известно, что существуют три основные геометрические формы источников излучения: сферический, цилиндрический и плоский. Для сферического источника характеристикой 3-х размеров служит радиус сферы; для цилиндрического источника его высота много больше 2-х других размеров – радиуса основания цилиндра; для плоского источника его толщина много меньше двух других размеров. С учетом только геометрии этих источников известны законы изменения амплитуд излучения A с расстоянием R : $A \sim \frac{1}{R}$ – сферический источник, $A \sim \frac{1}{\sqrt{R}}$ – цилиндрический источник, $A = const$ – плоский источник. Таким образом, множитель $\frac{1}{\sqrt{R}}$ в формуле (3.2) указывает на промежуточный тип источника – цилиндрический, несмотря на то, что приведенное расстояние в (3.2) характеризует сферический заряд.

Если связать множитель $\frac{1}{\sqrt{R}}$ в (3.2) с геометрией зарядов взрывчатого вещества относительно точки наблюдения сейсмического сигнала, то второе слагаемое в (3.1) не может быть отрицательным, так как это противоречило бы закону сохранения энергии. В пределах погрешности на рисунке 3.1 нет экспериментальных точек (с учетом исключенных точек), лежащих ниже прямой $n = 0,23 \ln(K)$. В то же время есть точки, лежащие заметно выше прямой $n = 0,23 \ln(K) + 1,0$. Это не противоречит физическому смыслу, так как сферический источник является частным случаем эллиптического источника, главные оси которого формируют диаграмму направленности излучения. Этим объясняется возможность существования больших значений коэффициента сейсмичности и показателя затухания и, в частности, «фокусирующего действия» взрыва [27].

Выясним классификационный признак прямой линии, описываемой уравнением (3.1). Воспользуемся графиком зависимости массовой скорости от

приведенного расстояния [4, 158], представленным на рисунке 3.2. Аппроксимация массовой скорости в см/с согласно (2.7) имеет вид (3.3):

$$u_M = 572(R/\sqrt[3]{Q})^{-0,23\ln(572)-0,5}. \quad (3.3)$$

График зависимости (3.3) удовлетворительно ложится на экспериментальные данные. Из анализа графика вытекает физический смысл коэффициента сейсмичности, численно равного массовой скорости среды при единичном приведенном расстоянии (5,72 м/с или 572 см/с).

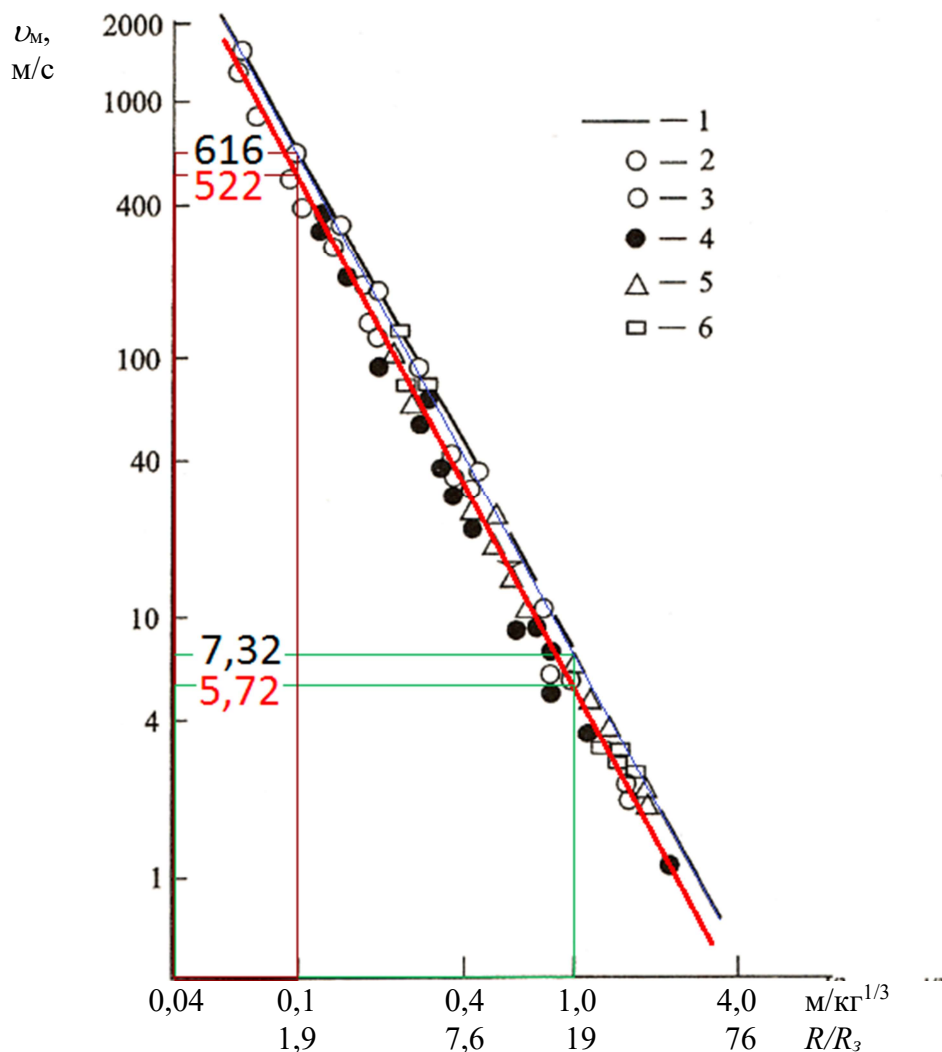


Рисунок 3.2 – Зависимость массовой скорости от приведенного расстояния (отношения расстояния к радиусу заряда) согласно [4, 158]:

сплошная линия - аппроксимация массовой скорости. 1-4 – связанный взрыв (плотность взрывчатого вещества, кг/м³: 1500, 1000, 500, 400 соответственно);

5-6 – взрыв плотностью 1500 кг/м³ в полостях $\epsilon = 1,5$ и 2 (плотность заряжения, кг/м³: 440 и 190)

Согласно [6] при проведении экспериментов использовались сферические прессованные и насыпные заряды ТЭНа (пентаэритриттетранитрата) массой от 0,17 до 2,6 граммов с различным заполнением взрывной камеры. Взрывы производились в материалах из плексигласа, тиосульфата натрия, канифоли. При регистрации сейсмограмм отсутствовали признаки необратимого разрушения материала. Взрыв ТЭНа дает «идеальный» сейсмический сигнал, так как фронт нарастания сейсмического сигнала носит воспроизводимый характер. Взрываема среда является совершенной средой по сравнению с горными породами. Таким образом, классификационный признак прямой линии, описываемой уравнением (3.1), соответствует источникам нормального сейсмического воздействия.

Другим доказательством этого положения служит экспериментальная точка, полученная по данным [187]. В эксперименте использовалось патронированное взрывчатое вещества. Масса одновременно взрываемого заряда взрывчатого вещества находилась в интервале 1-3,5 кг. Производилось по скважинное взрывание с замедлением 300 мс. Сейсмическое воздействие взрыва не зависело от направления на взрыв. Поэтому, этот эксперимент представляет экстраполяцию рассмотренного выше лабораторного эксперимента на проведенный эксперимент в полигонных условиях.

Дополнительное подтверждение отмеченного положения вытекает из результатов сейсмического районирования рудника «Железный» АО «Ковдорский ГОК» [9]. В этой статье совокупность параметров $K = 50,26$ (для скорости смещения, выраженной в см/с) и $n = 1,421$ отражает «в основном крепкие, близкие к монолитным породы с категорией по трещиноватости V/IV». Подстановка значения $K = 50,26$ в формулу (3.1) дает значение для коэффициента затухания СВВ, равное 1,401.

Точки, лежащие ниже прямой (3.1), соответствуют источникам повышенного сейсмического воздействия. Наглядным доказательством этого служит точка, относящаяся к подземному ядерному взрыву на рисунке 3.1. Точки, лежащие выше этой прямой, соответствуют источникам пониженного

сейсмического воздействия, а промежуточная область - источникам нормального сейсмического воздействия. Сейсмический источник характеризуется с точки зрения наблюдателя, удаленного от очага сейсмического возмущения. Поэтому, корректно говорить о «кажущемся» источнике сейсмического воздействия.

3.2 Количественные критерии классификации сейсмических источников

Уравнение, связывающие показатель затухания с коэффициентом сейсмичности, представим в виде (3.4):

$$n = a + b \cdot \ln(K), \quad (3.4)$$

где a, b – параметры.

Для статистической выборки объема $N - (n_i, K_i)$, $1 \leq i \leq N$ существуют оценки этих параметров: \hat{a} и \hat{b} . Такой оценкой показателя затухания будет уравнение линейной регрессии (3.5):

$$\hat{n} = \hat{a} + \hat{b} \ln K. \quad (3.5)$$

Согласно [118] доверительный интервал для \hat{a} определяется в виде (3.6.1):

$$\hat{a} \pm t_{P, N-2} \cdot m_{\hat{a}} = \hat{a} \pm \frac{t_{P, N-2}}{\sqrt{N-2}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{n}_i - n_i)^2 \cdot \sum_{i=1}^N (\ln K_i)^2}{N \sum_{i=1}^N (\ln K_i - \overline{\ln K})^2}}, \quad (3.6.1)$$

доверительный интервал для \hat{b} – в виде (3.6.2):

$$\hat{b} \pm t_{P, N-2} \cdot m_{\hat{b}} = \hat{b} \pm \frac{t_{P, N-2}}{\sqrt{N-2}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{n}_i - n_i)^2}{\sum_{i=1}^N (\ln K_i - \overline{\ln K})^2}}, \quad (3.6.2)$$

где $t_{P, N-2}$ – коэффициент Стьюдента для доверительной вероятности (надежности) P с $N - 2$ степенями свободы;

$\overline{\ln K} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln K_i$ – среднее арифметическое значение логарифмов коэффициентов сейсмичности;

$m_{\hat{a}}, m_{\hat{b}}$ – случайные ошибки оценочных параметров.

Интервальные (доверительные) границы уравнения линейной регрессии для заданного значения коэффициента сейсмичности K_0 имеют вид (3.7):

$$\hat{n}(K_0) \pm t_{P,N-2} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{n}_i - n_i)^2}{N-2}} \sqrt{C + \frac{1}{N} + \frac{(\ln K_0 - \overline{\ln K})^2}{\sum_{i=1}^N (\ln K_i - \overline{\ln K})^2}}, \quad (3.7)$$

где $C = 0$ соответствует доверительным границам $\overline{\ln K}$;

$C = 1$ – доверительным границам индивидуального значения выборки.

Известно, что для вычисления сейсмобезопасной массы взрывчатого вещества используется индивидуальное значение скорости смещения, получаемое по верхней границе доверительного интервала при надежности 95% и объеме выборки $N > 30$ согласно выражению (3.8):

$$v_{\text{инд},i} = \exp \left[\ln(\hat{v}_i) + t_{P,N-2} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [\ln(\hat{v}_i) - l(v_i)]^2}{N-2}} \right], \quad (3.8)$$

где \hat{v}_i – оценочное значение скорости, входящее в уравнение регрессии;

v_i – измеренное значение скорости.

Описанный выше подход применим в нашем случае, если добавить нижнюю границу доверительного интервала для индивидуального значения показателя затухания сейсмических волн, а также построить границы доверительного интервала для $\overline{\ln K}$ ($C = 0$). Для каждой статистической выборки будут свои границы доверительных интервалов. Поэтому необходимо сформулировать правило построения статистической выборки из имеющейся совокупности экспериментальных данных, чтобы исключить данные - выбросы, существенно искажающие конечный результат.

В качестве правила построения статистической выборки выберем следующее [205]. Для данного K значение n для заданного Δn попадает в интервал, определяемый неравенствами (3.9):

$$0,23 \ln(K) + 0,5 - \Delta n \leq n \leq 0,23 \ln(K) + 0,5 + \Delta n. \quad (3.9)$$

Если выбрать $\Delta n = 0,01$ и увеличивать Δn последовательно на 0,01, то получим ряд статистических выборок. Для каждой выборки вычислим оценки \hat{a} и \hat{b} , установим их доверительные интервалы и коэффициент корреляции r (таблица 3.1).

Таблица 3.1 - Результаты статистической обработки выборок согласно условию (3.8) [205]

Условие (объем выборки, число точек)	Доверительный интервал при доверительной вероятности 95%		r^2
	\hat{a}	\hat{b}	
$\Delta n = 0,10; (29)$	$0,52 \pm 0,05$	$0,222 \pm 0,018$	0,96
$\Delta n = 0,26; (66)$	$0,38 \pm 0,15$	$0,24 \pm 0,03$	0,82
$\Delta n = 0,27; (68)$	$0,34 \pm 0,15$	$0,25 \pm 0,03$	0,82
$\Delta n = 0,36; (81)$	$0,31 \pm 0,16$	$0,25 \pm 0,03$	0,78
$\Delta n = 0,41; (82)$	$0,30 \pm 0,16$	$0,25 \pm 0,03$	0,78

Из анализа таблицы 3.1 вытекают следующие положения:

1. Оценка углового параметра $b = 0,23$ в уравнении (3.1) попадает в доверительный интервал для всех условий или 89% пар по K и n из общей совокупности экспериментальных данных (далее – ОСЭД);

2. Оценка свободного параметра $a = 0,5$ в уравнении (3.1) при условии $\Delta n = 0,26$ попадает в доверительный интервал для 72% пар по K и n из ОСЭД;

3. Статистически значимые и наиболее близкие оценки к значениям углового и свободного параметров уравнения (3.1) соответствует условию $\Delta n = 0,10$, (32% пар по K и n из ОСЭД);

4. При $\Delta n = 0,36$ резко замедляется рост объема статистических выборок;

5. В рамках статистической ошибки верхние границы доверительных интервалов для условий $\Delta n = 0,10$ и $\Delta n = 0,26$ будем считать совпадающими;

6. При условии $\Delta n = 0,36$ для $\overline{\ln K}$ ($K = 186$) оценка \hat{n} на величину 0,1 будет меньше аналогичного значения, вычисленного по формуле (3.1).

С учетом положений 1-3, 5-6 для источников нормального сейсмического воздействия разумно положить границы изменения свободного параметра в уравнении (3.1), соответствующие условию $\Delta n = 0,26$ с оценкой \hat{a} , увеличенной

на 0,1. Тогда классификационная граница между источниками повышенного и нормального сейсмического воздействия будет удовлетворять формуле (3.10.1):

$$n_H = 0,23 \ln K + 0,33; \quad (3.10.1)$$

между источниками пониженного и нормального сейсмического воздействия – формуле (3.10.2):

$$n_B = 0,23 \ln K + 0,63. \quad (3.10.2)$$

Формулы (3.10.1-2) являются ориентировочными и требуют дополнительного обоснования и, возможно, корректировки по результатам их применения для конкретных горно-технологических условий.

Оценим значимость уравнения парной регрессии и ее параметров согласно F – критерию (Фишера). Фактическое значение критерия равно:

$$F_{\text{факт}} = \frac{r^2}{1-r^2} (N - 2) = \frac{0,78}{1-0,78} (81 - 2) \approx 280.$$

Табличное значение критерия Фишера при уровне значимости $\alpha = 0,05$: $F_{\text{табл}} = 3,96$. $F_{\text{факт}} \gg F_{\text{табл}}$. Следовательно, гипотеза об отсутствии линейной связи между показателем затухания и логарифмом коэффициента сейсмичности отвергается.

Оценим значимость параметров \hat{a} , \hat{b} и r с помощью t – статистики (Стьюдента). Фактические t – статистики параметров будут:

$$t_a = \frac{\hat{a}}{m_{\hat{a}}} = \frac{0,31}{0,08} = 3,9; \quad t_b = \frac{\hat{b}}{m_{\hat{b}}} = \frac{0,25}{0,015} = 16,7;$$

$$t_r = r / \sqrt{\frac{1-r^2}{N-2}} = 0,883 / \sqrt{\frac{1-0,78}{81-2}} = 16,7;$$

Табличное значение коэффициента Стьюдента при уровне значимости $\alpha = 0,05$: $t_{\text{табл}} = 2$. Откуда $t_a, t_b, t_r > t_{\text{табл}}$. Поэтому рассматриваемые параметры не случайно отличаются от нуля и являются статистически значимыми.

3.3 Характерные особенности промышленных взрывов как источников сейсмического воздействия различных типов

Рассмотрим следствия, вытекающие из классификации источников сейсмического воздействия [205]. С точки зрения обеспечения безопасности

особое внимание должно быть уделено предпосылкам повышенного сейсмического воздействия массовых взрывов. В качестве характеристики реального сейсмического источника выберем величину, равную разности показателя затухания реального источника n_p и показателя затухания n_n , вычисленного для коэффициента сейсмичности реального источника K_p по формуле (3.10.1), и определяемую по формуле (3.11):

$$\Delta n = n_p - n_n \text{ или } \Delta n = n_p - 0,23 \ln K_p - 0,33. \quad (3.11)$$

3.3.1 Сейсмические источники повышенного воздействия

Согласно выражению (3.11) величина Δn отрицательна.

3.3.1.1 Обводненные грунты

По данным сейсмического мониторинга массовых взрывов при разработке открытым способом месторождения «Олений Ручей» (Кольский полуостров, ЗАО «СЗФК») [58] установлено, что величина скорости смещения грунта вблизи фундаментов зданий и сооружений, которые залегают на рыхлых обводненных отложениях мощностью не менее 20 м, примерно в 1,5...2 раза больше аналогичной величины, полученной на скальном основании. $\Delta n = -0,03$.

Исследование обводненных и сухих блоков, а также талых и мерзлых блоков многолетнемерзлых горных пород, проведенное на Нерюнгринском месторождении угля, приводит к выводам [45]: для малых удельных зарядов различной скорости смещения почти не наблюдается; для больших – наличие воды в жидком состоянии во взрываемых блоках приводит к увеличению скорости смещения порядка 20% по сравнению со взрыванием сухих или мерзлых блоков.

Железорудный карьер Gol-E-Gohar (GEG) [231]. Месторождение расположено в южной части Ирана на высоте 1750 м на северо-восточной окраине тектоно-метоморфического пояса Санандадж-Сирджан и характеризуется заметной изменчивостью физико-механических свойств горных пород и обводненностью. $\Delta n = -0,05$.

Приведем другой пример. Доломитовый карьер «Гралево» расположен в п. Руба, Витебской обл. Беларуси недалеко от реки Западная Двина [10]. Месторождение обводнено, взрывание на водную пригрузку. $\Delta n = -0,23$.

3.3.1.2 Весьма крепкие горные породы

Железорудный карьер Лебединского ГОКа [3, 6, 39]. Руда представлена железистыми кварцитами с пределом прочности при одноосном сжатии, достигающим 100-140 МПа. Вокруг карьера развилась весьма протяженная депрессионная воронка. Поэтому обводненность грунтов вблизи карьерного поля не может служить причиной повышенного сейсмического воздействия массовых взрывов. $\Delta n = -0,2$ [6]; $\Delta n = -0,14$ при взрывании малых групп скважин [3]. Для карьеров Курской магнитной аномалии $\Delta n = -0,05$ [39].

Карьер строительных материалов «Акел» (Akyol), Турция [223]. Ближайшее сельское поселение «Muratbey» расположено на расстоянии 200 м от границ карьера. Месторождение представлено рифогенными известняками Эоценового возраста. Предел прочности при одноосном сжатии образцов достигает 92 МПа. Параметры буровзрывных работ: диаметр взрывных скважин – 89 мм, сетка скважин $2,5 \times 2,5$ м², отбойка горной массы вертикальными уступами высотой 8-10 м, основное взрывчатое вещество – ANFO, неэлектрическая система инициирования. $\Delta n = -0,05$.

Однозначная связь между пиковой скоростью смещения и прочностью горных пород представлена в статье [208] в виде:

$$PPV = \frac{f_c^{0,642} \left(\frac{R}{\sqrt{Q}} \right)^{-1,463}}{\gamma} \text{ (м/с)}, r^2 = 0,783,$$

где f_c – предел прочности горной породы при одноосном сжатии, МПа;

$\left(\frac{R}{\sqrt{Q}} \right)$ – приведенное расстояние, м/кг^{1/2};

γ – объемный вес горной породы, кН/м³.

Выражение получено путем обработки результатов 1089 взрывов, полученных различными авторами для разнообразных горных пород.

3.3.1.3 Крупномасштабные массовые взрывы

Основной критерий – диаметр взрывных скважин более 200 мм.

Массовый взрыв на угольном разрезе «Junggar», Китай [221]. Общая масса взрывчатого вещества 900-1500 т распределялась по взрывным скважинам диаметром 310 мм, глубиной 40-50 м и вместимостью 1,8-2,7 т. Геологический разрез представлен корой выветривания мощностью 10...20 м, песчаником – 60 м и пластом угля – 30 м. $\Delta n = -0,05$.

Угольные разрезы Индии. Угольный разрез, Синграул [234]. Месторождение представлено 11-ю добычными блоками. Вскрыша содержит средне и крупнозернистые песчаники и углистые сланцевые песчаники. Взрывные скважины имели диаметр 311 мм. $\Delta n = -0,04$.

Угольные разрезы компаний «Northern Coalfields Limited», Singurali, М Р, [234]. Основные параметры буровзрывных работ: расстояние между скважинами – 4-12,5 м, линия наименьшего сопротивления – 3-10,5 м, диаметры скважин – 150-310 мм. $\Delta n = -0,43$ (для скважин диаметром более 250 мм при низком значении коэффициента детерминации $r^2 = 0,29$).

Угольные разрезы России: «Талдинский», ОАО «УК» «Кузбассразрезуголь» [95] – $\Delta n = -0,03$; «Купринский» [94] – $\Delta n = -0,03$.

Упомянутый железорудный карьер GEG [231]. Диаметр скважин – 203 мм, высота уступа 15 м, $\Delta n = -0,05$. Железорудные карьеры КМА. Диаметр скважин 250 мм, масса одновременно взрываемых зарядов взрывчатого вещества 7-10 т [39].

Серчешменский медный рудник, Иран [181]. Добыча ведется открытым способом. Диаметр и глубина скважин 200 мм и 15 м соответственно. Масса одновременно взрываемых зарядов взрывчатого вещества (ANFO) 1,3-11 т. $\Delta n = -0,08$.

Открытые горные работы по взрывному дроблению песчаника [230]. Диаметр взрывных скважин 100-300 мм. $\Delta n = -0,05$.

Рассмотрим следующее выражение для пиковой скорости смещения [187]:

$$PPV = K' \left[\frac{R^2}{(Q \cdot t_{\text{дет}})^{1/2}} \right]^{-n'}$$

где R – расстояние от взрыва до точки наблюдения;

$t_{\text{дет}} = l/v_{\text{дет}}$ – время детонации взрывчатого вещества в скважинном заряде с колонкой заряда взрывчатого вещества длиной l и скоростью детонацией взрывчатого вещества $v_{\text{дет}}$;

K' и n' - эмпирические коэффициенты, аналогичные коэффициенту сейсмичности и показателю затухания соответственно ($K' > 0$ и $n' > 0$).

Выразим массу заряда Q через его плотность заряжения $\rho_{\text{ВВ}}$ и диаметр скважин $d_{\text{СКВ}}$. После преобразований получим:

$$PPV = K' \left[\frac{ld_{\text{СКВ}}}{2R^2} \left(\frac{\pi\rho_{\text{ВВ}}}{v_{\text{дет}}} \right)^{1/2} \right]^{n'}$$

Из полученного выражения следует, что с увеличением диаметра взрывных скважин растет величина скорости смещения грунта, т.е. повышается сейсмическое воздействие взрыва. Аналогичный вывод вытекает из статьи [124].

3.3.1.4 Масса одновременно взрывааемых зарядов взрывчатых веществ

С переходом на поскважинное взрывание зарядов взрывчатого вещества возникает проблема выбора массы одновременно взрывааемых зарядов взрывчатого вещества для вычисления приведенного расстояния. Казалось бы, наиболее простое решение заключается в том, чтобы в качестве этой массы принять массу заряда в скважине. Правила безопасности [127] регламентируют массу одновременно взрывааемых зарядов взрывчатого вещества в пределах 20 мс интервала времени взрывания (окно взрывания). В зарубежных стандартах интервал времени взрывания составляет 8 мс.

Детально эта проблема рассмотрена в [81] на примере анализа проекта массового взрыва на угольном разрезе «Бунгурский-Северный» с применением неэлектрической системы инициирования «ИСКРА» в части расчета сейсмобезопасных расстояний. Отмечена типичная ошибка расчета, которая заключается в том, что количество неодновременно взрывааемых зарядов

принимается равным количеству скважин. При этом может оказаться, что окно взрывания будет менее 20 мс. Согласно правилам безопасности [127] такие скважинные заряды взрывчатого вещества должны рассматриваться как группа одновременно взрываемых зарядов взрывчатого вещества. Следствием этого будет занижение сейсмотехнических расстояний на 30-40%.

В статье [53] приведены параметры уравнения линейной регрессии для максимальной векторной скорости при ведении взрывных работ на карьере «Саркаевский» Пермской области: $K = 166$, $n = 1,52$ – в расчете на суммарную массу взрывчатого вещества; $K = 176$, $n = 1,33$ – для массы взрывающегося взрывчатого вещества в пределах окна 20 мс. В первом случае $\Delta n = 0,02$ (источник нормального сейсмического воздействия), во втором – $\Delta n = -0,19$ (источник повышенного сейсмического воздействия).

В статье [93] приведена связь между шириной окна взрывания и параметрами уравнений линейной регрессии (таблица 3.2). В таблицу 3.2 добавлена строка значений Δn , вычисленных по формуле (3.11).

Таблица 3.2 - Сравнительный анализ параметров уравнений линейной регрессии для скорости смещения в см/с [93]

Приведенное расстояние	Условие выбора массы одновременно взрывающихся зарядов взрывчатого вещества					
	20 мс окно		8 мс окно		Максимальный заряд в скважине	
	K	n	K	n	K	n
$R/\sqrt[3]{Q}$, м/кг ^{1/3}	1280	1,95	2517	2,01	6924	2,04
R/\sqrt{Q} , м/кг ^{1/2}	36	1,73	85	1,84	377	1,91
Δn	-0,03		-0,12		-0,32	

Из анализа таблицы 3.2 следует вывод: с уменьшением ширины окна взрывания «повышается» сейсмическое воздействие взрыва.

Неоднозначность выбора массы приводит к идее использовать для оценки параметров линейной регрессии полную массу взрывчатого вещества, четко прописываемую в проекте на массовый взрыв. Таким путем пошли авторы [89, 134], которые предложили единую функцию аппроксимации, позволяющую произвести переход от максимальной массы заряда взрывчатого вещества на одну ступень замедления $Q_{\Sigma(max)}$ к массе взрывчатого вещества, взрываемого при производстве массового взрыва, Q_{Σ} с учетом количества ступеней замедления N :

$$\Pi = A \left[\sqrt[3]{\frac{Q_{\Sigma(max)}}{R}} \right]^{\alpha} = A \left[\sqrt[3]{\frac{Q_{\Sigma}}{N(1-0,125 \ln N)}/R} \right]^{\alpha},$$

где Π – оцениваемый параметр (смещение, скорость смещения, ускорение смещения грунта),

A и α – параметры аппроксимации.

Среди зарубежных исследований следует отметить работу [225], в которой приведены результаты массовых взрывов в Словакии при проходке тоннеля и отбойке известняка на карьере. Отмечено, что наибольшее сейсмическое воздействие массового взрыва соответствует длительности взрыва менее 200 мс.

3.3.1.5 Способ инициирования заряда взрывчатого вещества

Суть проблемы заключается в технологическом разбросе времен срабатывания детонаторов некоторых систем неэлектрического инициирования в результате чего возможно не предусмотренное проектом буровзрывных работ одномоментное взрывание одного или нескольких зарядов взрывчатого вещества [27, 43, 160, 162, 164]. На практике это приводит к повышенному сейсмическому воздействию взрыва. Различные методы, позволяющие уменьшить этот эффект, предложены в [107, 162, 164]. В статье [107] рассмотрена задача планирования интервалов замедления во взрывной сети на основе системы инициирования неэлектрического взрывания.

В настоящее время внедряются системы инициирования, основанные на электронных детонаторах [16, 94] (открытые горные работы), [73] (подземное

строительство). Электронные детонаторы характеризуются точностью установки времени срабатывания в 1 мс, т.е. по этому параметру превосходят широко используемые средства инициирования. В статье [16] представлен сравнительный анализ применения неэлектрических и электронных систем инициирования «DAVEYTRONIC» для условий горнодобывающих предприятий Кузбасса. Авторы статьи отмечают снижение сейсмического эффекта в последнем случае ($\Delta n = -0,14$ против $\Delta n = -0,30$ для неэлектрических систем).

Связь между способом инициирования и параметрами линейной регрессии носит опосредованный характер. При использовании электронных систем гарантируется точность взрывания зарядов взрывчатого вещества. Однако, при переходе от электрического инициирования к системе электронного инициирования I-KON фирмы «Орика» при ведении буровзрывных работ в московском метро [73] не выявлено снижение сейсмического эффекта взрыва. Как правило, при ведении проходческих работ в подземных условиях используются большие интервалы замедления. Поэтому в этом случае технологический разброс времени срабатывания систем инициирования несущественен.

3.3.2 Сейсмические источники нормального и пониженного воздействия по условиям ведения взрывных работ

Эти источники характеризуются наибольшей предсказуемостью, хотя в случае источников пониженного сейсмического воздействия в весьма локализованной области возможен всплеск сейсмической активности с достаточно сильным затуханием. В качестве характеристики источника пониженного сейсмического воздействия выберем величину, равную разности показателя затухания реального источника n_p и показателя затухания, вычисленного по формуле (3.10.2) для коэффициента сейсмичности K_p , и определяемую по формуле (3.12):

$$\Delta n' = n_p - 0,23 \ln K_p - 0,63. \quad (3.12)$$

Очевидно, что в этом случае $\Delta n' > 0$. Если одновременно выполняются два условия $\Delta n' \leq 0$ и $\Delta n \geq 0$, то сейсмический источник классифицируется как источник нормального сейсмического воздействия.

3.3.2.1 Взрывание при ведении взрывных работ подземным способом с регистрацией сейсмических колебаний на земной поверхности

Крупномасштабные взрывы. Шерегешевский рудник Горной Шории [39]: $\Delta n' = -0,11$ и $\Delta n = 0,19$. Следует отметить, что при ведении взрывных работ на руднике масса одновременно взрывааемых зарядов взрывчатых веществ достигала 73 т.

Крупномасштабный взрыв для создания гравитационной плотины Камбаратинской ГЭС-2 на реке Нарын [74]. Были последовательно взорваны заряды взрывчатого вещества массами 753 т и 2235 т: $\Delta n' = -0,25$ и $\Delta n = 0,05$.

Массовые взрывы в подземных рудниках. Взрывные работы на месторождении Ингульской шахты, Украина [78]. Применяется камерная система разработки с подэтажной отбойкой руды: $\Delta n' = -0,19$; $\Delta n = 0,11$.

ОАО «Ново-Широкинский рудник» [11]: $\Delta n' = -0,12$; $\Delta n = 0,18$.

Шахта ОАО «КНАУФ ГИПС НОВОМОСКОВСК» [160]. Взрывание в шахте производилось на глубинах 90...150 м: $\Delta n' = -0,03$; $\Delta n = 0,27$.

Во всех случаях сейсмические источники классифицируются как источники нормального сейсмического воздействия.

3.3.2.2 Массовые взрывы на карьерах с регистрацией сейсмических колебаний на земной поверхности

Рудник «Железный» ОАО «Ковдорский ГОК» [89, 131, 134, 136] для северного и южного бортов - $\Delta n' = -0,17 \dots - 0,15$ и $\Delta n = 0,13 \dots 0,15$; для западного и восточного бортов - $\Delta n' = -0,32 \dots - 0,33$ и $\Delta n = -0,02 \dots - 0,03$.

Железорудное месторождение в долине Джамада-Койра, Индия [226]. Диаметр взрывных скважин 102 мм. $\Delta n' = -0,2$; $\Delta n = 0,1$.

Железорудный карьер «Буваџс» Омарского месторождения [214] расположен в северной части Боснии и Герцеговины, разрабатывается с 2009 г. Карьер окружен плотной застройкой: $\Delta n' = -0,16$; $\Delta n = 0,14$.

Санганское меднорудное месторождение, Индия [168]. Горные породы изменяются от сильнотрещиноватых до среднетрещиноватых. Диаметр взрывных скважин 90 и 127 мм. Взрывные скважины бывают обводненными и необводненными. $\Delta n' = -0,25$; $\Delta n = 0,05$.

Карьеры известняка турецкой компании «Аксауса» и египетской компании «Assiut» [174]. Диаметр взрывных скважин 64 мм. $\Delta n' = -0,18$ и $\Delta n = 0,12$.

Карьеры известняка (диаметр взрывных скважин 100-150 мм) и доломита (диаметр взрывных скважин 100-115 мм) [230]. Известняк мелкозернистый, массивный, твердый. $\Delta n' = -0,25$ и $\Delta n = 0,05$. Доломит твердый, массивный, мелкозернистый, весьма трещиноват, трещины заполнены глинистым материалом. $\Delta n' = -0,21$ и $\Delta n = 0,09$.

Карьер «Alvand Qoly», расположенный вблизи города Биджар, Западный Иран [192]. Месторождение представлено известняковыми породами плиоценового возраста. Образцы известняка имеют предел прочности при одноосном сжатии 80 МПа. Типовая взрывная скважина имеет диаметр 76 мм, колонку заряда взрывчатого вещества (ANFO) длиной 10 м, перебур 1 м и забойку 3,5 м. $\Delta n' = 0,13$.

Гранитный карьер Джохор Бару, Малайзия [216]. $\Delta n' = -0,05$ и $\Delta n = 0,25$.

Месторождение гранитов в п. Кузнечное, Ленинградской обл. Масса одновременно взрываемых зарядов взрывчатого вещества до 5 т. $\Delta n' = -0,29$ и $\Delta n = 0,01$.

За исключением сейсмического источника на карьере «Alvand Qoly», который классифицируется как источник пониженного сейсмического воздействия, остальные источники должны рассматриваться как источники нормального сейсмического воздействия.

3.3.2.3 Взрывные работы в гражданском строительстве

Взрывные работы при строительстве гидроэлектростанции Карун-3, Иране [173]. Для расстояний 32-170 м, масс одновременно взрывааемых зарядов взрывчатых веществ 22,5-72,3 кг измеренные значения пиковой скорости смещения лежали в интервале 0,03-1,66 см/с. $\Delta n' = 0,84$ при $R < 50$ м; $\Delta n' = 0,32$ при $R \geq 50$ м. На малых расстояниях наблюдается выраженная аномалия сейсмического источника. При больших расстояниях затухание сейсмического сигнала гораздо меньше.

Строительство автомобильного шоссе Pluska-Ponikve в Словении [212]. Взрывные работы велись при проходке подземных тоннелей. Мониторинг осуществлялся на земной поверхности. $\Delta n' = -0,09$ и $\Delta n = 0,21$.

Мониторинг сейсмозрывного воздействия на твердеющий бетон обделок водоприемных и уравнильных сооружений дамбы «Готванд» [236]. $\Delta n' = 0,7$.

Дамба «Готванд» [170]. Сектор сейсмомониторинга составлял угол 120° . Диаметр взрывных скважин 64 мм. Сетка скважин 2×2 м². Интервал времени короткозамедленного взрывания составлял 0,5-5 с. $\Delta n' = -0,07$ и $\Delta n = 0,23$.

3.3.2.4 Предварительное щелеобразование

Установлено [58], что при предварительном щелеобразовании показатель затухания практически является постоянной величиной. В то же время коэффициент сейсмичности уменьшается более чем в два раза. С точки зрения предлагаемой классификации источник повышенного сейсмического воздействия переходит в источник нормального сейсмического воздействия.

Строительство гидроэлектростанции [209]. Поверх скального основания залегают слабые горные породы, склонные к ползучести. Применялось предварительное щелеобразование. $\Delta n' = -0,03$; $\Delta n = 0,27$.

На примере рудника «Железный» ОАО «Ковдорский ГОК» проведена оценка влияния предварительного щелеобразования на сейсмическое воздействие

взрыва предконтурных блоков [136]. Отмечено снижение скорости смещения за щелью в 1,5-2 раза.

Все сейсмические источники классифицируются как источники нормального сейсмического воздействия.

3.4 Верификация границ классификации взрывов по уровню их сейсмического воздействия

Предложенные формулы классификационных границ (3.10.1-2) соответствуют реальным сейсмическим источникам по типу сейсмического воздействия, и поэтому должны быть положены в основу классификации сейсмических источников по коэффициенту сейсмичности и показателю затухания (рисунок 3.3).

Из анализа рисунка 3.3 следует, что границы индивидуальных значений показателя затухания для выборки согласно условию $\Delta n = 0,36$ соответствуют области, в которую попадают практически все экспериментальные точки. Источники повышенного и нормального сейсмического воздействия распределены примерно в равной пропорции.

Графическое изображение формулы (3.1) попадает практически в середину области, которая соответствует источникам нормального сейсмического воздействия. При этом график оказывается несколько смещенным в сторону источников пониженного сейсмического воздействия. Это связано с тем, что формула (3.1) получено из анализа пикового значения модуля скорости смещения грунта, а экспериментальные точки на рисунке 3.3 соответствуют, в основном, значениям максимальной векторной скорости.

Как следует из проведенного выше анализа, а также сравнительного анализа буровзрывных работ в России и Финляндии [65], надежным способом снижения сейсмического воздействия взрыва является использование взрывных скважин малого диаметра.

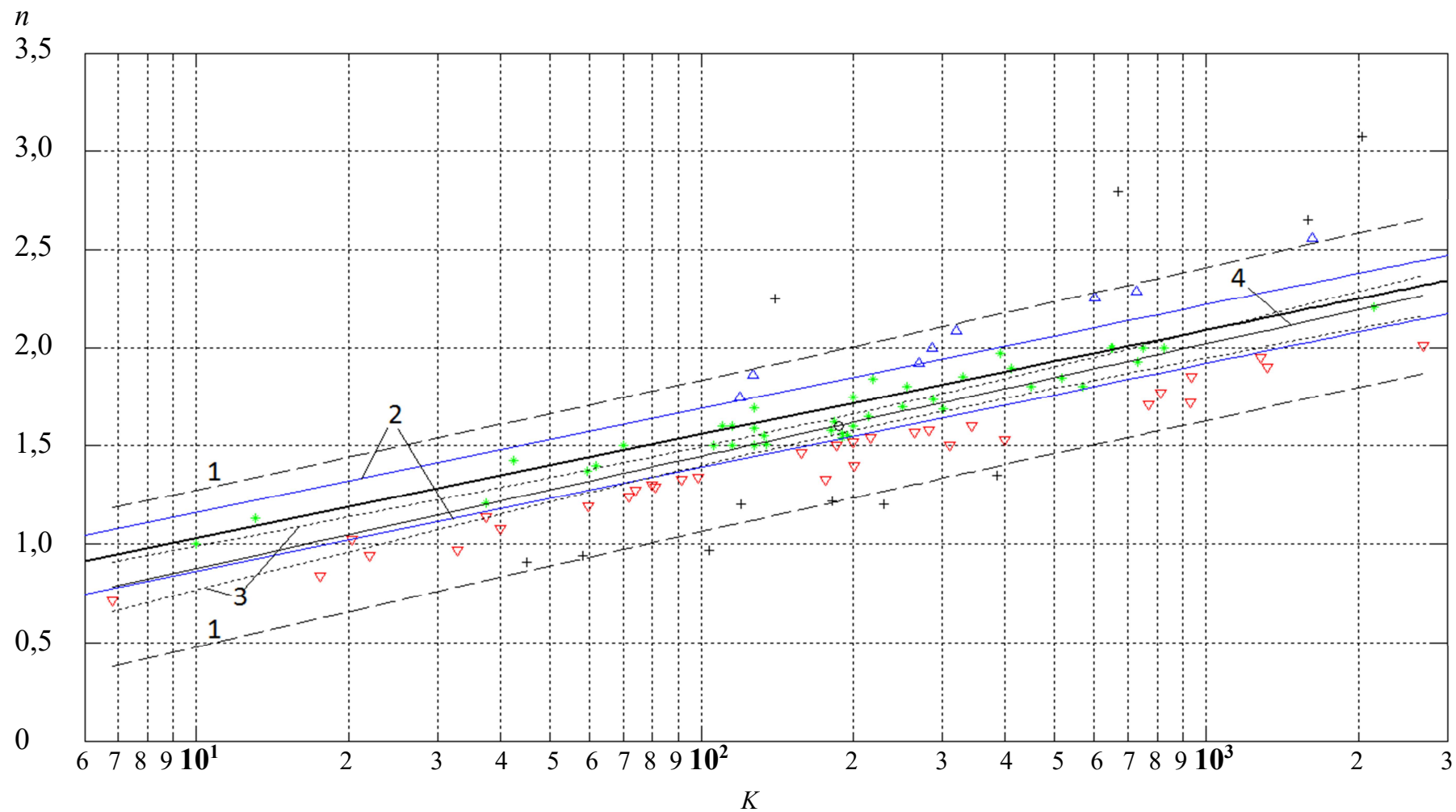


Рисунок 3.3 – Классификация сейсмических источников [205]: «*» - нормального воздействия, «∇» - повышенного воздействия, «Δ» - пониженного воздействия. «+» - данные, исключенные из статистического анализа, «o» - $\overline{\ln K}$. Границы доверительных интервалов: «1» - индивидуальных значений показателя затухания СВВ; «3» - $\overline{\ln K}$. «2» - классификационные границы сейсмических источников; «4» - график линейной регрессии выборки для условия $\Delta n = 0,36$. Сплошная толстая линия – график формулы (3.1)

Таким образом, предлагаемая классификация источников сейсмического воздействия отражает существующую в настоящее время технологию ведения взрывных работ в мировой практике [144].

3.5 Особенности отбора экспериментальных данных и их обработки при построении линейной регрессии скорости смещения

Возникает вопрос, насколько чувствительны параметры линейной регрессии к условиям взрывания, при которых происходит сбор данных? Надежность прогноза скорости смещения гарантируется лишь в случае статистической обработки данных, полученных при сопоставимых условиях.

К таким условиям относятся: фактор обводненности, наличие экранов по сейсмической трассе, диаметр скважин, интервал времени короткозамедленного взрывания как характеристика понятия «одновременно взрываемые заряды взрывчатого вещества», крепость горных, тип применяемых средств инициирования, направление на сейсмический очаг.

Гарантией надежности выборки данных служат высокие значения коэффициента корреляции, как правило, не меньше 0,7. Кроме того, к выборкам может быть применен расширенный статистический анализ, подробно описанный в статьях [93, 95].

Рассмотрим пример чувствительности параметров линейной регрессии к условиям взрывания на основе данных сейсмического мониторинга [244], полученных в процессе производства взрывных работ при проходке горных выработок в гранитных горных породах с коэффициентом крепости по М.М. Протодяконову 9-13 скважинами малого диаметра. Данные группировались по интервалу времени короткозамедленного взрывания, степени экранирования, углу между направлениями отбойки и на точку регистрации. Результаты обработки этих данных представлены в таблице 3.3, а графические зависимости изображены на рисунке 3.4.

Таблица 3.3 - Результаты линейного регрессионного анализа данных [244]

Условие		Параметры линейной регрессии		
		K	n	r^2
Все данные		119	1,75	0,18
Степень экранирования до 50%		1622	2,56	0,6
Степень экранирования свыше 50%		Регрессия не значима		
Интервал времени замедления 25 мс		98	1,63	0,24
Интервалы времени замедления: 50, 75 мс		113	1,78	0,15
Угол между направлением отбойки и линией сейсмический очаг – точка регистрации	6...49°	1184	2,44	0,48
	> 49°	Регрессия не значима		

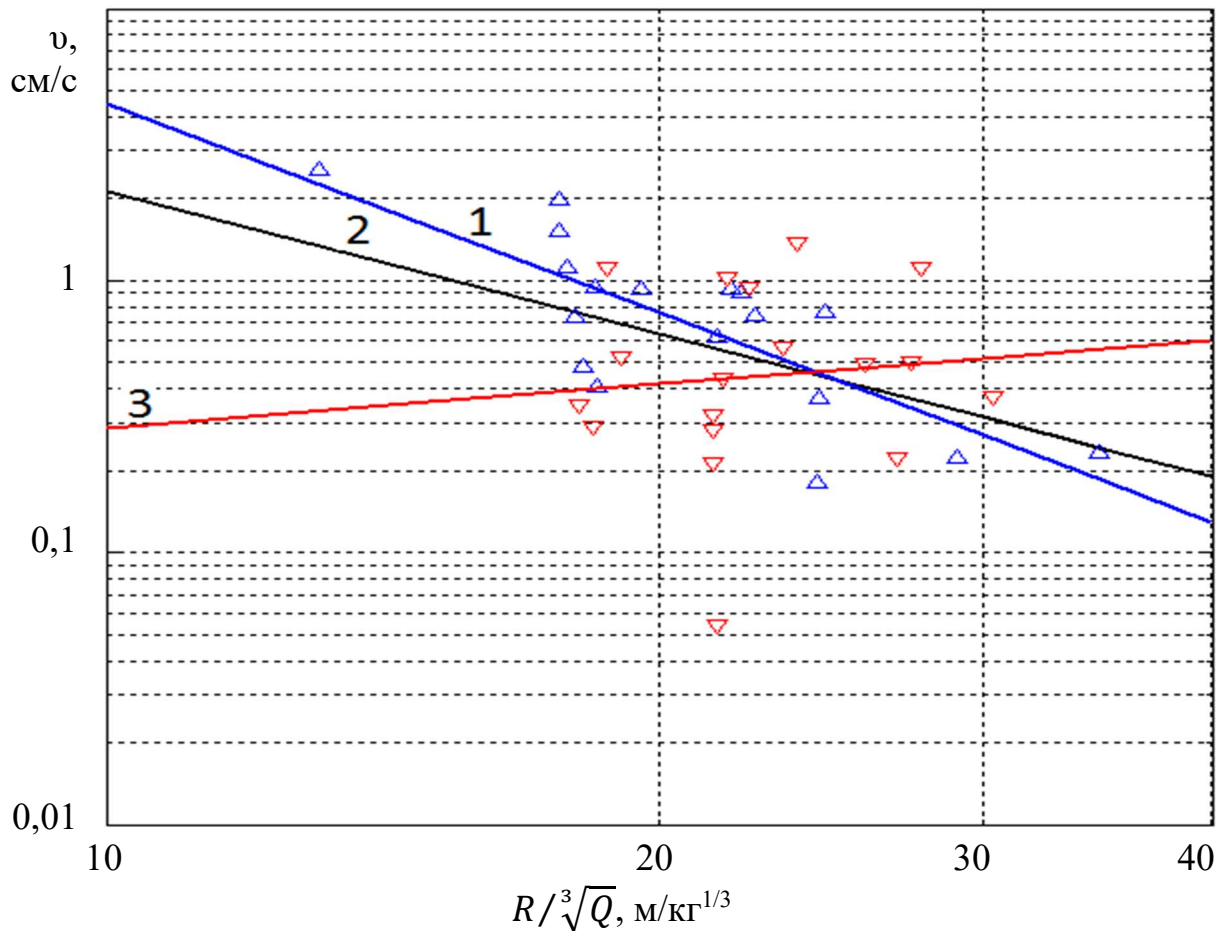


Рисунок 3.4 – Линии регрессии для скорости смещения согласно [244]: 1 - степень экранирования до 50% , « Δ » - эксперимент; 2 – для всех условий; 3 – степень экранирования свыше 50%, « ∇ » - эксперимент

Анализ выборок показывает значимость предварительной сортировки данных по условиям регистрации. В отдельных случаях пренебрежение этих условий может привести к зависимостям, не имеющим физического смысла (линия регрессии 3 на рисунке 3.4).

В связи с развитием эвристических методов, методов нелинейного регрессионного анализа появляются работы, в которых предлагается способы улучшения прогнозирования скорости смещения. В статье [229] проанализированы результаты тестовых испытаний с целью изучения уровня воздействия СВВ на сооружения с твердеющим бетоном при строительстве гидроэлектростанции. Результаты исследований подвергались вейвлет шумоподавлению и оптимизации с помощью квантово-генетического алгоритма. В качестве целевой функции алгоритма использовалась формула М.А. Садовского. В результате такой обработки источник взрыва «уменьшил» свое сейсмическое воздействие с $\Delta n = -0,25$ до $\Delta n = -0,16$.

Рассмотрим влияние минимизации ошибки аппроксимации скорости смещения грунта на коэффициент сейсмичности и показатель затухания согласно статьи [179]. Идея работы заключается в выборе функции суммы квадратов остатков. Путем минимизации этой функции производится оценка параметров линейной регрессии. Анализировались суммы квадратов остатков в виде: функции, используемой в практике линейного регрессионного анализа (3.13.1):

$$F(\ln K, n) = \sum_{i=1}^N [\ln v_i - (\ln K - n \cdot \ln \bar{R}_i)]^2, \quad (3.13.1)$$

нормированной функции суммы квадратов остатков (3.13.2):

$$F(\ln K, n) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\ln v_i - (\ln K - n \cdot \ln \bar{R}_i)}{\ln v_i} \right]^2, \quad (3.13.2)$$

функции, используемой в практике нелинейного регрессионного анализа (3.13.3):

$$F(K, n) = \sum_{i=1}^N [v_i - K \bar{R}_i^{-n}]^2, \quad (3.13.3)$$

где v_i – экспериментальное значение скорости смещения;

$\bar{R}_i = R_i / \sqrt[3]{Q_i}$ – приведенное расстояние.

Идея работы апробировалась на модельном эксперименте в интервале приведенных расстояний 14-30 м/кг^{1/3}. При использовании формул (3.13.1-3) получены параметры соответственно: $K = 218$, $n = 1,659$, $\Delta n' = -0,21$ и $\Delta n = 0,09$; $K = 56,7$, $n = 1,239$, $\Delta n = -0,02$; $K = 112$, $n = 1,431$, $\Delta n' = -0,28$ и $\Delta n = 0,02$. Параметры, вычисленные с использованием функций (3.13.1) и (3.13.3), соответствуют источнику нормального сейсмического воздействия. Использование функции (3.13.2) «повышает» сейсмическое воздействие источника.

В статье [179] были оценены прогностические свойства формул относительно коэффициента детерминации: $r^2 = 0,756$ - для (3.13.1); $r^2 = 0,768$ - для (3.13.2); $r^2 = 0,853$ - для (3.13.3). Таким образом, используя чисто математические приемы, можно добиться увеличения коэффициента детерминации. Однако с точки зрения физического смысла функция (3.13.1) будет более предпочтительна. Для подтверждения этого положения рассмотрим, к каким статистическим распределениям следует отнести значения коэффициента сейсмичности и показателя затухания?

3.6 Статистические распределения коэффициента сейсмичности и показателя затухания сейсмозрывных волн

Среди большого количества статистических распределений [23, 153] в горной практике широко используются нормальное распределение, логнормальное распределение и распределение Розина-Раммлера. Первое распределение используется в статистической обработке лабораторных и полигонных результатов измерений физико-технических параметров, последние два – в построении кривых гранулометрического состава в процессах подготовки горной массы. Логнормальное распределение дает хорошие результаты в предположении многократного дробления горных пород, распределение Розина-Раммлера – однократного дробления. При взрывной отбойке породный массив

испытывает многократное динамическое воздействие, часть которого посредством СВВ передается и на охраняемый объект. Поэтому для исследования статистических распределений коэффициента сейсмичности и показателя затухания ограничимся нормальным и логнормальным распределениями.

Для проверки принадлежности совокупности данных к конкретному распределению удобно использовать кумулятивную кривую, представленную в линеаризованном виде с помощью статистической бумаги [153]. Кумулятивные кривые для нормального и логнормального распределений описываются следующими уравнениями (3.14.1) и (3.14.2) соответственно:

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \int_{-\infty}^x \exp \left[- \left(\frac{x-M(x)}{\sqrt{2}\sigma_x} \right)^2 \right] dx, \quad (3.14.1)$$

$$F(\ln x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\ln x}} \int_{-\infty}^{\ln x} \exp \left[- \left(\frac{\ln x - M(\ln x)}{\sqrt{2}\sigma_{\ln x}} \right)^2 \right] d\ln x, \quad (3.14.2)$$

где $M(x)$, $M(\ln x)$ - математические ожидания случайных величин x , $\ln x$; σ_x^2 , $\sigma_{\ln x}^2$ - их дисперсии.

Различие уравнений (3.14.1-2) заключается в представлении случайной величины. В уравнении (3.14.2) случайная величина представлена ее логарифмом. Поэтому факторы, влияющие на случайную величину при нормальном распределении, носят аддитивный характер, а в случае логнормального распределения – мультипликативный характер.

Кумулятивная кривая коэффициента сейсмичности согласно данным, приведенным в таблице 1.4, представлена на статистической бумаге в предположении логнормального распределения (рисунок 3.5) и демонстрирует удовлетворительное качество распределения коэффициента сейсмичности. Физически это означает следующее. Одной из основных характеристик сопротивляемости горной породы разрушению является колебательная скорость. Ранее было показано, что характеристикой колебательной скорости является коэффициент сейсмичности. Если гранулометрический состав взорванной горной массы подчиняется логнормальному закону распределения, то будет обоснованным применение его и к коэффициенту сейсмичности.

Из рисунка 3.5 следует, что при значениях $\ln K < 4$ экспериментальные данные отклоняются от кумулятивной прямой. Для дальнейшего анализа выделим данные, соответствующие условию $K < 50$, и проверим их на соответствие логнормальному распределению (рисунок 3.6).

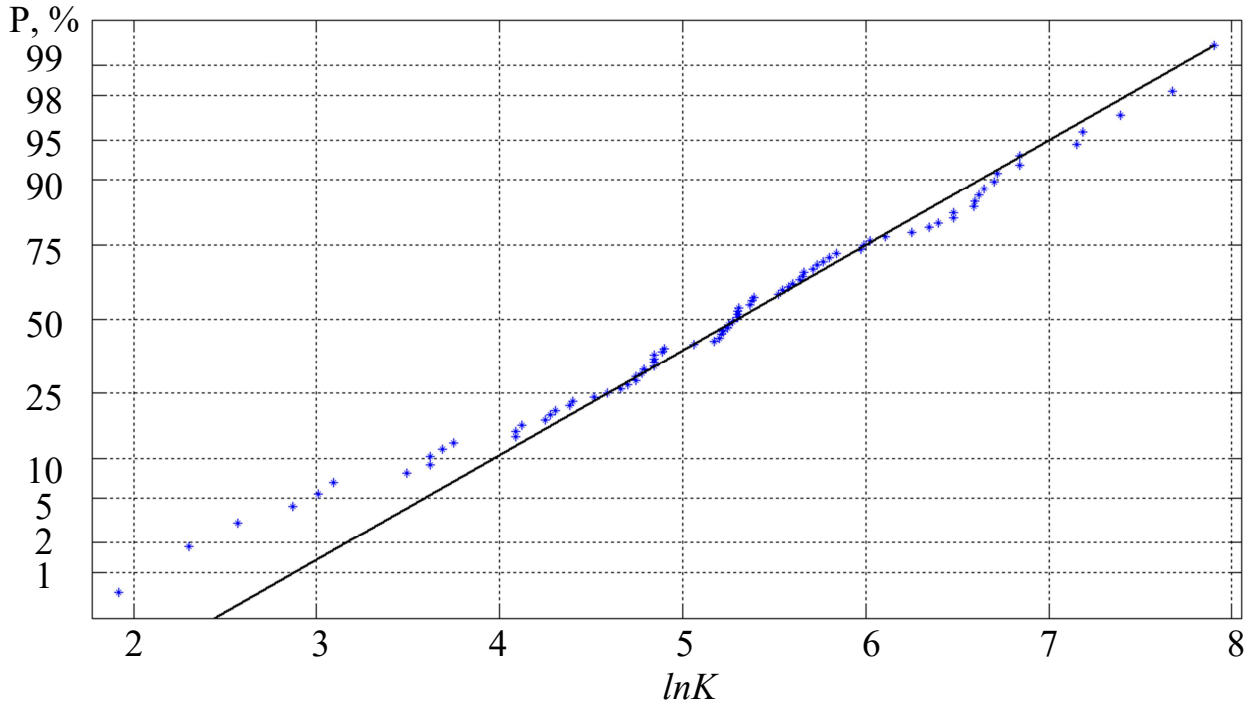


Рисунок 3.5 – График кумулятивной кривой коэффициента сейсмичности в предположении логнормального распределения. «*» - эксперимент

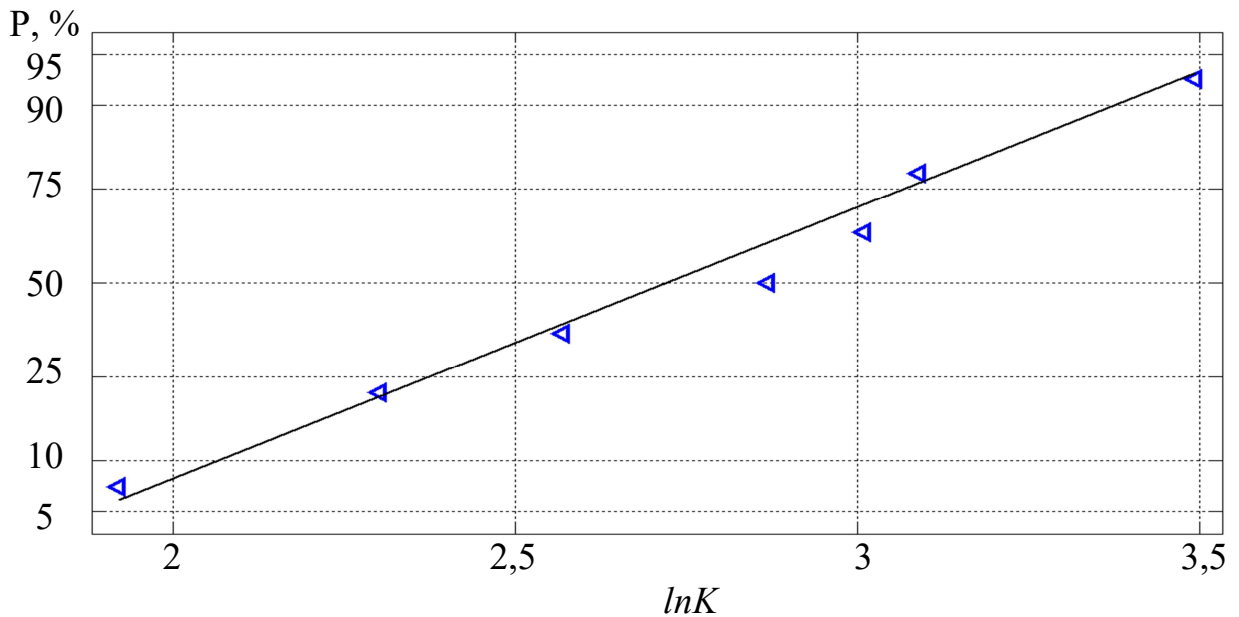


Рисунок 3.6 – График кумулятивной кривой при $K < 50$ в предположении логнормального распределения коэффициента сейсмичности. « \triangleleft » - эксперимент

Если из первоначальной совокупности исключить данные согласно условию $K < 30$ и проверить их на соответствие логнормальному распределению, то получим результат, представленный на рисунке 3.7.

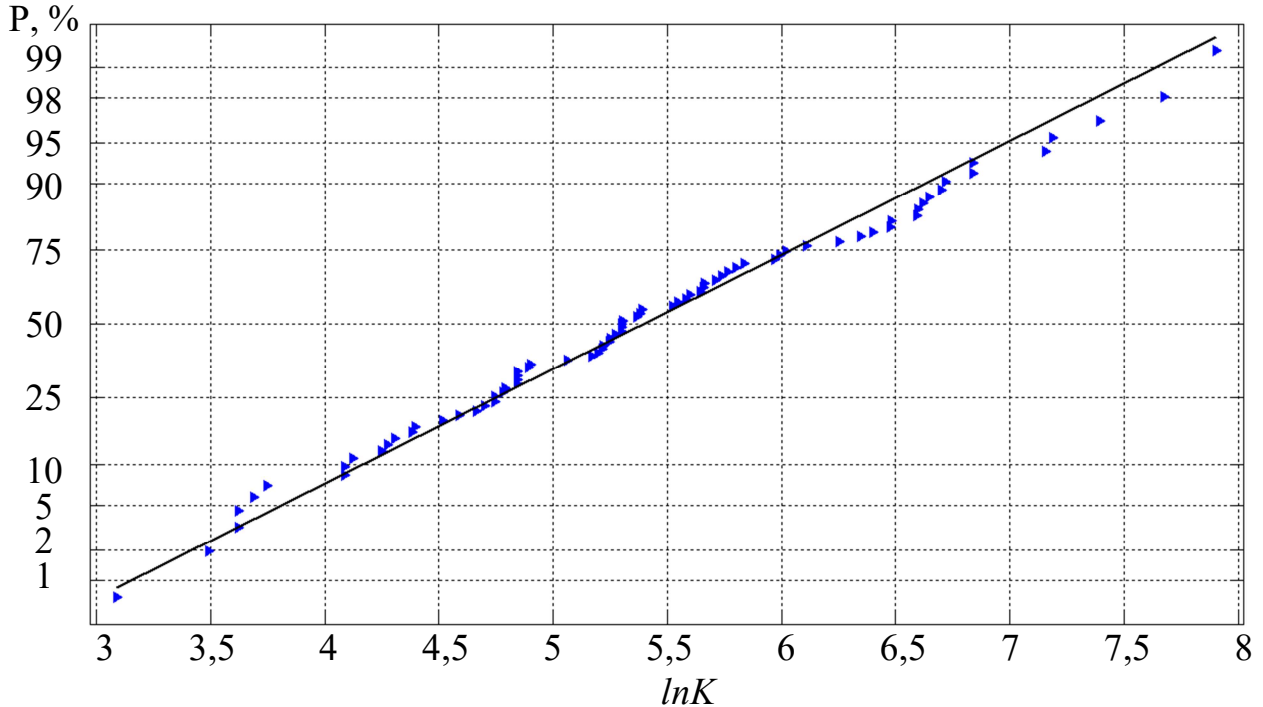


Рисунок 3.7 – График кумулятивной кривой в предположении логнормального распределения коэффициента сейсмичности для $30 < K < 3 \cdot 10^3$. «▶» - эксперимент

Из анализа рисунка 3.7 следует, что при условии $30 < K < 3 \cdot 10^3$ значения коэффициента сейсмичности удовлетворяют логнормальному распределению. При этом нельзя утверждать, что в широком интервале по K распределение коэффициента сейсмичности характеризуется двухмодовым поведением. Действительно, только по 7-и точкам (рисунок 3.6) нельзя сделать вывод о наличии дополнительной моды в распределении.

Следует заметить, что малым значениям коэффициента сейсмичности соответствуют и малые значения показателя затухания. Физически это означает, что скорость смещения тоже имеет малые значения, но при этом слабо зависит от приведенного расстояния. Например, согласно [212] скорость смещения не превышала значение 0,8 см/с ($K = 13$, $n = 1,13$); согласно [157] – 0,3 см/с ($K =$

10, $n = 1$); согласно [185] – 0,7 см/с ($K = 6,83$, $n = 0,71$). Для обычных зданий и сооружений такие сейсмические колебания не являются опасными.

На рисунке 3.8 представлена кумулятивная кривая, соответствующая нормальному распределению показателя затухания. Из анализа графика обнаруживаются два характерных «всплеска» для значений $n = 1,5$ и $n = 2$. Физическая интерпретация показателя затухания СВВ для $n = 1,5$ дана в параграфе 1.1 (глава 1), для $n \approx 2$ – академиком Е.И. Шемякиным [158].

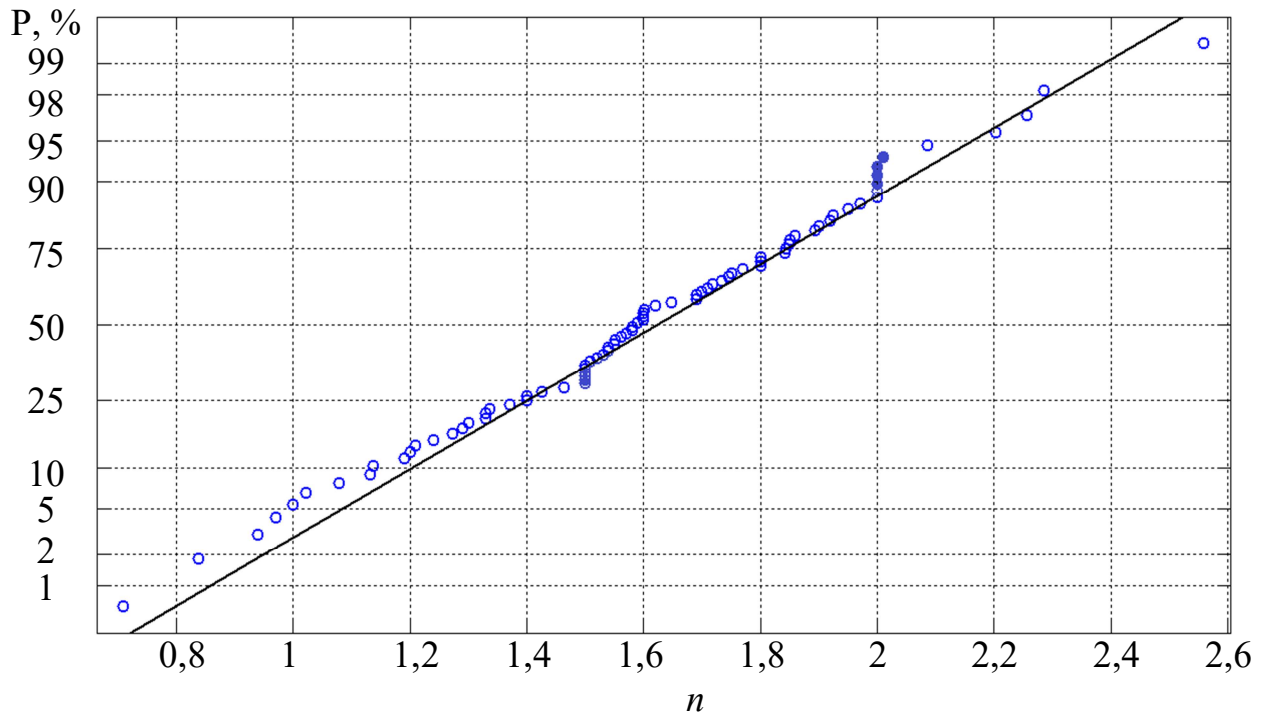


Рисунок 3.8 – График кумулятивной кривой показателя затухания СВВ в предположении нормального распределения. «o» - эксперимент

Оценим параметры статистических распределений коэффициента сейсмичности и показателя затухания, средние значения распределений и их доверительные интервалы на уровне надежности 95%. Применительно к параметрам логнормального и нормального распределений используем формулы для оценок математических ожиданий (3.15.1):

$$\overline{\ln K} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln K_i, \quad \bar{n} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i; \quad (3.15.1)$$

средних квадратичных отклонений (3.15.2):

$$\sigma_K = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\ln K_i - \overline{\ln K})^2}{N-1}}, \quad \sigma_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (n_i - \bar{n})^2}{N-1}}. \quad (3.15.2)$$

Относительно величины $\ln K$ логнормальное распределение является нормальным распределением. Для показателя затухания оценочное значение математического ожидания и есть среднее значение показателя затухания.

В случае логнормального распределения среднее значение коэффициента сейсмичности вычисляется по формуле (3.16):

$$\bar{K} = \exp\left(\overline{\ln K} + \frac{\sigma_K^2}{2}\right). \quad (3.16)$$

Медиана распределения коэффициента сейсмичности определяется из формулы (3.17):

$$K_{\text{мед}} = \exp(\overline{\ln K}). \quad (3.17)$$

Результаты вычислений характеристик статистических распределений коэффициента сейсмичности и показателя затухания сведены в таблицу 3.4

Таблица 3.4 - Основные параметры статистических распределений K и n

Условие	$\overline{\ln K}$	σ_K	$\bar{K}^{*)}$	$K_{\text{мед}}^{*)}$	\bar{n}
$6 < K < 3000$ ($N = 82$)	$5,23_{-0,27}^{+0,27}$	$1,22_{-0,19}^{+0,19}$	390_{-150}^{+265}	185_{-45}^{+55}	$1,60_{-0,08}^{+0,08}$
$20 < K < 3000$ ($N = 77$)	$5,40_{-0,23}^{+0,23}$	$1,03_{-0,17}^{+0,17}$	375_{-120}^{+200}	220_{-45}^{+60}	$1,64_{-0,07}^{+0,07}$

Учитывая свойство мультипликативности случайной величины $\ln K$ при логнормальном законе распределения и свойство аддитивности случайной величины n при нормальном законе распределения в случае многофакторного анализа коэффициента сейсмичности и показателя затухания, получим следующее уравнение для скорости смещения (3.18):

$$\ln v = \ln \prod_{i=1}^{N_1} K_i - \left(\sum_{i=1}^{N_2} n_i\right) \ln \left(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}}\right) \text{ или } v = \left(\prod_{i=1}^{N_1} K_i\right) \left(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}}\right)^{-\left(\sum_{i=1}^{N_2} n_i\right)}, \quad (3.18)$$

где K_i и n_i – элементы выборки коэффициента сейсмичности объемом N_1 и показателя затухания объемом N_2 соответственно.

Для оценки параметров линейной регрессии для скорости смещения при $N_1 = 1$, $N_2 = 1$ в качестве функции суммы квадратов остатков следует использовать функцию (3.13.1).

Следует отметить, что в этом случае коэффициент детерминации является характеристикой логарифма скорости смещения, т.е. $r^2(\ln v)$. В то же время при использовании функции суммы квадратов остатков вида (3.13.3) коэффициент детерминации является характеристикой скорости смещения, т.е. $r^2(v)$. Очевидно, что $r^2(\ln v) \neq r^2(v)$.

Уравнение (3.18) в упрощенном виде (не рассматривается многофакторность показателя затухания) рекомендовано в правилах безопасности [127], в справочном руководстве [120], а также используется в зарубежной практике.

Следствием логнормального распределения коэффициента сейсмичности является способ оценки колебательной скорости с помощью метода эмпирических коэффициентов [245], в котором коэффициент сейсмичности представляется в виде $K = \prod_{i=1}^N k_i$, где k_i – эмпирические коэффициенты ($N = 6$).

3.7 Выводы по Главе 3

1. Установлено, что для подавляющего большинства промышленных взрывов при прогнозировании скорости смещения интервалы изменения параметров в формуле М.А. Садовского составляют: $0,7 < n < 3,1$ для показателя затухания, $6 < K < 3 \cdot 10^3$ для коэффициента сейсмичности.

2. С учетом геометрического расхождения СВВ обоснована и подтверждена граница минимальных значений показателя затухания СВВ в зависимости от коэффициента сейсмичности согласно уравнению $n = 0,23 \ln(K)$.

3. Доказана принадлежность классификационного признака $n = 0,23 \ln(K) + 0,5$ к источникам нормального сейсмического воздействия и установлен физический смысл коэффициента сейсмичности при идеальном

взрывании как величины численно равной массовой скорости среды при единичном приведенном расстоянии (5,72 м/с).

4. Верифицированы классификационные границы: граница между источниками повышенного и нормального сейсмического воздействия описывается формулой $n_n = 0,23 \ln K + 0,33$; граница между источниками пониженного и нормального сейсмического воздействия – формулой $n_b = 0,23 \ln K + 0,63$.

5. Установлены количественные признаки промышленных взрывов как источников повышенного сейсмического воздействия: ведение взрывных работ в обводненных условиях; взрывание весьма крепких горных пород; крупномасштабное взрывание; проблема выбора массы одновременно взрывааемых зарядов взрывчатого вещества при короткозамедленном взрывании относительно ширины временного окна интервала замедления и технологического разброса времен срабатывания систем инициирования.

6. Установлены количественные признаки промышленных взрывов как источников нормального и пониженного сейсмического воздействия: взрывание при ведении буровзрывных работ подземным способом с регистрацией сейсмических колебаний на земной поверхности; одновременное взрывание заряда взрывчатого вещества небольшой массы (сотни килограммов); взрывные работы в гражданском строительстве, применение предварительного щелеобразования.

7. Показано, что уменьшение сейсмического воздействия источника становится возможным путем выбора взрывных скважин меньшего диаметра.

8. Оценено влияние условий взрывания при регистрации значений скорости смещения на надежность прогнозных оценок скорости смещения; которые соответствуют выборкам, полученным при сходных условиях взрывания.

9. Установлено, что от выбора представления функции суммы квадратов остатков (квадратов разностей между аппроксимированными и

экспериментальными данными) зависит прогнозный уровень сейсмического воздействия взрывного источника.

10. Доказано, что для скорости смещения, выраженной в см/с, параметры в формуле М.А. Садовского для диапазона $6 < K < 3000$ подчиняются статистикам: логнормальному распределению коэффициента сейсмичности с медианным значением 185_{-45}^{+5} , средним значением 390_{-150}^{+265} ; нормальному распределению показателя затухания со средним значением $1,60_{-0,08}^{+0,08}$.

Основные материалы главы 3 опубликованы в работах [65, 144, 205].

ГЛАВА 4 НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ОБНАРУЖЕНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА НАЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ ПРИ ПОДЗЕМНОМ ВЗРЫВАНИИ

В главе 2 было рассмотрено сейсмическое воздействие массовых взрывов в подземных условиях на наземные сооружения. По классификации сейсмических источников, приведенной в главе 3, эти взрывы характеризуются как источники нормального сейсмического воздействия. Однако остался открытым вопрос об ущербе охраняемому объекту, нанесенному непосредственно после проведения технологического взрыва. Настоящая глава посвящена решению этого вопроса и разработке мероприятий по обеспечению безопасности при ведении взрывных работ.

4.1 Постановка задачи и способ ее решения

В прогнозировании уровня воздействия СВВ на грунт вблизи оснований охраняемых объектов отметим следующие подходы:

1. Фундаментальный или «из первых принципов» подход, основанный на непосредственном применении законов сохранения энергии, импульса, массы и материальных уравнениях среды;
2. Феноменологический или «из общих принципов» подход, например, в случае формулы М.А. Садовского – на принципе подобия;
3. Эмпирический подход, состоящий в статистической обработке больших массивов данных методами множественной линейной или нелинейной регрессий.

Особенность первого подхода заключается в его общности. Однако достижение практических результатов происходит путем больших затрат вычислительных мощностей, в необходимости сбора исходных данных для составления материальных уравнений. Сложности возникают еще в неоднозначности постановки граничных и начальных условий.

Второй подход не требует детальных знаний о физико-механических свойствах среды, характеризуется относительной простотой и надежностью получения прогнозных величин, особенно, с учетом корреляционной связи между коэффициентом сейсмичности и показателем затухания.

Существование третьего подхода обусловлено возможностью подбора на основе статической обработки данных аппроксимирующей функции, связывающей различные параметры буровзрывных работ, расстояния, направления с величиной скорости смещения. Практическая значимость такого подхода сильно возросла с использованием искусственных нейронных сетей, для которых вообще не требуется никаких предположений о виде аппроксимирующей функции.

С точки зрения оперативного прогнозирования сейсмического воздействия взрывных работ, особенно, в условиях, связанных с отклонениями параметров буровзрывных работ от проектных значений, первый и третий подходы малоэффективны [144]. В первом случае это связано со сложностью реализации подхода, в третьем – с тесной привязкой разработанной методики к конкретному месторождению.

Поэтому остается феноменологический подход. Перспективность подхода уже была продемонстрирована на примере использования формулы М.А. Садовского в моделировании огибающих кривых модуля вектора скорости смещения. Расширим этот подход на моделирование волновой формы велосигаммы. Сформулируем постановку этой проблемы [204].

Источником сейсмической волны является возмущение среды вблизи взрывной скважины, которое практически можно зарегистрировать с помощью акселерометра, помещенного в наблюдательную скважину и ориентированного в направлении перпендикулярно оси взрывной скважины. Будем считать, что на расстоянии 60-ти радиусов взрывной скважины в скальной породе возмущение носит упругий затухающий характер. В первом приближении разумно принять

функцию возмущения скального массива в виде зависимости избыточного давления атмосферного воздуха от времени в заданной точке (4.1) согласно [130]:

$$\Delta P(t) = \Delta P_0 \left(1 - \frac{t}{\tau}\right) \exp\left(-a \frac{t}{\tau}\right), \quad (4.1)$$

где ΔP_0 – избыточное давление на фронте УВВ,

τ – длительность фазы сжатия;

a – эмпирический коэффициент.

Акустический импеданс полиметаллических руд для условий Ново-Широкинского месторождения в $(2-3) \cdot 10^4$ раз превышает акустический импеданс воздуха. Это означает, что релаксация возмущения в горной породе должна происходить гораздо быстрее, нежели в воздухе. В приближении плоской сейсмической волны напряжение на фронте волны прямо пропорционально скорости смещения частиц среды. При фиксированном расстоянии от заданной точки до очага возмущения согласно формуле М.А. Садовского скорость смещения представим в виде (4.2):

$$v = v_0 \left(\frac{Q}{Q_{max}}\right)^n, \quad (4.2)$$

где v_0 – скорость смещения, соответствующая максимальной массе заряда взрывчатого вещества в серии взрывов (Q_{max});

Q – текущее значение массы заряда взрывчатого вещества в серии;

n – показатель затухания СВВ.

Для одиночного взрыва $v = v_0$, т.е. v_0 представляет собой масштабирующий множитель.

Окончательно, выражение для скорости смещения в заданной точке в зависимости от времени примет вид (4.3):

$$v(t) = v_0 \left(\frac{Q}{Q_{max}}\right)^n \left(1 - \frac{t}{\tau}\right) \exp\left[-a \left(\frac{t}{\tau}\right)^b\right], \quad (4.3)$$

где b – эмпирический коэффициент, учитывающий различие акустических импедансов горной породы и атмосферного воздуха.

Преобразуем формулу (4.3) на случай массового взрыва. В качестве одиночного взрыва примем взрыв всех скважин одной ступени замедления. Для

взрывов скважин одинакового диаметра с различной высотой колонки заряда взрывчатого вещества считаем неизменными параметры a и b . Из общих соображений длительность фазы сжатия горной породы не может быть меньше времени детонации взрывчатого вещества в скважине. Поэтому длительность фазы сжатия τ' должна выбираться с учетом наибольшей высоты колонки заряда взрывчатого вещества, скорости детонации взрывчатого вещества и предполагаемой продолжительности квазистатической стадии взрыва. Тогда выражение (4.3) с учетом короткозамедленного взрывания преобразуется к виду (4.4):

$$v(t) = v_0 \sum_{k=1}^N \left\{ \left(\frac{Q_k}{Q_{max}} \right)^n \left(1 - \frac{t-t_{зам,k}}{\tau'} \right) \exp \left[-a \left(\frac{t-t_{зам,k}}{\tau'} \right)^b \right] \right\}, \quad (4.4)$$

где Q_k – масса заряда взрывчатого вещества на k -й ступени замедления;

$t_{зам,k}$ – момент времени срабатывания k -й ступени замедления, отсчитанный от момента времени инициирования группы зарядов взрывчатого вещества нулевой ступени замедления.

СВВ переносят энергию посредством объемных продольных и поперечных волн и поверхностных волн. Определяющее воздействие на наземные объекты оказывают поверхностные волны Релея и объемные продольные волны, так как в приближении сферического источника СВВ можно пренебречь вкладом объемных поперечных волн в сейсмическое воздействие взрыва.

Учтем вклад волн Релея в сейсмический эффект. Будем рассматривать волну Релея как результат трансформации части потока первичных продольных волн вблизи очага разрушения горных пород взрывом на границе раздела порода – воздух. Учтем, что колебания частиц в волне Релея происходят преимущественно в вертикальной плоскости. Тогда разумно предположить аддитивность вертикальных компонент волны Релея и продольной волны, т.е. результирующее колебание будет характеризоваться скоростью смещения вида (4.5):

$$v' = \eta_{пр} v(t) + \eta_R v(t - \tau_{зад}), \quad (4.5)$$

где $\eta_{\text{пр}}$ доля амплитуды скорости результирующего колебания, обусловленная вкладом продольных волн;

η_R то же – поверхностных волн;

$\tau_{\text{зад}}$ – время задержки прихода поверхностных волн в заданную точку относительно момента времени прихода продольных волн в ту же точку.

Очевидно, что $\eta_{\text{пр}} + \eta_R = 1$.

Функции $v(t)$ и $v(t + \tau_{\text{зад}})$ в выражении (4.5) определяются согласно выражению (4.4). Выражение (4.5) попрежнему описывает сейсмическое воздействие той части источника возмущений, где формируется упругая затухающая волна, не смотря на то, что параметр $\tau_{\text{зад}}$ относится к точке регистрации скорости смещения.

Актуальный вид модельных компонент велосиграммы получается лишь в случае преобразования функции (4.5), которое по своим характеристикам повторяет поведение среды при динамическом нагружении. В качестве такого преобразования примем фильтр низких частот, ранее рассмотренный в главе 2. Действительно, по мере удаления от источника сейсмических волн в спектре частот компонент скорости смещения высокочастотные составляющие затухают быстрее, чем низкочастотные составляющие, т.е. «кажущийся» период сейсмических колебаний возрастает с расстоянием. Поэтому фильтр низких частот оказывается подобным массиву горных пород относительно СВВ.

В отличие от моделирования огибающей модуля вектора скорости смещения при моделировании волновой формы велосиграммы требования к параметрам фильтрации существенно возрастают. Это связано с тем, что в первом случае достаточно сгладить высокочастотные пульсации, чтобы получить не осциллирующую кривую. Сформулируем требования к фильтру низких частот.

Массив горных пород представляет собой колебательную среду, которая может быть описана с помощью дифференциальных уравнений четного порядка, так как одним из модельных представлений массива является тело Гука [109]. Поэтому порядок фильтр низких частот должен быть четным (2-й, 4-й и т.д.).

Важным параметром фильтр низких частот является частота среза. Согласно теореме Котельникова частота среза будет $f_{\text{ср}} \approx 1/(2t_{\text{д}})$, где $t_{\text{д}}$ – интервал времени дискретизации. В качестве оценки $t_{\text{д}}$ примем продолжительность фазы сжатия, т.е. $f_{\text{ср}} \approx 1/(2\tau')$. Эта частота среза соответствует условной границе спектра частот реальной велосиграммы.

Другой параметр, необходимый при проектировании фильтр низких частот, - затухание сейсмического сигнала в пределах полосы пропускания фильтр низких частот $D_{\text{пп}}$. Этот параметр служит характеристикой удаленности точки регистрации велосиграммы от очага взрыва, так как расстояние не входит в выражение (4.4). Очевидно, что данный параметр должен быть меньше величины затухания сейсмического сигнала за пределами полосы пропускания (задерживания) фильтр низких частот $D_{\text{пз}}$, который примем равным 40 дБ. Последнее значение соответствует затуханию сигнала в 100 раз и примерно равно отношению сигнал – шум реальной велосиграммы.

Существуют различные аппроксимации частотных характеристик фильтров. Остановимся на эллиптическом фильтре (фильтре Куэра) [98]. Особенностью этого фильтра является то, что он симметричен относительно пульсаций амплитудно-частотная характеристика в полосах пропускания и задерживания. Эллиптический фильтр выделяется максимальной крутизной амплитудно-частотной характеристикой в переходной области, но имеет наихудшую фазо-частотную характеристику, что сказывается на стабильности фильтра и может слабо подавлять высокочастотные составляющие сигнала. Указанные недостатки эллиптического фильтра, скорее всего, являются его преимуществом относительно передачи нелинейных динамических свойств горного массива.

4.2 Экспериментальное исследование сейсмозрывных волн в ближней зоне сейсмического воздействия одиночного взрыва взрывчатых веществ для условий Ново-Широкинского месторождения полиметаллических руд

Одной из целей исследования СВВ в ближней зоне сейсмического воздействия взрыва заряда взрывчатого вещества было определение эмпирических коэффициентов a и b , входящих в выражение (4.4). Для постановки и проведения полигонных измерений использовались акселерометры, адаптированные к условиям горного производства [79]. Акселерометры устанавливались на расстояниях $20R_3$, $40R_3$, $60R_3$, где $R_3 = 55$ мм – радиус зарядной скважины (рисунок 4.1). В качестве заряда взрывчатого вещества использовался патронированный аммонит №6ЖВ массой 1 кг. Патроны досылались на забой скважины и утрамбовывались, высота заряда не превышала 100 мм, поэтому заряд рассматривался как сосредоточенный. Иницирование осуществлялось от электродетонатора. Жесткая связь акселерометра с массивом осуществлялась путем подачи бетонной смеси на забой измерительной скважины до полного перекрытия акселерометра и зазоров. Кабельная система прокладывалась вдоль поверхности камеры на уровне измерительных скважин и подключалась к цифровому осциллографу TDS3034B. На рисунке 4.2 показана измерительная скважина с установленным в нее акселерометром.

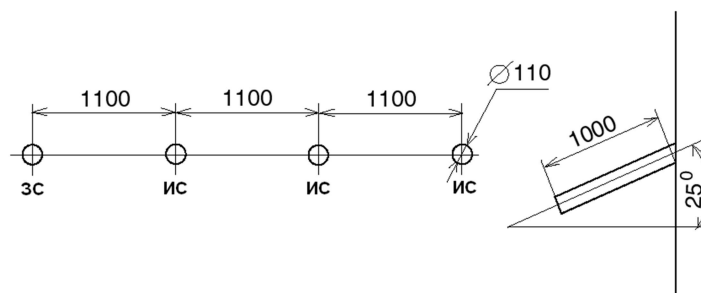


Рисунок 4.1 – Схема расположения заряда взрывчатого вещества и акселерометров [142].

«ЗС» - зарядная скважина, «ИС» - измерительная скважина



Рисунок 4.2 – Измерительная скважина с установленным в нее акселерометром

В результате взрыва заряда взрывчатого вещества в зарядной скважине были получены акселерограммы, представляющие собой эпюры радиальной компоненты ускорения смещения рудного тела. Пример акселерограммы, зарегистрированной в измерительной скважине на расстоянии $60R_3$, показан на рисунке 4.3.

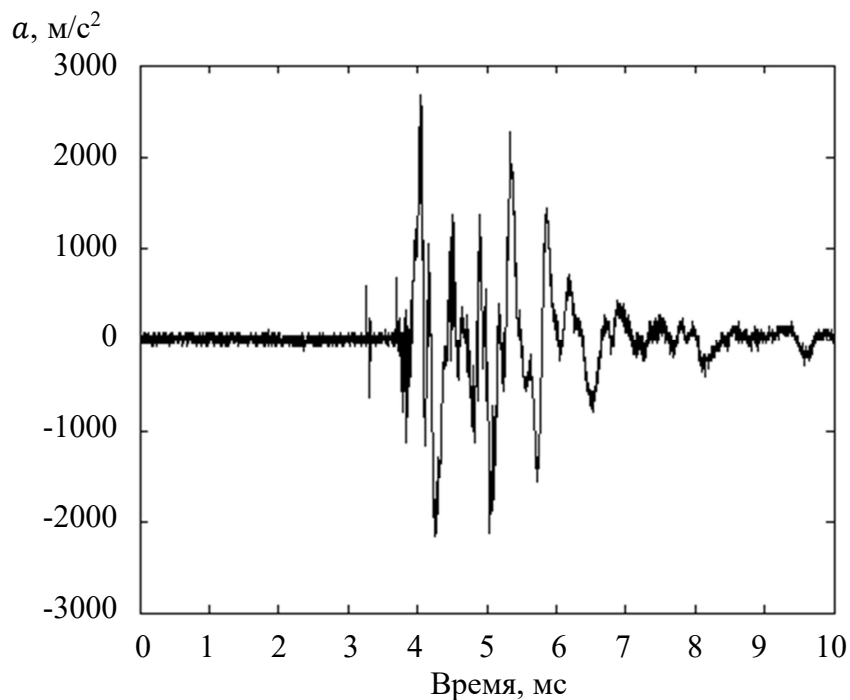


Рисунок 4.3 – Пример акселерограммы, зарегистрированной на расстоянии $60R_3$ [142]

Велосигramмы вычислялись путем интегрирования акселерограмм по времени. На рисунке 4.4 показана аппроксимация эпюры относительной скорости

смещения горной породы, зарегистрированной с помощью акселерометра на расстоянии $60R_3$. В этом случае v_0 – максимальное значение скорости смещения.

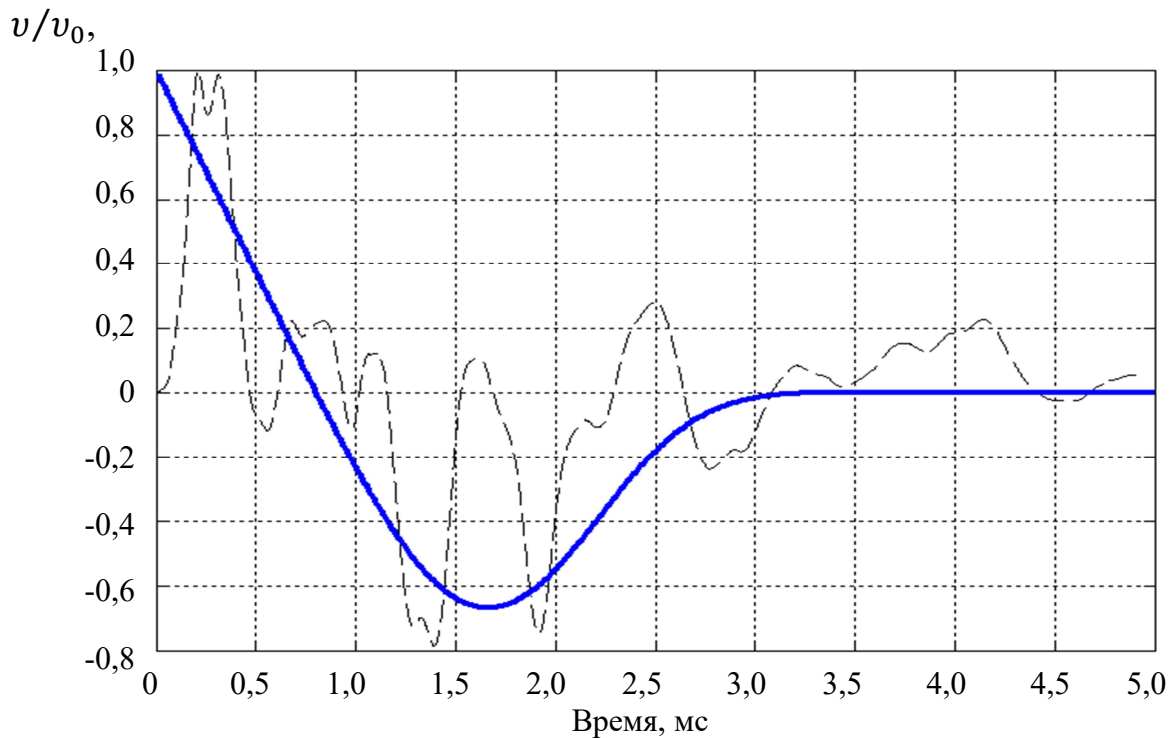


Рисунок 4.4 - Зависимости относительной скорости смещения рудного тела от времени [204].

Штриховая линия – эксперимент, сплошная – аппроксимация согласно уравнению (4.3)

Аппроксимированная кривая получена при следующих значениях параметров: $\tau' = 0,8$ мс, $a = 0,026$, $b = 4$. Отметим заметную осцилляцию экспериментальной кривой относительно ее аппроксимации, но это не ухудшает идентификацию временных областей сжатия и разряжения среды. Очевидно, что с помощью параметров a и b можно устанавливать продолжительность фазы растяжения горной породы.

4.3 Прогнозная оценка сейсмического воздействия технологических взрывов на охраняемые объекты Ново-Широкинского рудника по огибающей модуля скорости смещения

В результате исследований было установлено, что велосиграмма, зарегистрированная от экспериментального взрыва (рисунок А.11 приложения А), характеризуется аномально высокими значениями вертикальной компоненты

скорости смещения во временном интервале после момента времени окончания детонации скважинных зарядов взрывчатого вещества (0,45-0,65 с на рисунке А.11).

Если рассматривать каждый массовый взрыв как последовательность одновременно взрывааемых зарядов взрывчатого вещества, то для вертикальной компоненты скорости смещения выражение (2.2) в приближении аддитивности вклада продольных и поверхностных СВВ в сейсмическое воздействие взрыва примет вид (4.6):

$$v_{\text{ма}}(t_i) = K_1(\bar{R}_{1i})^{-n_1} + K_2(\bar{R}_{2i})^{-n_2}, \quad (4.6)$$

где $\bar{R}_{1i} = \frac{R_{1i}(t_i)}{\sqrt[3]{Q_i(t_i)}}$ – приведенное расстояние для продольных СВВ;

$\bar{R}_{2i} = \frac{R_{2i}(t_i - t_3)}{\sqrt[3]{Q_i(t_i)}}$ – то же для поверхностных СВВ;

t_3 – время задержки прихода поверхностных СВВ в точку регистрации относительно момента времени прихода продольных СВВ;

K_1, n_1 и K_2, n_2 коэффициенты сейсмичности и показатели затухания этих СВВ.

При подземном взрывании с регистрацией СВВ на земной поверхности будем различать поверхностные СВВ, образующиеся в результате трансформации объемных волн на земной поверхности (волны I-го типа), и поверхностные СВВ, образующиеся в результате трансформации объемных волн на поверхности горных выработок (волны II-го типа) [145]. Поскольку волны I-го типа формируются на всем пути распространения продольных волн, то их вклад в сейсмическое воздействие взрыва учитывается совместно с вкладом продольных волн в первом слагаемом выражения (4.6). Волны II-го типа формируются в непосредственной близости от источника и распространяются по более длинному пути. Поэтому их вклад в сейсмическое воздействие взрыва учитывается вторым слагаемым выражения (4.6). Волны II-го типа распространяются в горных выработках как в волноводах, т.е. характеризуются одномерным ограничением, поэтому следует ожидать увеличение вклада волн II-го типа в сейсмическое воздействие взрыва при ведении взрывных работ на больших расстояниях.

На рисунке 4.5 показана зависимость аппроксимации скорости смещения от времени с параметрами, приведенными в таблице 2.6. В аппроксимации использованы следующие значения коэффициентов сейсмичности и показателей затухания СВВ: $K_1 = 310$, $n_1 = 2$; $K_1 = 0,09$, $n_2 = 1,15$ для массы заряда взрывчатого вещества в кг, расстояния в м, скорость смещения в см/с. Время задержки $t_3 = 105$ мс. Относительный вклад поверхностных волн II-го типа в модуль вертикальной компоненты скорости смещения согласно таблице 2.9 ($K_{пв} = 530$, $n_1 \approx n_{пв}$) составляет порядка половины.

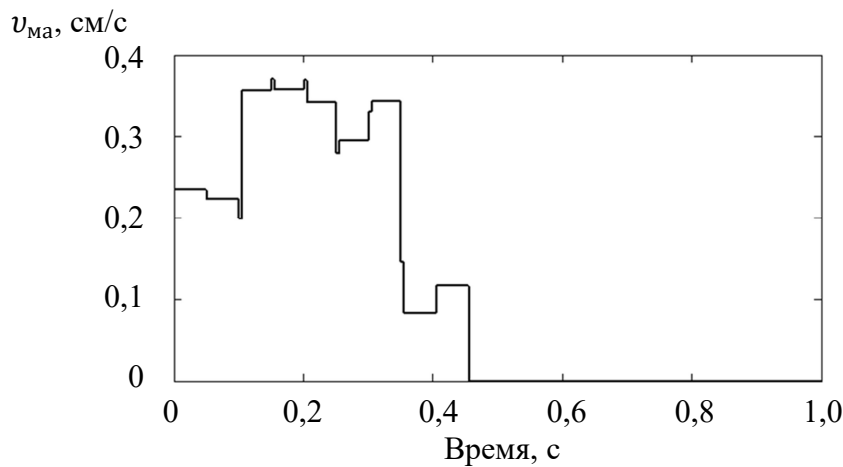


Рисунок 4.5 – Зависимость аппроксимации вертикальной компоненты скорости смещения от времени для экспериментального взрыва [145]

На рисунке 4.6 приведены зависимости огибающей скорости смещения от времени, полученные с помощью фильтра низких частот ($f_{cp} = 10$ Гц). Анализ этих кривых приводит к выводу, что дополнительный пик скорости смещения в интервале 0,5...0,6 с не может быть объяснен сейсмическими волнами от взрыва, т.е. должен существовать дополнительный источник сейсмических волн, связанный с системой «грунт - охраняемый объект».

Доказательством этого служат графики, приведенные на рисунке 4.7, с модельными параметрами: $K_1 = 50$, $n_1 = 2$; $K_1 = 0,105$, $n_2 = 1,15$; $t_3 = 130$

В случае 5-го взрыва вклад волн II-го типа в модуль скорости смещения является основополагающим. По окончании промежутка времени, в течение

которого происходит генерация сейсмических волн взрывным источником, не наблюдается дополнительная сейсмическая активность.

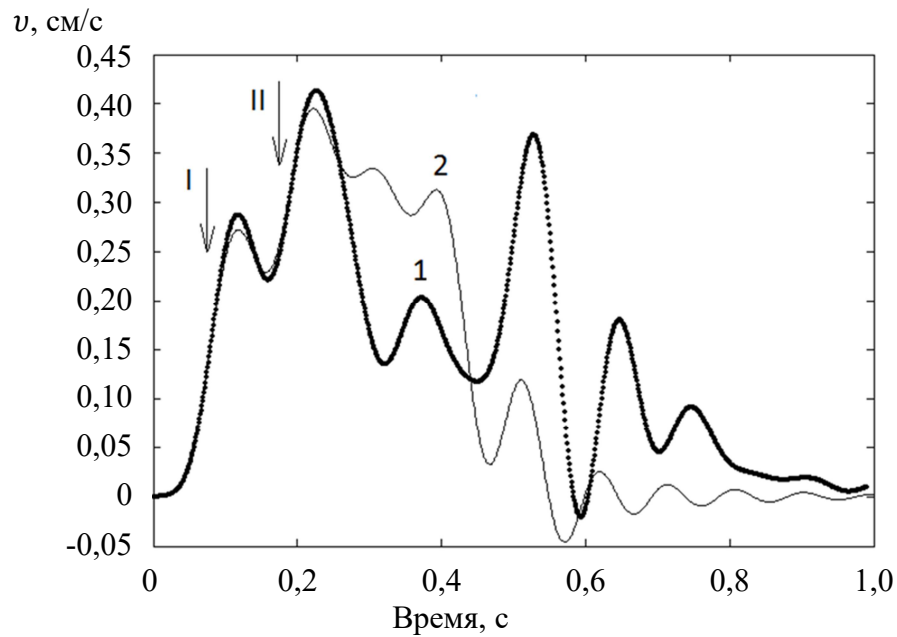


Рисунок 4.6 – Зависимости огибающей вертикальной компоненты скорости смещения от времени для экспериментального взрыва [145]: 1 – эксперимент; 2 – аппроксимация. Стрелки – вступления поверхностных СВВ I-го и II-го типа

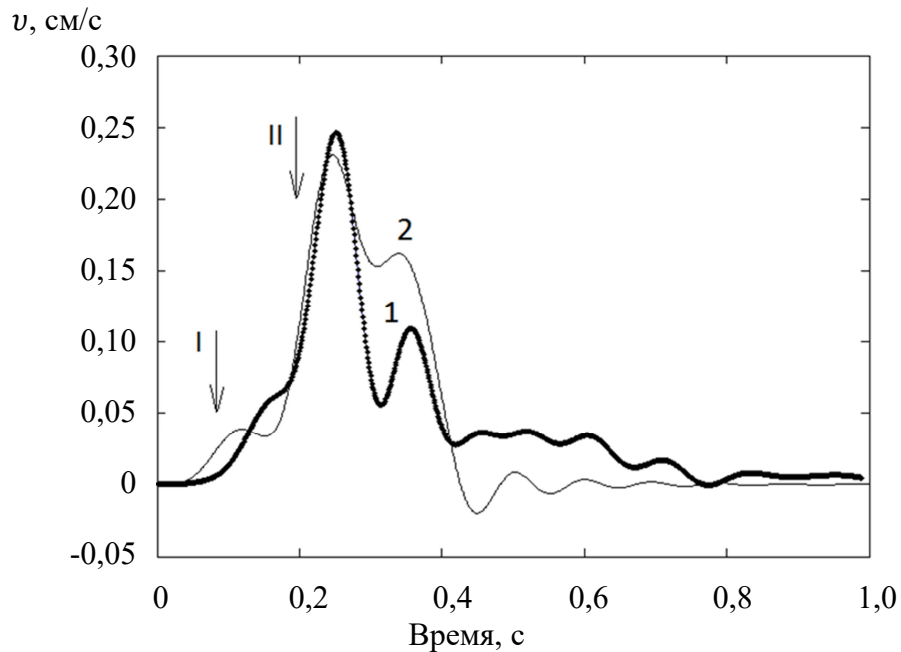


Рисунок 4.7 – Зависимости огибающей вертикальной компоненты скорости смещения от времени для 5-го взрыва (таблица 2.6) [145]: 1 – эксперимент; 2 – аппроксимация. Стрелки – вступления поверхностных СВВ I-го и II-го типа

Приведенные расстояния групп зарядов с максимальными массами зарядов взрывчатого вещества для рассмотренных взрывов отличаются не более чем на 7%. Это свидетельствует о том, что процесс превращения системы «грунт - охраняемый объект» в источник сейсмических колебаний носит нелинейный характер. Следовательно, не представляется возможным осуществить предварительный прогноз сейсмического воздействия всех взрывов на охраняемый объект с помощью рассмотренного подхода.

4.4 Аппроксимация волновых форм велосиграм, полученных от технологических взрывов на Ново-Широкинском руднике

При аппроксимации волновых форм велосиграм примем следующие параметры в выражении (4.4): $a = 0,026$; $b = 4$ согласно п. 4.2; $n = 2$ согласно п. 2.4.5. Исходя из средней длины колонки заряда взрывчатого вещества и средней скорости детонации гранулита АС-8, возьмем в качестве первого приближения длительность фазы сжатия $\tau' = 10$ мс. Тогда оценка частоты среза фильтра низких частот будет $f_{\text{ср}} < 1/(2\tau') = 1/(2 \cdot 0,01) = 50$ Гц. Примем значение затухания сейсмического сигнала в полосе задерживания фильтра низких частот равным $D_{\text{пз}} = 40$ дБ. Массу заряда взрывчатого вещества, приходящегося на k -ю ступень замедления, и момент времени срабатывания k -й ступени замедления возьмем из таблице 2.6.

На рисунке 4.8 представлены амплитудно-частотные характеристики велосиграм, полученные с помощью АЦП Е-330 (таблица 2.8) с разрешением 2 Гц. Из анализа амплитудно-частотных характеристик велосиграм следуют выводы:

1. Основные спектральные компоненты велосиграм, в основном, расположены в диапазоне частот 10-50 Гц за исключением спектрального комплекса 72-80 Гц в велосиграмме от V-го технологического взрыва;

2. Только для II-го технологического взрыва максимум спектра приходится на интервал частот 16-22 Гц, который можно сопоставить интервалу времени короткозамедленного взрывания. Для остальных взрывов интервал смещен в высокочастотную область 21-27 Гц и не зависит от расстояния до места ведения взрывных работ.

3. При малой вариации расстояния от охраняемого объекта до места ведения взрывных работ 300-312 м (технологические взрывы III-V) максимум спектра в области частот 21-27 Гц изменяется до 20 раз.

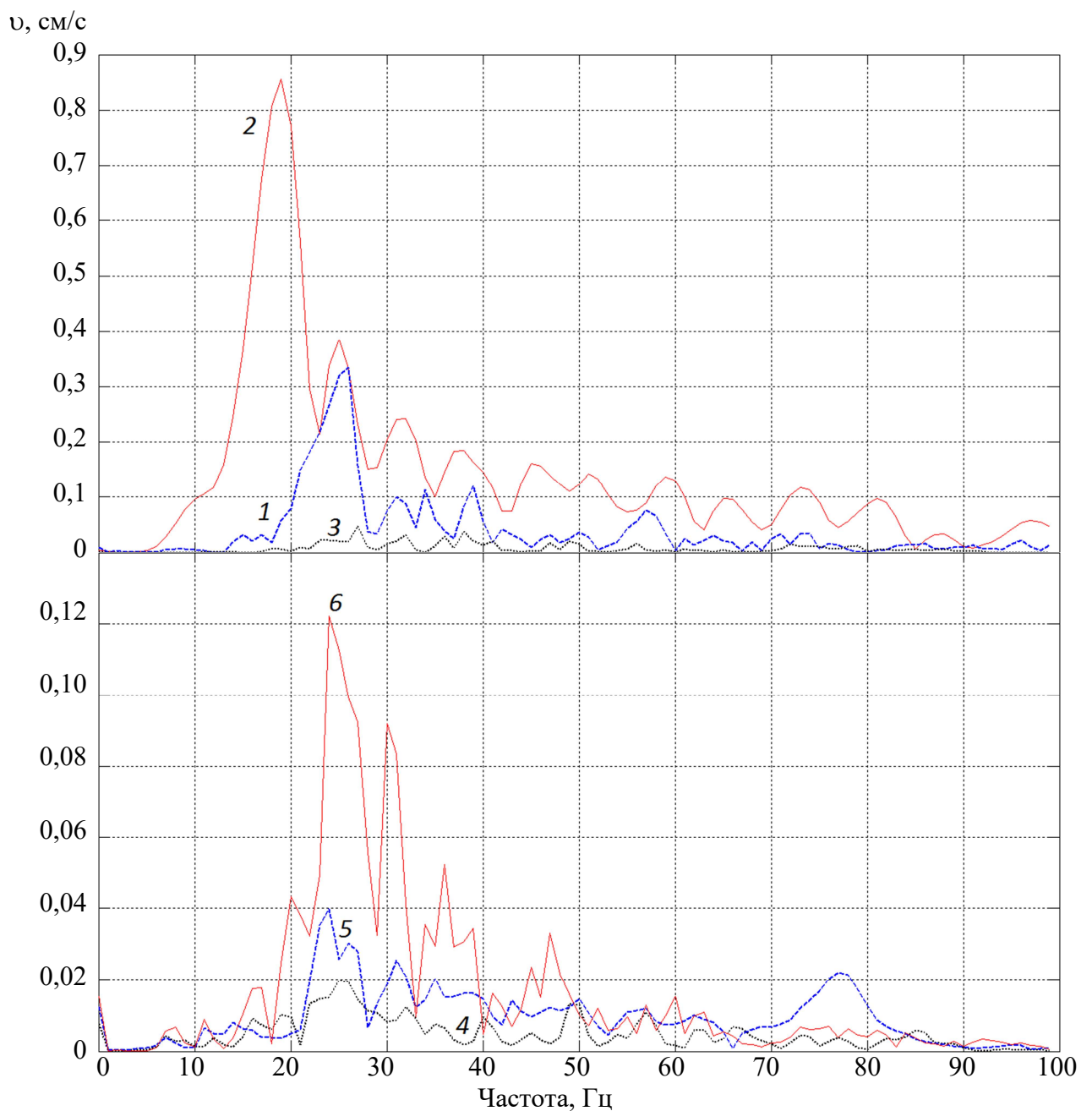


Рисунок 4.8 – Амплитудно-частотные характеристики велосиграм от взрывов.
Цифры соответствуют номеру взрыва в таблицах 2.6, 2.8

Из вышеизложенного следует, что имеет место технологический разброс времен срабатывания замедлителей взрывания. Поэтому фактический момент срабатывания k -й ступени замедления должен приниматься по результатам моделирования. Другие параметры $D_{\text{пп}}$ (затухание в полосе пропускания фильтра низких частот); v_0 (формула (4.2)); $\eta_{\text{пр}}$, η_R и $\tau_{\text{зад}}$ (формула (4.5)) выбираются из условия наилучшего согласия модельной и экспериментальной велосиграмм.

Ввиду быстро осциллирующего характера велосиграмм и большого количества подгоночных параметров разработка единого численного критерия наилучшего согласия представляет собой весьма трудную задачу. Поэтому ограничимся визуальным сравнением модельных и экспериментальных велосиграмм. Под критерием наилучшего согласия будем понимать следующие признаки по мере убывания их важности: наибольшее число согласующихся осцилляций по близости точек их пересечения с осью времени; соответствие амплитуд согласующихся осцилляций; соответствие огибающих модельных и экспериментальных велосиграмм.

Моделирование начинается с согласования начальных участков модельной и экспериментальной кривых путем подбора фактических моментов времени короткозамедленного взрывания до тех пор, когда этот подбор не перестанет улучшать степень согласия кривых. Затем производится подгонка времени задержки прихода поверхностных волн в заданную точку с дальнейшим подбором фактических моментов времени короткозамедленного взрывания. Заканчивается моделирование подгонками масштабирующего множителя и долей вклада поверхностных и продольных волн.

Амплитудно-частотные характеристики и фазочастотные характеристики для эллиптического фильтра низких частот 2-го порядка с актуальными параметрами ($f_{\text{ср}} = 39$ Гц, $D_{\text{пп}} = 21$ дБ, $D_{\text{пз}} = 40$ дБ) приведены на рисунке 4.9.

Как следует из рисунка 4.9, Амплитудно-частотные характеристики и фазочастотные характеристики имеют выраженный нелинейный вид. Наибольшее затухание в полосе пропускания наблюдается на ее границах, минимальное

затухание соответствует точке, лежащей на частоте примерно две трети полосы пропускания от ее начала.

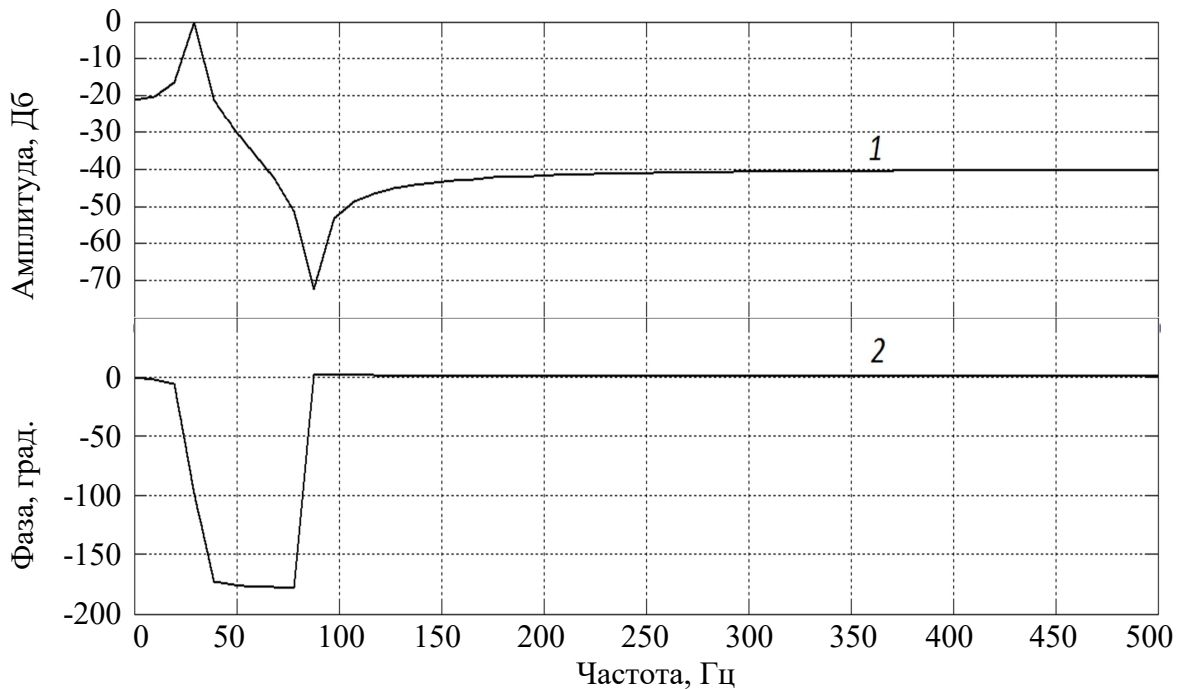


Рисунок 4.9 – Амплитудно-частотные характеристики (1) и фазочастотные характеристики (2) эллиптического фильтра низких частот

Результаты определения параметров волновых форм велосиграмм с помощью программы [115] представлены в таблице 4.1, их графики изображены на рисунках 4.10-4.11. Для уменьшения высокочастотных составляющих спектра экспериментальные кривые предварительно фильтровались с затуханием в полосе пропускания 3 Дб.

Из анализа таблицы 4.1 и рисунков 4.10-4.11 вытекают следующие предварительные выводы:

1. Применение фильтра низких частот 2-го и 4-го порядков практически не требует изменения модельных параметров велосиграмм. Различие заключается в необходимости корректировки частоты среза и затухания в полосе задерживания. При этом фильтр низких частот 2-го порядка ведет себя более устойчиво, что доказывается в случае фильтра низких частот 4-го порядка наличием высокочастотной осцилляции в области велосиграммы, в которой сигнал следует считать затухшим. Поэтому, при моделировании достаточно ограничиться использованием фильтра низких частот 2-го порядка;

Таблица 4.1 - Результаты моделирования волновых форм велосиграммы, полученных от массовых взрывов в подземных условиях на Ново-Широкинском руднике

Взрыв	Параметры ФНЧ			Параметры велосиграммы				Замедление взрывания, мс								
	порядок	$D_{пп},$ Дб	$f_{ср},$ Гц	$v_0,$ см/с	$\eta_{пр}$	η_R	$\tau_{зад},$ мс	50 ¹⁾	100	150	200	250	300	350	400	450
I	2	16	35	5,3	0,3	0,7	33	45 ²⁾	88	126	173	212	232	270	324	372
	4 ³⁾	16	39	4,4	0,35	0,65	33	45	88	126	173	212	232	275	325	375
II	2	13	35	24	0,5	0,5	13	48	92	152	207	-	-	-	-	-
	4	13	39	24	0,5	0,5	14	48	100	149	201	-	-	-	-	-
III	2	21	39	4	0,55	0,45	110	44	93	126	174	220	262	308	345	389
	4	21	40	4,4	0,5	0,5	110	45	92	126	169	216	259	302	344	388
IV	2	22	38	1,2	0,45	0,55	80	50	94	144	180	188	220	269	-	-
	4	21	40	1,2	0,5	0,5	80	50	94	144	180	188	220	268	-	-
V	2	22	38	3,8	0,17	0,83	84	51	69	90	-	-	-	-	-	-
	4	21	40	3,8	0,17	0,83	82	51	69	90	-	-	-	-	-	-
VI	2	21	39	5,2	0,5	0,5	66	46	82	124	176	202	249	300	-	-
	4	21	40	5,2	0,5	0,5	66	46	82	124	176	202	249	300	-	-
VI ⁴⁾	2	21	39	5,2	0,4	0,6	110	46	82	124	177	200	245	300	-	-
	4	21	40	5,2	0,4	0,6	110	46	82	124	177	200	245	300	-	-

Примечания:

- 1) значения замедлений в строке приведены согласно проекту;
- 2) значения замедлений, принятых согласно результатам моделирования;
- 3) при использовании эллиптических фильтров низких частот 4-го порядка величина затухания в полосе задерживания - $D_{пз} = 33$ Дб;
- 4) приведены модельные параметры, соответствующие критерию наилучшего согласия для разных значений подгоночного параметра $\tau_{зад}$.

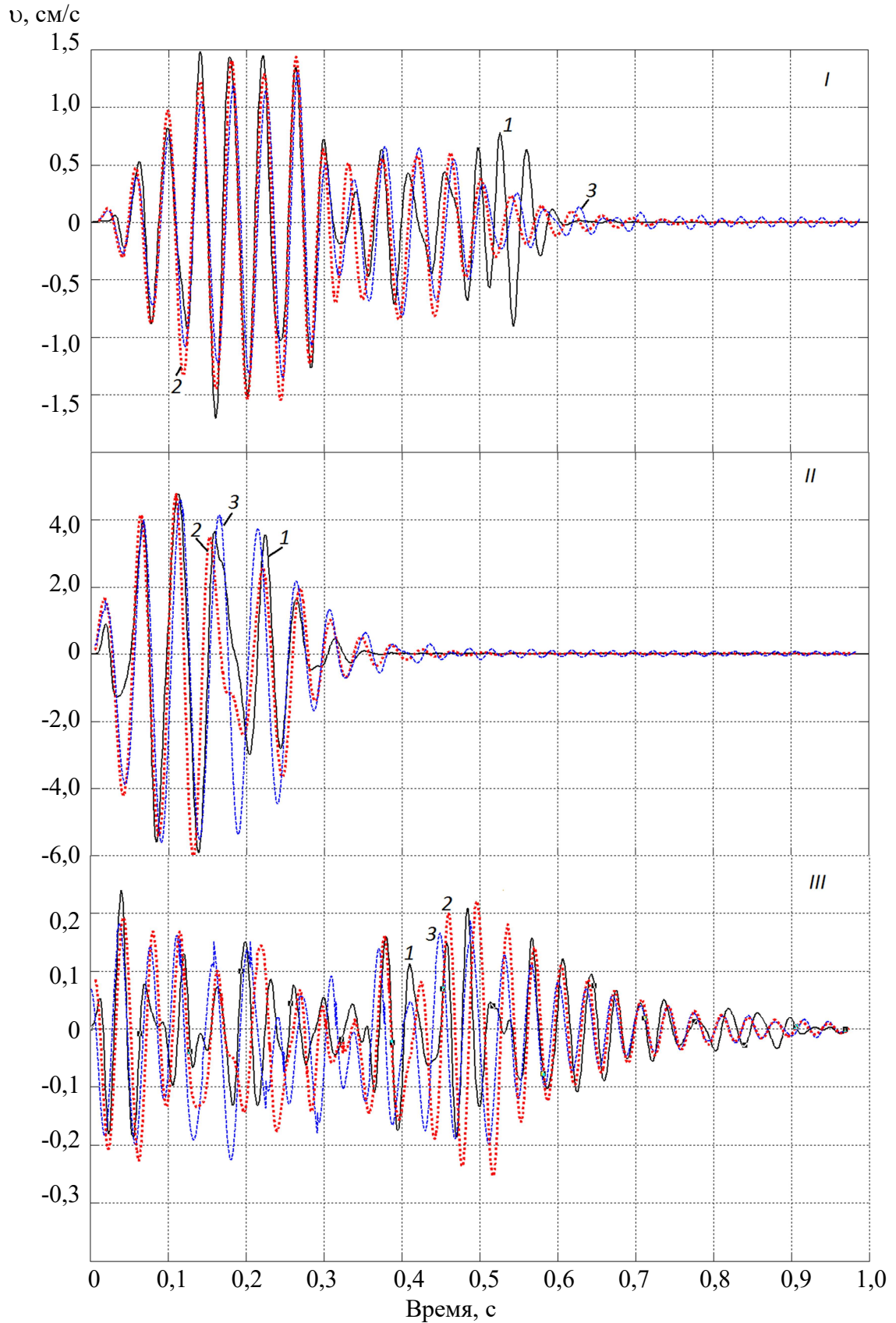


Рисунок 4.10 – Зависимости вертикальной компоненты скорости смещения от времени.
 1 – экспериментальная кривая; 2 – модельная кривая для фильтра низких частот 2-го порядка;
 3 – то же для фильтра низких частот 4-го порядка. Римские цифры соответствуют
 порядковому номеру взрыва (таблица 4.1)

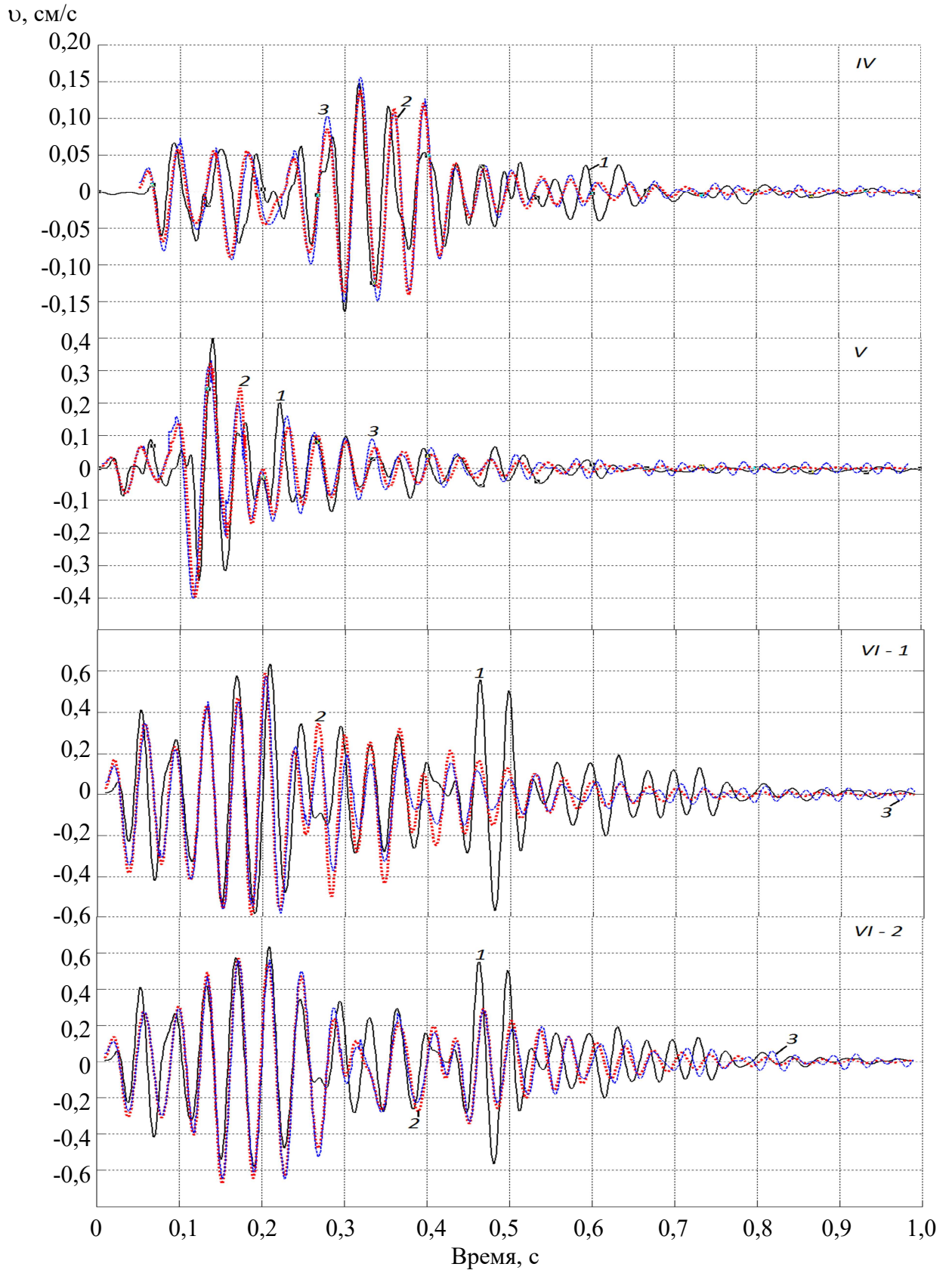


Рисунок 4.11 – Зависимости вертикальной компоненты скорости смещения от времени. «1», «2», «3»; римские цифры соответствуют обозначениям на рисунке 4.10.

VI-1 – модельные кривые при $\tau_{\text{зад}} = 66$ мс; *VI-2* – то же при $\tau_{\text{зад}} = 110$ мс

2. Имеет место весьма существенное отличие модельных и проектных времен замедлений взрывания. В отдельных случаях это означает, что отдельные ступени взрываются практически одновременно. Поэтому практическая ценность рассматриваемой методики заключается в выявлении аномалий сейсмического воздействия взрыва, связанных с технологическим разбросом параметров используемой системы короткозамедленного взрывания;

3. Сейсмическое воздействие взрыва характеризуется совместным воздействием объемных продольных и поверхностных СВВ примерно в равной пропорции. В отдельных случаях вклад поверхностных волн в сейсмическое воздействие взрыва оказывается более существенным (V-й взрыв);

4. Возможна ситуация неоднозначного определения времени задержки прихода поверхностных волн в заданную точку. В результате моделирования на примере VI-го взрыва были установлены подходящие комбинации параметра: $\tau_{\text{зад1}} = 66$ мс и $\tau_{\text{зад2}} = 100$ мс. Разность указанных значений равна 44 мс и близка к среднему значению интервала времени короткозамедленного взрывания: $300/7 \approx 43$ мс. Следовательно, отмеченная ситуация связана с периодичностью взрывания. Из более тщательного анализа следует, что при $\tau_{\text{зад1}} = 66$ мс модельные и экспериментальные кривые по осцилляциям практически совпадают, что нельзя утверждать при $\tau_{\text{зад2}} = 110$ мс.

Дадим физическую интерпретацию этого параметра. Регистрация велосиграм от III-го и последующих взрывов велась для расстояний 296-312 м, а значения времени задержки лежали в диапазоне 66-110 мс. Оценим время распространения продольных волн. В п. 2.4.5 получено среднее значение скорости распространения продольных волн 3,96 км/с. Примем среднее расстояние равным 304 м. Тогда оценка времени распространения продольных волн будет $\tau_{\text{пр}} = 77$ мс. Для того же расстояния оценим время распространения поверхностных волн. Среднее значение скорости распространения поперечных волн (п. 2.4.5) составляет 2,5 км/с. Для коэффициента Пуассона 0,25 значение скорости распространения поверхностных волн составляет 0,92 от значения

скорости распространения поперечных волн [55]. Тогда скорость распространения поверхностных волн будет 2,3 км/с. Соответствующая оценка времени распространения поверхностных волн даст $\tau_{\text{пов}} = 132$ мс. Из физических соображений следует, что время задержки не может быть меньше $\tau_{\text{пов}} - \tau_{\text{пр}} = 55$ мс. Этому условию удовлетворяют все рассматриваемые времена задержки. Согласно результатам моделирования огибающей скорости смещения для V-го и VI-го взрывов, проведенного в п. 4.3, времена задержки составили: $\tau_{\text{задV}} = 130$ мс, $\tau_{\text{задVI}} = 105$ мс. Эти результаты завышены на 39-46 мс по сравнению с аналогичными значениями согласно таблице 4.1: $\tau_{\text{задV}'} = 84$ мс, $\tau_{\text{задVI}'} = 66$ мс. Выявленное расхождение объясняется тем, что при моделировании огибающей скорости смещения принимались проектные времена замедления, которые оказались больше фактических. Если рассмотреть разности $\tau_{\text{задV}} - \tau_{\text{задVI}} = 25$ мс и $\tau_{\text{задV}'} - \tau_{\text{задVI}'} = 18$ мс, то в пределах погрешности моделирования (п. 4.6) получим похожие результаты. Следовательно, значение - $\tau_{\text{зад2}} = 110$ мс надо исключить из рассмотрения;

5. В велосиграммах, полученных от I-го, IV-го и VI-го взрывов наблюдаются уверенно регистрируемые аномально высокие значения скорости смещения во временной области, когда взрывной источник прекратил свое воздействие. Особенно выражено это явления в велосиграмме от VI-го взрыва. В интервале времен 0,45-0,75 с превышение значений экспериментальной скорости смещения над аналогичными значениями модельной скорости смещения составляет более 2-х раз (рисунок 4.11). Отмеченная аномалия надежно коррелирует с общей массой взрывчатого вещества, нежели с максимальной массой одновременно взрываемых зарядов взрывчатого вещества. Например, масса одновременно взрываемых зарядов взрывчатого вещества в V-м взрыве превышала аналогичную массу в I-м взрыве в 1,27 раза. Однако аномалия скорости смещения в велосиграмме от V-го взрыва практически не прослеживается, хотя аналогичная аномалия от I-го взрыва уверенно регистрируется в интервале времен 0,5-0,6 с. Из анализа таблицы 4.1 и

предыдущего вывода для III-го-VI-го взрывов так же следует корреляция между выраженностью аномалий и временем задержки $\tau_{\text{зад}}$: чем более выражена аномалия, тем меньше время задержки.

4.5 Прогноз сейсмического воздействия технологических взрывов на наземный охраняемый объект

В проблеме прогноза необходимо отдельно выделить задачу о влиянии интервалов времен короткозамедленного взрывания на сейсмический эффект взрыва. Практическая важность этой задачи связана с одной стороны с имеющим место технологическим разбросом моментов времени инициирования отдельных ступеней зарядов взрывчатого вещества, с другой – с корректностью приведения технологического взрыва по эквивалентной массе к одиночному взрыву. В первом случае речь идет о соответствии проектных параметров технологического взрыва фактическим параметрам как одному из важных требований промышленной безопасности. Во втором случае следует, по возможности, отказаться от формального сопоставления по сейсмическому фактору максимальной массы одновременно взрываемых зарядов взрывчатого вещества в технологическом взрыве массе одиночного взрыва взрывчатого вещества.

На рисунке 4.12 проиллюстрировано влияние разброса параметров короткозамедленного взрывания на сейсмический эффект взрыва.

Из рисунка 4.12 следует, что отклонение фактических интервалов от проектных интервалов замедления носит неоднозначный характер. Так, для V-го взрыва это не приводит к изменению пиковых значений скорости смещения, но происходит увеличение амплитуды скорости во временной области велосиграммы после окончания детонации взрывчатого вещества, т.е. имеет место временное перераспределение энергии сейсмических колебаний. Однако в случае IV-го взрыва наблюдается почти 3-х кратное увеличение пиковой скорости смещения.

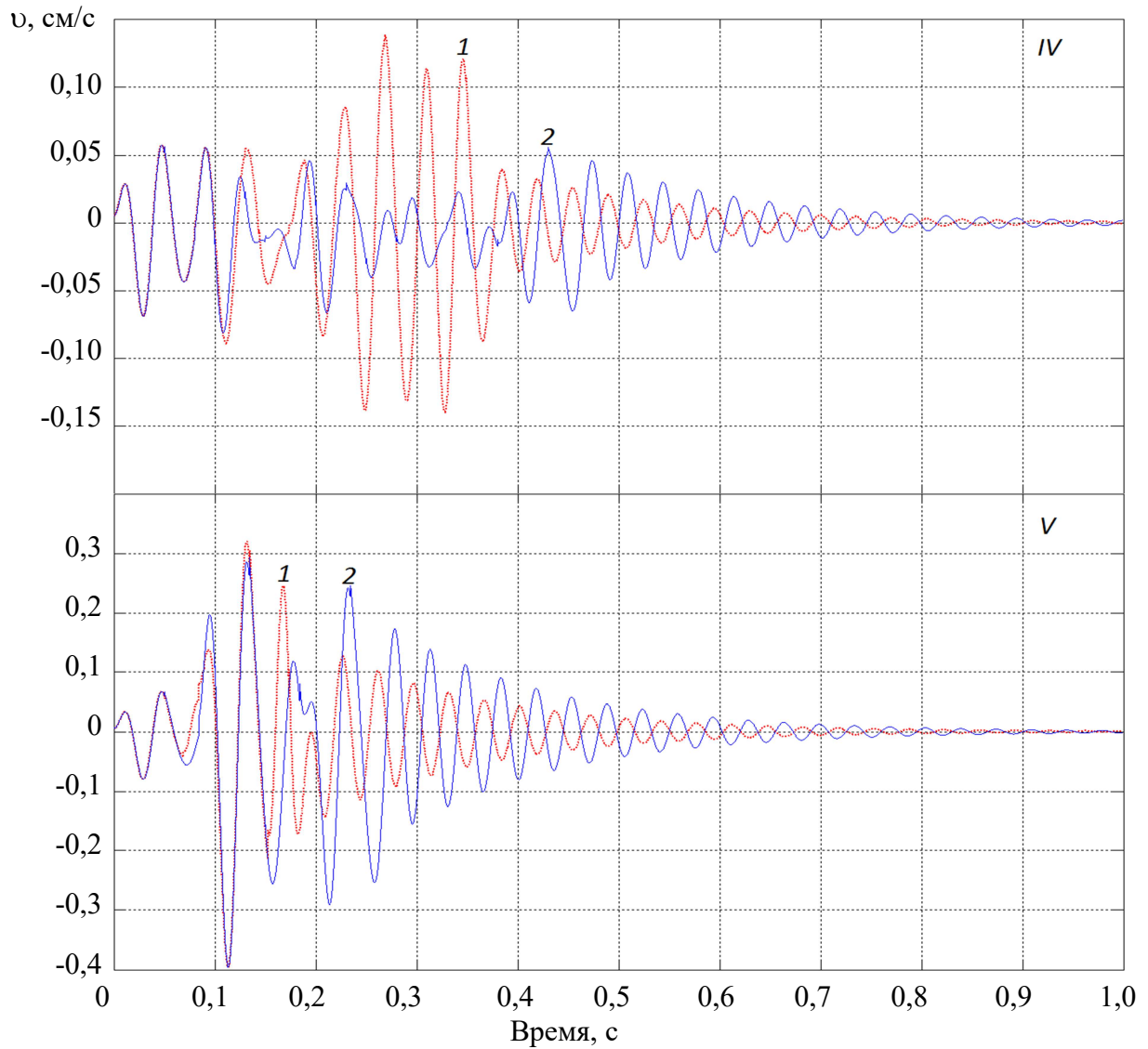


Рисунок 4.12 – Модельные велосигramмы. Интервалы замедления: 1- фактические; 2 – проектные. Римские цифры – номер массового взрыва

Оценим эквивалентный заряд IV-го массового взрыва для фактических интервалов замедления. Из формулы М.А. Садовского следует выражение (4.7):

$$Q_{\text{экв}} = Q_{\text{пр}} \left(\frac{v_{\text{ф}}}{v_{\text{пр}}} \right)^{\frac{3}{n}}, \quad (4.7)$$

где $Q_{\text{пр}}$ – максимальная проектная масса взрывчатого вещества на ступень замедления;

$\frac{v_{\text{ф}}}{v_{\text{пр}}}$ - отношение пиковой фактической скорости смещения к пиковой проектной скорости смещения (определяется по модельным велосигramмам).

Принимая $Q_{\text{пр}} = 360$ кг, $\frac{v_{\text{ф}}}{v_{\text{пр}}} = 3$ и показатель затухания сейсмических колебаний – $n = 2$, получим $Q_{\text{экв}} = 1871$ кг. Если учесть, что общая масса взрывчатого вещества, взрываема за массовый взрыв, составляет 2147 кг, то следует весьма неожиданный вывод: при отклонении параметров короткозамедленного взрывания от проектных значений технологический взрыв по сейсмическому воздействию может быть подобным одновременно взрываемым зарядам взрывчатого вещества [143].

Следует отметить, что в горной практике существует подход, когда для оценки сейсмического воздействия взрыва используется не максимальная масса одновременно взрываемых зарядов взрывчатого вещества, а полная масса взрывчатого вещества [225].

4.6 Оценка достоверности определения параметров велосиграмм

На рисунке 4.13 показано, как ошибка интервала короткозамедленного взрывания влияет на вид велосиграмм. Принят момент взрывания 5-й ступени III-го взрыва – 218 мс (оптимальный 220 мс при использовании фильтра низких частот 2-го порядка).

Анализ рисунка 4.13 показывает, что ошибочное значение момента взрывания не изменяет велосиграмму на начальном участке, но в средней части велосиграммы изменения довольно заметны. Если принять среднюю продолжительность интервала замедления – $389/9 \approx 43$ мс, то минимальная относительная погрешность интервала замедления будет – $2/43 \cdot 100\% \approx 5\%$.

На рисунке 4.14 показано влияние ошибки времени задержки прихода поверхностных волн. Принята задержка – 64 мс (оптимальное значение 66 мс при использовании фильтра низких частот 2-го порядка). Ситуация аналогична описанной выше. Относительная погрешность задержки прихода поверхностных волн оценивается величиной – $2/64 \cdot 100\% \approx 3\%$.

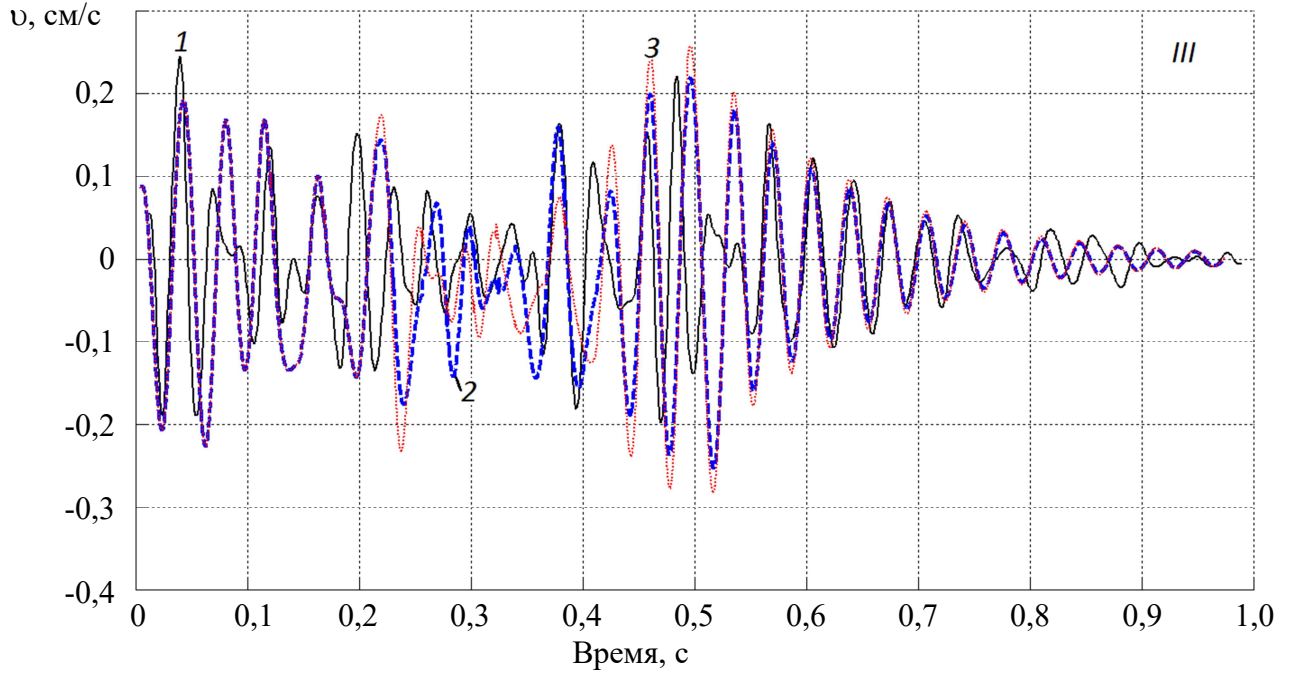


Рисунок 4.13 – Велосиграммы от III-го массового взрыва: 1- экспериментальная; 2 – модельная оптимальная; 3 – модельная с ошибкой момента времени взрыва

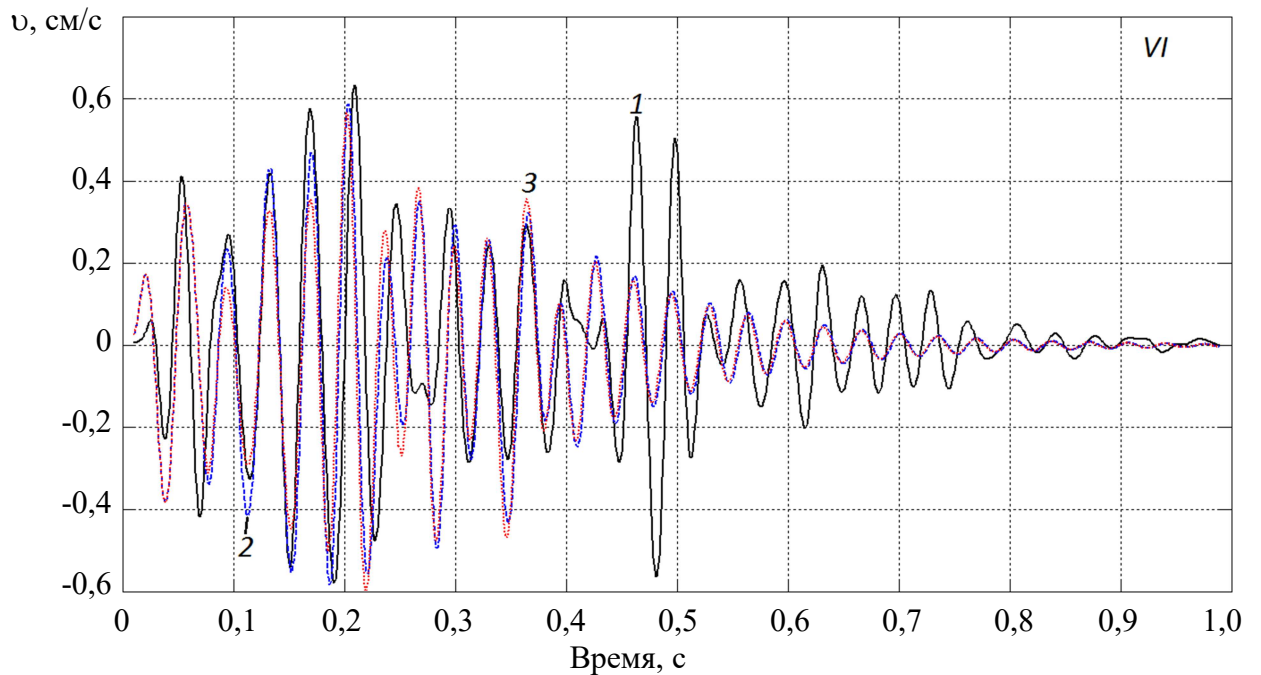


Рисунок 4.14 – Велосиграммы от VI-го экспериментального взрыва: 1- экспериментальная; 2 – модельная оптимальная; 3 – модельная с ошибкой времени задержки прихода поверхностных волн

На рисунке 4.15 показано влияние ошибки относительного вклада продольных (поверхностных) волн в амплитуду скорости результирующего колебания. Приняты значения параметров: $\eta_{\text{пр}} = 0,08$; $\eta_R = 1 - 0,08 = 0,92$ (оптимальные - $\eta_{\text{пр}} = 0,17$; $\eta_R = 0,83$ при использовании фильтра низких частот 2-го порядка). Ошибка в большей мере проявляется на начальном участке велосигранмы. Относительная погрешность параметров $\eta_{\text{пр}}$ и η_R может существенно различаться. Поэтому ограничимся абсолютной погрешностью этих параметров в диапазоне 0,08-0,1.

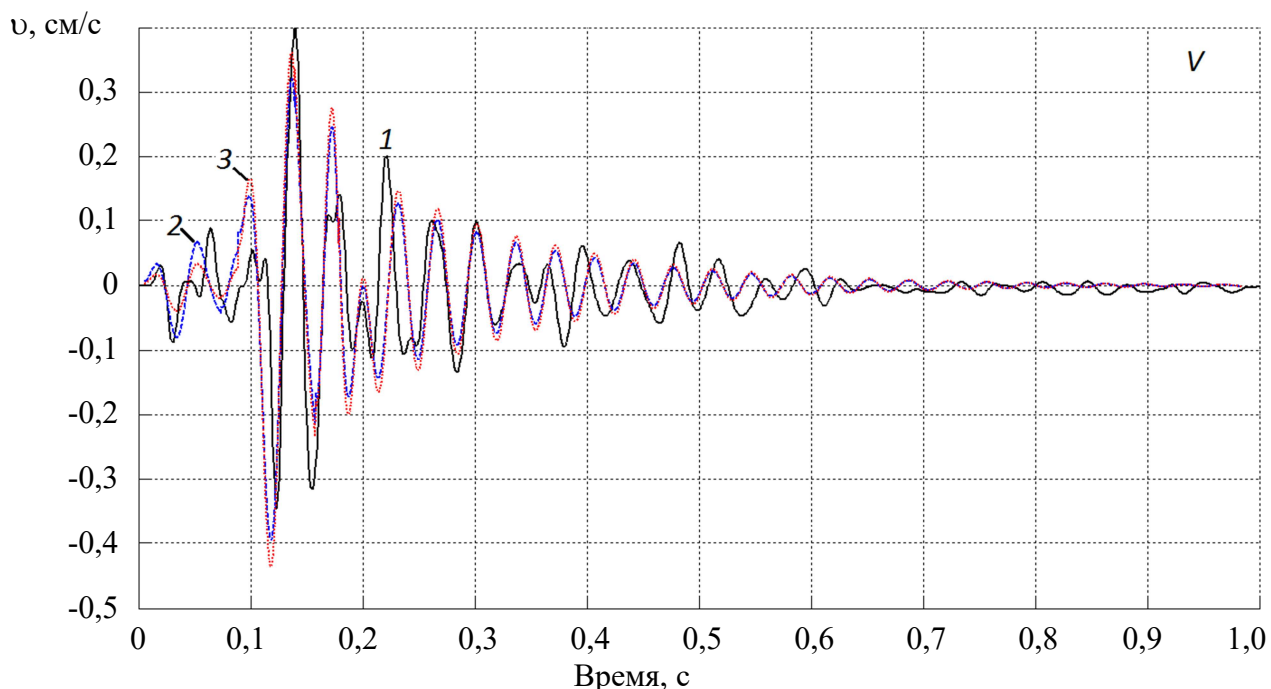


Рисунок 4.15 – Велосигранмы от V-го технологического взрыва:

1- экспериментальная; 2 – модельная оптимальная; 3 – модельная с ошибкой вклада продольных (поверхностных) волн в амплитуду скорости результирующего колебания

На рисунке 4.16 показано влияние ошибки частоты среза фильтра низких частот 2-го порядка. Принято значение частоты среза – 37 Гц (оптимальное – 38 Гц). Ошибка влияет на вид велосигранмы на конечном участке в виде характерного увеличения амплитуды скорости смещения. Относительную погрешность частоты среза примем на уровне 3%.

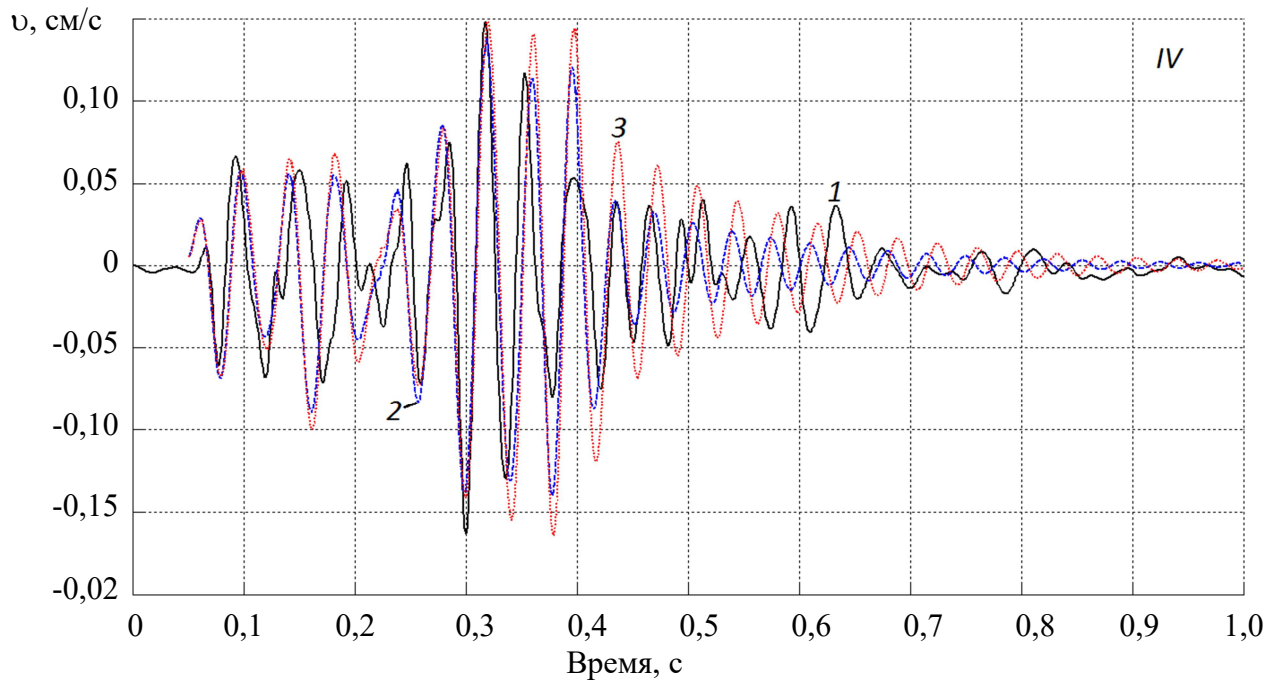


Рисунок 4.16 – Велосиграммы от IV-го технологического взрыва:

1- экспериментальная; 2 – модельная оптимальная; 3 – модельная с ошибкой частоты среза

На рисунке 4.17 показано влияние ошибки затухания сейсмического сигнала в полосе пропускания фильтра низких частот 2-го порядка. Принято значение затухания – 16 Дб (оптимальное – 13 Дб). Особенность этого параметра заключается в том, что его частично можно компенсировать изменением масштабирующего множителя ν_0 . Так, увеличение затухания на 3 Дб компенсируется увеличением масштабирующего множителя в 1,2 раза. Поэтому эти параметры необходимо рассматривать совместно. Тем не менее, ошибку затухания легко заметить по характерному изменению амплитуды скорости смещения на конечном участке велосиграммы.

В заключении рассмотрим влияние на вид велосиграммы длительности фазы сжатия. На рисунке 4.18.1 представлен входной сигнал, сформированный с помощью выражения (4.4), на рисунке 4.18.2 показано влияние ошибки длительности фазы сжатия. Принято значение длительности фазы сжатия – 15 мс (оптимальное – 10 мс). Особенность этого параметра заключается в том, что его изменение практически можно компенсировать масштабирующим множителем ν_0

и сдвигом всех моментов времени короткозамедленного взрыва на одно и то же значение. Так, увеличение длительности фазы сжатия компенсируется одновременным уменьшением масштабирующего множителя в 1,1 раза и всех моментов времени короткозамедленного взрыва на 5 мс. Таким образом, вариация длительности фазы сжатия не влияет на длительность модельных интервалов замедления, а сам параметр является малочувствительным.

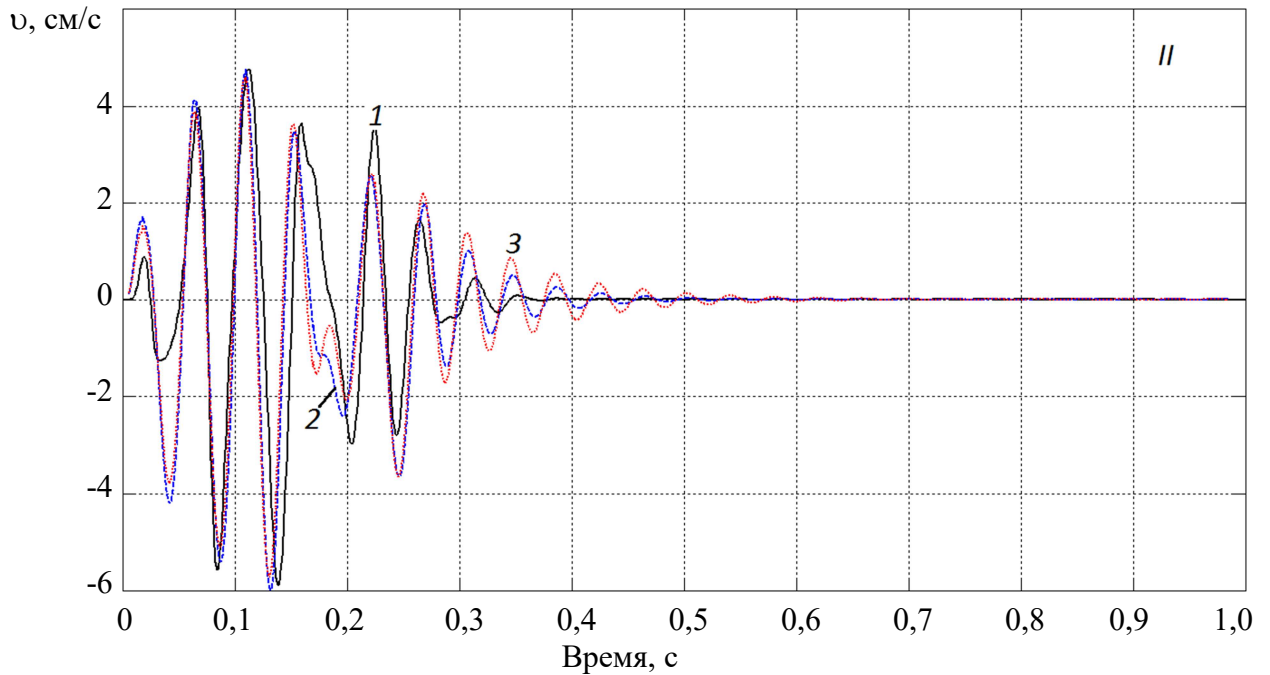


Рисунок 4.17 – Велосиграммы от II-го технологического взрыва:

1- экспериментальная; 2 – модельная оптимальная; 3 – модельная с ошибкой затухания сейсмического сигнала в пределах полосы пропускания фильтра низких частот

4.7 Прогноз сейсмической обстановки перед обрушением кирпичной кладки

Вернемся к обсуждению anomalно высоких значений скорости смещения во временной области, когда взрывной источник прекратил свое воздействие. Разумно предположить, что физическим объяснением этого явления служит временная аккумуляция энергии сейсмических колебаний породным массивом, так как аномалии регистрируются в разных точках трассы распространения сейсмического сигнала. Поэтому, породный массив будем рассматривать в

качестве дополнительного источника сейсмических колебаний. В первом приближении взрывной источник можно считать квазипериодическим с частотой генерации сейсмических колебаний примерно 25 Гц. Так как колебания в аномальной зоне происходят с той же частотой, то создаются предпосылки резонанса в системе «грунт – охраняемый объект».

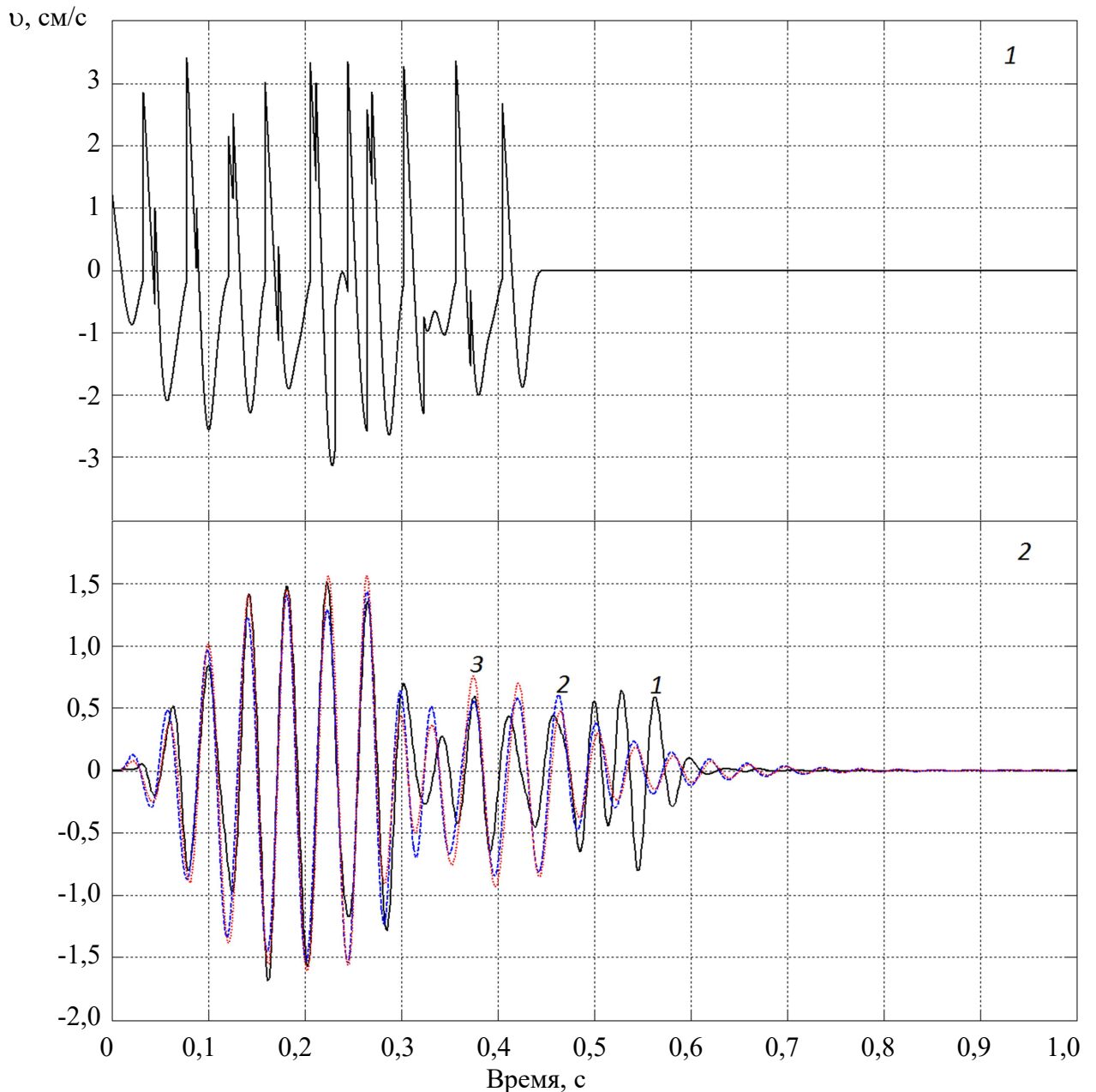


Рисунок 4.18 – 1. Кривая входного сигнала для эллиптического фильтра низких частот для моделирования велосигрмм от I-го технологического взрыва [204]; 2. Велосигрмм от I-го технологического взрыва (1- экспериментальная; 2 – модельная оптимальная; 3 – модельная с ошибкой длительности фазы сжатия)

Поскольку точная природа резонанса не известна, то примем более жесткие условия изменения амплитуды скорости, как при параметрическом резонансе [204]. Из теории параметрического резонанса следует, что изменение амплитуды происходит по показательному закону [167]. Учитывая, что дополнительный источник начинает работать после окончания взрывного источника, то для описания процесса примем следующее уравнение регрессии (4.8):

$$\ln\left(\frac{v_{\text{эксп}}}{v_{\text{м}}}\right) = a \cdot Q_{\Sigma} + b, \quad (4.8)$$

где a , b – коэффициенты регрессии;

$\frac{v_{\text{эксп}}}{v_{\text{м}}}$ – отношение амплитуд экспериментальной и модельной амплитуд скорости смещения в аномальной области велосиграммы.

Результаты расчета $\frac{v_{\text{эксп}}}{v_{\text{м}}} = f(Q_{\Sigma})$ в линейных координатах на основе данных по I-у, IV-у и VI-у взрывам показаны на рисунке 4.19.

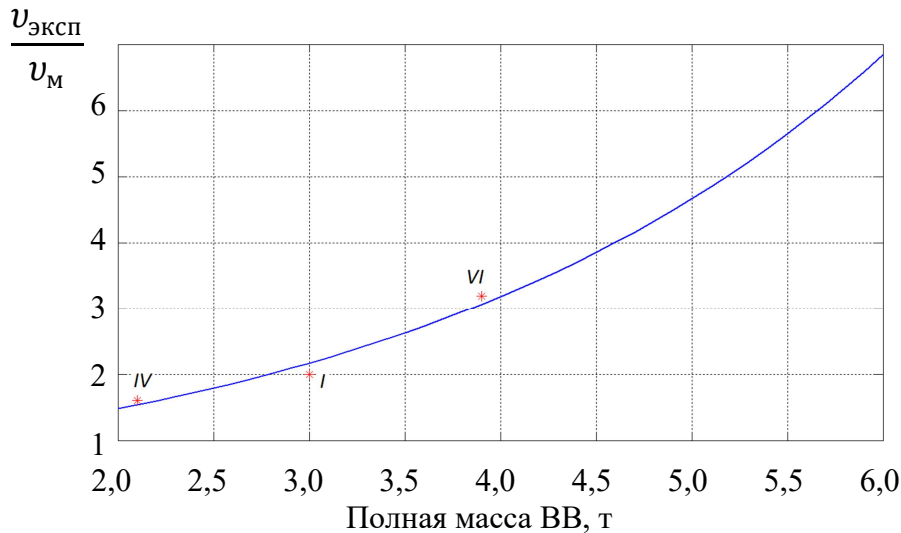


Рисунок 4.19 – Зависимость отношения амплитуд экспериментальной и модельной скорости смещения от полной массы взрывчатого вещества. Римскими цифрами отмечены экспериментальные точки соответствующих взрывов

Рассмотрим сейсмическую обстановку в районе здания административно-бытового комплекса перед обрушением кирпичной кладки стены. Технологический взрыв был произведен 08.03.2010 с параметрами буровзрывных работ: максимальная масса взрывчатого вещества на ступень замедления 1946 кг, суммарная масса взрывчатого вещества – 5052 кг. Расстояние от взрыва до

аварийной части здания административно-бытового комплекса составило 277 м. Следовательно, приведенное расстояние: $R/\sqrt[3]{Q} = 277/\sqrt[3]{1946} = 22,2 \text{ м/кг}^{1/3}$.

На рисунке 4.20 приведен график линейной регрессии для пиковых значений вертикальной компоненты скорости смещения. С 95% надежностью получены параметры линейной регрессии: коэффициент сейсмичности $K = 607_{-340}^{+740}$, показатель затухания $n = 1,99 \pm 0,25$; коэффициент корреляции $r^2 = 0,95$. На рисунке показана верхняя граница доверительного интервала для индивидуальных значений скорости смещения согласно уравнению (4.9):

$$v_{\text{пв}} = 1180(R/\sqrt[3]{Q})^{-1,99}. \quad (4.9)$$

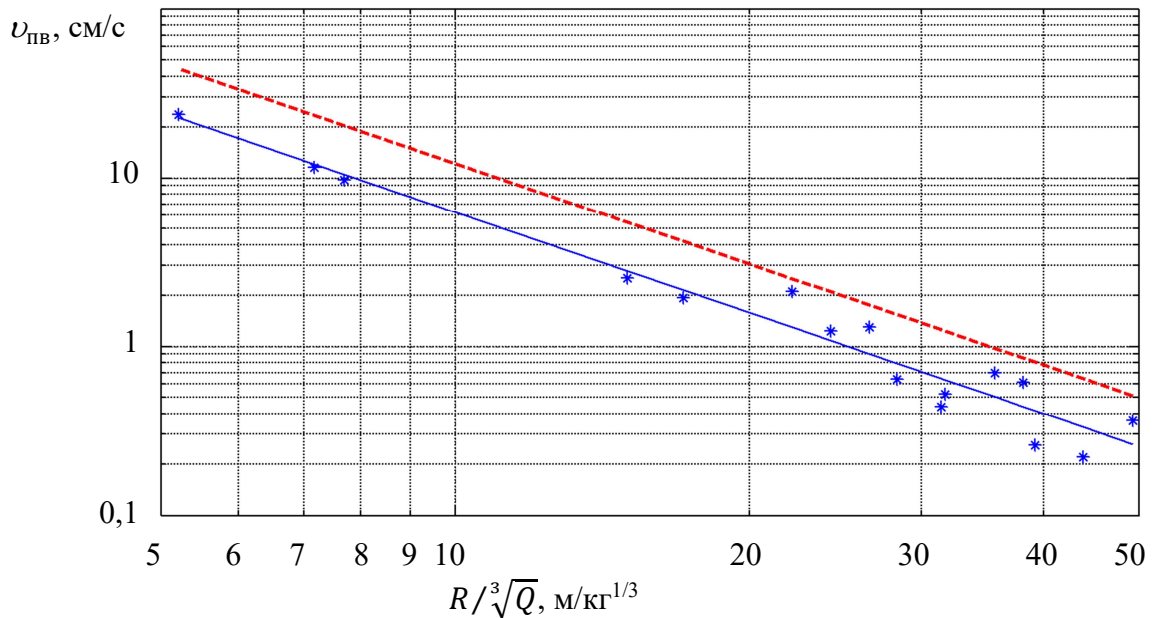


Рисунок 4.20 – Зависимости пиковой вертикальной компоненты скорости смещения от приведенного расстояния: линия регрессии (сплошная линия); линия верхней границы доверительного интервала для индивидуальных значений (пунктир). «*» - эксперимент

С учетом того, что величина максимальной векторной скорости смещения в 1,35 раза больше пикового значения вертикальной компоненты скорости смещения, ее прогнозная оценка будет $v_{\text{пр1}} = 1,35 \cdot 607 \cdot 22,2^{-1,99} = 1,7 \text{ см/с}$. Если провести оценку скорости смещения от дополнительного источника, то получим $v_{\text{пр2}} = 1,7 \cdot 4,8 \cdot \frac{1}{3} = 2,8 \text{ см/с}$. Согласно рисунку 4.20 для суммарной

массы взрывчатого вещества 5052 кг $\frac{v_{\text{эксп}}}{v_{\text{м}}} = 4,8$. Коэффициент « $\frac{1}{3}$ » появляется из-за того, что при регистрации велосигramмы для вертикальной компоненты скорости смещения от экспериментального взрыва наблюдалось равенство пиковых значений скоростей от обоих источников при $\frac{v_{\text{эксп}}}{v_{\text{м}}} = 3$.

Полученная оценка $v_{\text{пр2}}$ почти в 3 раза превышает допустимую скорость смещения охраняемого объекта (п. 2.4.1) и практически соответствует оценке по формуле (4.9) $v_{\text{пр3}} = 1,35 \cdot 1180 \cdot 22,2^{-1,99} = 3,3$ см/с. Таким образом, предельное значение уровня сейсмического воздействия соответствует равенству пиковых значений скоростей смещения сейсмического отклика системы «здание-грунт» и взрывного источника.

4.8 Принцип минимизации сейсмического воздействия технологических взрывов на основе выбора линии наименьшего сопротивления

Известен подход к проектированию зарядов взрывчатого вещества на основе использования теории, разработанной К.С. Ливингстоном [15]. Согласно этой теории оптимальное значение линии наименьшего сопротивления, при которой обеспечивается наилучшее дробление горной породы при минимальных уровнях СВВ и УВВ при взрыве сосредоточенного заряда взрывчатого вещества, определяется в виде (4.10):

$$W = \Delta \cdot E^3 \sqrt{Q}, \quad (4.10)$$

где E - коэффициент энергии деформации (для хрупких горных пород $E = 4...5$); Δ - величина, показывающая какую долю от предельной глубины заложения заряда, при которой на поверхности массива начинают образовываться трещины, должна составлять линия наименьшего сопротивления для формирования воронки выброса.

Согласно теории К.С. Ливингстона для определения оптимального значения линии наименьшего сопротивления необходимо провести серию опытных

взрывов с различной глубиной заложения заряда взрывчатого вещества. Эту методику можно упростить, если изучить динамическое воздействие на массив в наблюдательных скважинах от взрыва одиночного заряда взрывчатого вещества, помещенного во взрывную скважину.

В основу методики к выбору оптимального значения линии наименьшего сопротивления положим формулу М.А. Садовского. Согласно [139] при скоростях смещения $v_{п}=1,3-1,5$ м/с происходит интенсивное трещинообразование в скальном массиве. Гарантированное дробление массива получается, если принять скорость смещения в виде $v_{др} = (1,5 \dots 2) \cdot v_{п}$, что практически соответствует отношению предельной глубины заложения заряда к линии наименьшего сопротивления $v_{п}/v_{др} \approx \Delta$. При $W = R$ [142] формула М.А. Садовского примет вид (4.11):

$$W = \sqrt[3]{Q}(K/v_{др})^{1/n}. \quad (4.11)$$

Сопоставляя выражения (4.10) и (4.11), заметим, что $(K/v_{др})^{1/n} = \Delta \cdot E$. По физическому смыслу коэффициент сейсмичности и показатель затухания являются характеристиками энергии деформации. Поэтому, рассматриваемые подходы к определению оптимального значения линии наименьшего сопротивления являются эквивалентными.

Следует отметить, что величина $v_{др}$ является инвариантной по отношению к физико-механическим свойствам массива. Это легко показать из следующих рассуждений. Необходимым условием разрушения массива является превышение прилагаемой нагрузки предела прочности. В приближении плоской сейсмической волны существует простое выражение для разрушающего напряжения (предела прочности породы при растяжении) (4.12):

$$\sigma_p = \rho \cdot C_p \cdot v_{др}. \quad (4.12)$$

Произведение первых двух множителей в выражении (4.12) - плотности горной породы на скорость продольной сейсмической волны есть акустический импеданс, т.е. физико-механическая характеристика разрушаемой горной породы.

Третий множитель является характеристикой нагружения породного массива и относится к параметрам буровзрывных работ.

С практической точки зрения для опытного взрыва удобно использовать сосредоточенный заряд взрывчатого вещества [142]. Однако для скважинной отбойки руды применяется удлиненный заряд. Это обстоятельство легко учесть в формуле (4.11), если вместо величины Q подставить отношение $Q_{\text{СКВ}}/Q_{\text{СЗ}}$, где $Q_{\text{СКВ}}$ - масса заряда в скважине, $Q_{\text{СЗ}}$ - масса сосредоточенного заряда в скважине того же диаметра. Тогда скорректированная формула (4.11) примет следующий вид (4.13):

$$W = \sqrt[3]{Q_{\text{СКВ}}/Q_{\text{СЗ}}} (K/\nu_{\text{др}})^{1/n}. \quad (4.13)$$

Для вычисления величины линии наименьшего сопротивления необходимо получить значения параметров K и n для расстояний, соизмеримых с линией наименьшего сопротивления в разрушаемом массиве. Регистрация кинематических параметров СВВ в ближней зоне ($20R_3 \dots 30R_3$) на различных расстояниях от центра взрыва позволяет учесть диссипативные потери, которые характеризуют энергию, необходимую для разрушения горной породы. Результаты определения скоростей смещения методом акселерометрии представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Результаты определения пиковых значений скоростей смещения рудного тела [142]

Параметр	ИС №1	ИС №2	ИС №3
Расстояние, м	1,1	2,2	3,3
Скорость, м/с	4,8	0,81	0,23

Скорость распространения продольных СВВ определялась согласно методике, изложенной в п. 2.4.5 (рисунок 2.18), и составила 4,58 км/с. С учетом выражения (4.12) получим оценку предела прочности породы при растяжении: $\sigma_p = \rho \cdot C_p \cdot \nu_{\text{др}} = 2900 \cdot 4,58 \cdot 10^3 \cdot 1,5 \cdot 1,5 \approx 30$ МПа.

По данным таблицы 4.2 получены следующие значения параметров: $K = 670$, $n = 2,8$. По формуле (4.13) оценим границы изменения величины линии наименьшего сопротивления для 60%-го заполнения скважины ($Q_{\text{скв}} = 6$ кг для взрывной скважины глубиной 1 м):

- для $v_{\text{др}} = 200$ см/с: $W = \sqrt[3]{6/1} (670/200)^{1/2,8} = 2,8$ м;

- для $v_{\text{др}} = 300$ см/с: $W = \sqrt[3]{6/1} (670/300)^{1/2,8} = 2,4$ м.

Исходя из приведенных расчетов, среднее значение величины линии наименьшего сопротивления составляет $W = 2,6$ м. Принятое значение линии наименьшего сопротивления на руднике – $W = 2$ м. Таким образом, с одной стороны скорректированные параметры буровзрывных работ позволили уменьшить их объем, по крайней мере, на 30%. С другой стороны, уменьшение удельного расхода взрывчатого вещества позволяет минимизировать сейсмическое воздействие технологических взрывов на охраняемый объект.

4.9 Выводы по Главе 4

1. Создана теоретическая модель обнаружения резонансных сейсмических воздействий, позволяющая из анализа велосиграмм, зарегистрированных на земной поверхности при подземном взрывании, выявлять сейсмическую активность в системе «грунт-охраняемый объект» и отклонения интервалов времени короткозамедленного взрывания от номинальных значений.

2. В результате исследования ускорения смещения рудного тела методом акселерометрии получены параметры модельной функции скорости смещения $a = 0,026$, $b = 4$, с помощью которых устанавливается продолжительность фазы растяжения горной породы.

3. Моделированием огибающей модуля скорости смещения доказано существование дополнительного источника сейсмических колебаний, связанного с системой «грунт-охраняемый объект».

4. Сравнением модельных и экспериментальных велосиграмм от технологических взрывов показана корректность и установлена практическая достаточность применения эллиптических фильтров низкой частоты 2-го порядка.

5. Показано, что уровень активности дополнительного источника сейсмических колебаний сильно коррелирует с общей массой взрывчатого вещества в технологическом взрыве и временем задержки прихода поверхностных СВВ в точку наблюдения.

6. Определены ошибки параметров при моделировании волновых форм велосиграмм: минимальная относительная погрешность интервала замедления 5%; относительная погрешность задержки прихода поверхностных волн 3%; абсолютная ошибка относительного вклада продольных (поверхностных) СВВ в амплитуду скорости результирующего колебания 0,08-0,1; относительная погрешность частоты среза эллиптического фильтра 3%.

7. Установлено, что предельное значение уровня сейсмического воздействия, до которого обеспечивается безопасность охраняемого объекта, соответствует равенству пиковых значений скоростей смещения от взрывного и дополнительного источников сейсмических колебаний.

8. Минимизация сейсмического воздействия массовых взрывов обеспечивается путем выбора линии наименьшего сопротивления по данным акселерометрии от одиночного взрыва взрывчатого вещества и позволяет уменьшить объем буровзрывных работ до 30%.

Основные материалы главы 4 опубликованы в работах [115, 142, 143-145, 204].

ГЛАВА 5 НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА КОЛЕБАНИЙ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ СОВМЕСТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НИХ СЕЙСМОВЗРЫВНЫХ И УДАРНЫХ ВОЗДУШНЫХ ВОЛН

Исследовались характеристики объектов: колебания жилого дома, источником которых служили УВВ от взрывных работ по утилизации боеприпасов наружных зарядов взрывчатого вещества на территории военного полигона, расположенного вблизи п. Кирилловское и п. Семиозерье Выборгского района Ленинградской области; колебания обогатительной фабрики №16 при динамическом воздействии на нее массовых взрывов, взрывов наружных зарядов взрывчатого вещества, произведенных на карьере «Нюрбинский».

5.1 Теоретические положения способа аппроксимации эпюр колебательной скорости здания при воздействии на него ударных воздушных волн

Прогноз поведения наземных сооружений на динамическое воздействие взрывных работ невозможен без знания собственных колебательных мод объекта. Теоретический анализ спектрального состава колебаний весьма затруднителен ввиду многофакторности постановки исходной задачи. На практике часто применяется упрощенный подход, основанный на использовании данных: высота здания, его горизонтальное сечение, материал строительных конструкций, тип конструкции, характер и количество проемов в несущих конструкциях, тип фундамента, физико-механические свойства грунтов и др.

При этом практически невозможно учесть распределение дополнительных нагрузок после введения здания в эксплуатацию. Кроме того, грунты, лежащие в основаниях зданий и сооружений, не отличаются временным постоянством физико-механических свойств, особенно, если они представлены осадочными или полускальными горными породами. Задача прогноза упрощается, если известны

характеристики импульсного воздействия и отклика на него [203]. Тогда в первом приближении спектральный состав колебательных мод объекта находится как решение дифференциального уравнения 2-го порядка (5.1):

$$\frac{d^2X}{dt^2} + 2\beta_i \frac{dX}{dt} + \omega_i^2 X = f(t), \quad (5.1)$$

где t – время; $X \equiv x_i(t)$ – колебательное смещение;

$\frac{dX}{dt} \equiv v_i(t)$ – колебательная скорость;

$\frac{d^2X}{dt^2} \equiv a_i(t)$ – колебательное ускорение;

$f(t)$ – приведенная по массе вынуждающая сила;

β_i – коэффициент затухания;

ω_i – круговая частота затухающих колебаний.

Для указанных параметров индекс « i » относится к i -й колебательной моде. В случае малых затуханий частота затухающих колебаний примерно равна частоте собственных колебаний объекта.

Будем рассматривать общее решение для колебательной скорости на основе применения принципа линейной суперпозиции (5.2):

$$v(t) = \sum_{i=1}^n v_i(t), \quad (5.2)$$

где n – количество колебательных мод, характеризующее в «полной мере» динамические свойства охраняемого объекта.

Этот параметр – неизвестная величина, устанавливаемая при условии наилучшего согласия моделируемой и экспериментальной кривых колебательной скорости $v(t)$ и $v_{\text{эксп}}(t)$ соответственно. Справедливость формулы (5.2) есть следствие сложения колебаний одного направления. Поэтому для нахождения колебательной скорости в явном виде требуется решить n раз уравнение (5.1). Поскольку приведенная вынуждающая сила возбуждает все n – колебательных мод, то для нее также справедлив принцип линейной суперпозиции (5.3):

$$f(t) = \sum_{i=1}^n C_i \cdot f(t), \quad (5.3)$$

где C_i – доля вынуждающей силы, участвующей в возбуждении i -й колебательной моды.

Из выражения (5.3) вытекает условие нормировки (5.4):

$$\sum_{i=1}^n C_i = 1. \quad (5.4)$$

После прекращения действия вынуждающей силы решение для i -й колебательной моды аппроксимируется уравнением затухающих колебаний (5.5):

$$v_{zi}(t) = A_i \cdot \exp(-\beta_i t) \cdot \sin(\omega_i t + \varphi_i), \quad (5.5)$$

где A_i – амплитуда свободных колебаний;

φ_i – начальная фаза.

Параметры A_i и φ_i определяются как результат аппроксимации функции $v_i(t)$ функцией $v_{zi}(t)$. Параметры ω_i , β_i одинаковы для функций $v_i(t)$ и $v_{zi}(t)$.

5.2 Исследование воздействия ударных воздушных волн на жилой дом

Источником УВВ служили взрывные работы по утилизации боеприпасов наружными зарядами взрывчатого вещества на территории военного полигона, расположенного вблизи п. Кирилловское и п. Семиозерье Выборгского района Ленинградской области. Исследование проводилось в рамках экспертизы на соответствие уровня воздействия УВВ на жилые здания поселений нормам по избыточному давлению на фронте УВВ. Основанием для экспертизы послужило письмо Военной прокуратуры Выборгского гарнизона № 2509 от 26.07.2012 г. Экспертной организацией выступил Горный университет.

Фактическим местом проведения исследований являлась крыша жилого панельного пятиэтажного дома, расположенного по адресу: п. Семиозерье, ул. Центральная, д. 53. Визуальный осмотр здания не выявил дефектов несущих конструкций. Измерения проводились сейсмической станцией Blastmate III. Микрофоном регистрировалось избыточное давление, сейсмическим датчиком – колебания крыши здания (рисунок 5.1). Приборы устанавливались на выходе вентиляционной шахты. Микрофон и радиальная компонента сейсмического датчика ориентировались в направлении на место проведения ВР. Запуск

регистрации производился или по превышению порога давления (10 Па), или по превышению порога колебательной скорости (5 мм/с).



Рисунок 5.1 – Расположение микрофона и сейсмического датчика

По факту выяснилось, что направление распространения УВВ оказалось практически нормальным к фронтальной поверхности здания. Пиковое избыточное давление на фронте УВВ находилось в диапазоне 50,3-129 Па. Фоновое давление воздуха при порывах ветра не превышало 11 Па. Пиковое значение наиболее интенсивной радиальной компоненты колебаний здания лежало в интервале 3-8 мм/с. На рисунке 5.2 приведены эпюры УВВ.

Анализ колебательных мод здания проводился для 3-х эпюр избыточного давления на фронте УВВ (рисунок 5.2). Пиковое значение избыточного давления наблюдалось в отрицательной фазе (разряжения) УВВ.

5.3 Определение радиальных колебательных мод здания

Ограничим количество рассматриваемых мод интервалом $n = 1 - 9$, для которых значения параметров приведены в таблице 5.1. В частности, при возбуждении колебаний здания УВВ с $P = 50,3$ Па колебательная скорость

моделировалась последовательно для значений $n = 1, 3, 5, 7, 9$ согласно выражению (5.2).

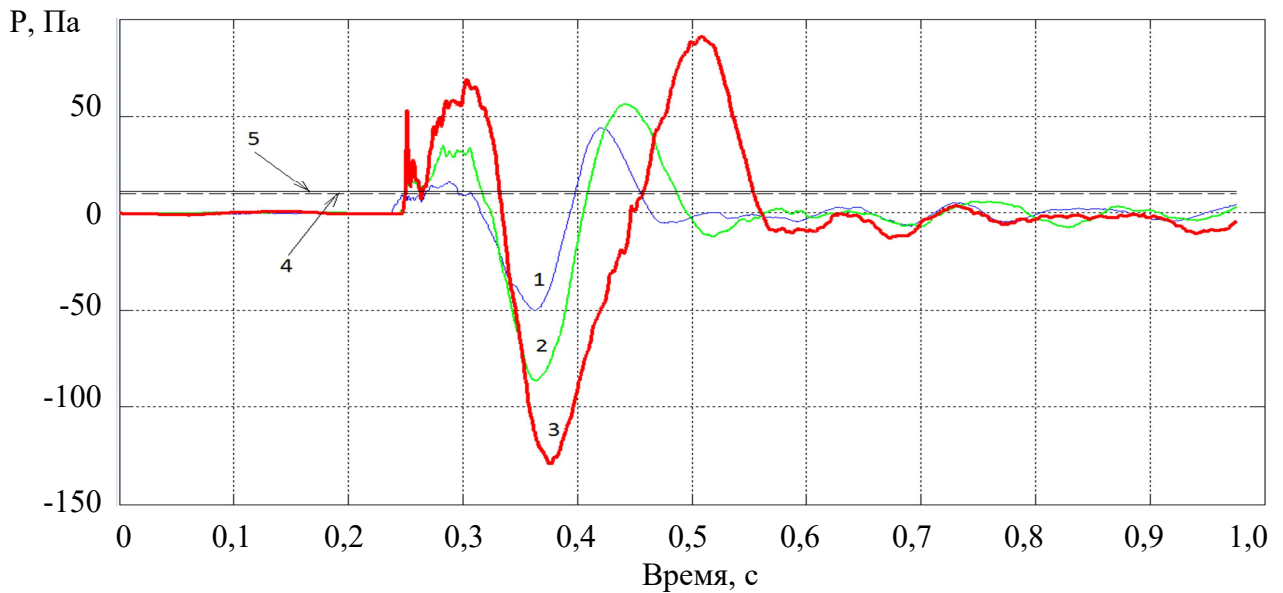


Рисунок 5.2 – Эпюры избыточного давления на фронте УВВ [203]:

1 – 50,3 Па; 2 – 86,8 Па; 3 – 129 Па. 4 – линия (штрих) порогового давления 10 Па;
5 – линия пикового фонового давления воздуха

При моделировании следует учитывать плохую обусловленность полученного решения задачи, заключающегося с одной стороны в использовании зашумленных экспериментальных данных, с другой – в необходимости подгонки большого количества параметров для согласования модели с реальным поведением объекта. Ситуация заметно усложняется, если поведение объекта описывается осциллирующей функцией. В этом случае критерий наилучшего согласия носит визуальный характер.

Сформулируем правила моделирования: модельная и экспериментальная кривые описываются одной огибающей в пределах заданной погрешности; осцилляции этих кривых носят схожий характер с заданным несоответствием пересечения кривых линии нулевого уровня. Наибольшую трудность вызывает выполнение последнего правила.

Таблица 5.1 - Результаты определения параметров колебательных мод [203]

Эпюра с пиковым давлением $P = 50,3$ Па																		
Колебательные моды																		
Эпюры	1		2		3		4		5		6		7		8		9	
	$\nu^{2)}$	C	ν	C	ν	C	ν	C	ν	C	ν	C	ν	C	ν	C	ν	C
	Гц		Гц		Гц		Гц		Гц		Гц		Гц		Гц		Гц	
1 ¹⁾	7,2	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	8,3	0,3	7,2	0,4	6,1	0,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	9,0	0,2	8,6	0,4	7,6	0,15	6,7	0,25	5,9	0,25	-	-	-	-	-	-	-	-
4	8,9	0,15	8,7	0,25	8,6	0,2	8,0	0,2	7,5	0,1	6,7	0,2	5,9	0,2	-	-	-	-
5	9,2	0,18	9,0	0,27	8,8	0,18	8,4	0,09	7,8	0,18	7,2	0,09	6,2	0,09	5,6	0,18	4,7	0,09
Эпюра с пиковым давлением $P = 86,8$ Па																		
Колебательные моды																		
6	7,4	0,2	7,1	0,2	6,6	0,15	5,6	0,15	5,3	0,15	4,5	0,15	-	-	-	-	-	-
Эпюра с пиковым давлением $P = 129$ Па																		
Колебательные моды																		
7	8,7	0,4	8,3	0,2	7,4	0,3	6,9	0,18	6,0	0,1	5,2	0,24	4,4	0,14	-	-	-	-
8	9,1	0,12	8,9	0,24	8,7	0,12	6,7	0,12	6,3	0,24	5,9	0,12	5,7	0,12	5,2	0,24	4,5	0,12

Примечания: ¹⁾ коэффициент затухания принимался: $\beta = 1 \text{ с}^{-1}$, во всех остальных случаях: $\beta = 0,5 \text{ с}^{-1}$; ²⁾ во всех случаях приводятся значения циклической частоты, которая связана с круговой частотой согласно выражению: $\nu = \omega / (2\pi)$.

Проведем анализ результатов, приведенных на рисунке 5.3. В предположении одномодового поведения колебательной скорости удовлетворительное согласие модели и эксперимента получается относительно огибающих и первых осцилляций при условии двукратного увеличения модельного коэффициента затухания. По мере увеличения количества колебательных мод, вводимых в модельную функцию колебательной скорости, улучшается согласие с экспериментом относительно осцилляций, но одновременно в модельной функции возникает немонотонное поведение

огигающей типа «биений». При достижении предельного количества колебательных мод ($n = 9$) качество моделирования не улучшается.

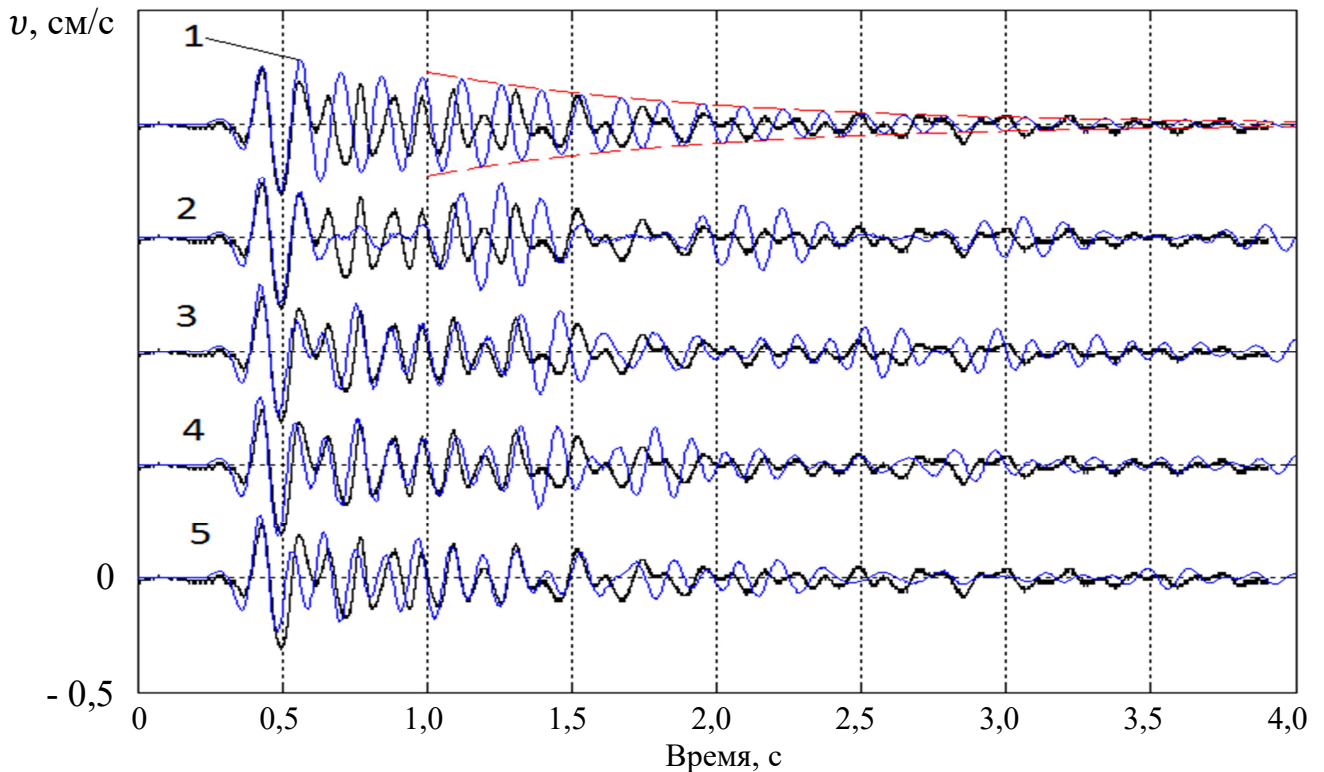


Рисунок 5.3 – Зависимости моделируемых и экспериментальной колебательных скоростей от времени для $P = 50,3$ Па [203] при количествах колебательных мод n :

1 – $n = 1$; 2 – $n = 3$; 3 – $n = 5$; 4 – $n = 7$; 5 – $n = 9$.

Штриховыми линиями отмечены огибающие моделируемой колебательной скорости (коэффициент затухания $\beta = 1 \text{ с}^{-1}$)

Рассмотрим поведение эпюр колебательных скоростей при больших пиковых избыточных давлениях на фронте УВВ (рисунок 5.4). С возрастанием пикового давления в составе колебательных мод начинают доминировать низкочастотные моды. Причем изменение носит немонотонный характер. Так, в составе колебательных мод здания при $P = 86,8$ Па практически исчезают моды 8,3-9,2 Гц, которые вновь появляются при $P = 129$ Па. Поэтому модельная колебательная скорость для УВВ с $P = 86,8$ Па содержит 6 мод. Из анализа рисунка 5.4 также следует, что с возрастанием динамической нагрузки на здание могут возбуждаться дополнительные колебательные моды. Об этом

свидетельствуют результаты моделирования колебательной скорости с использованием 7 и 9 мод (графики 2 и 3 рисунка 5.4).

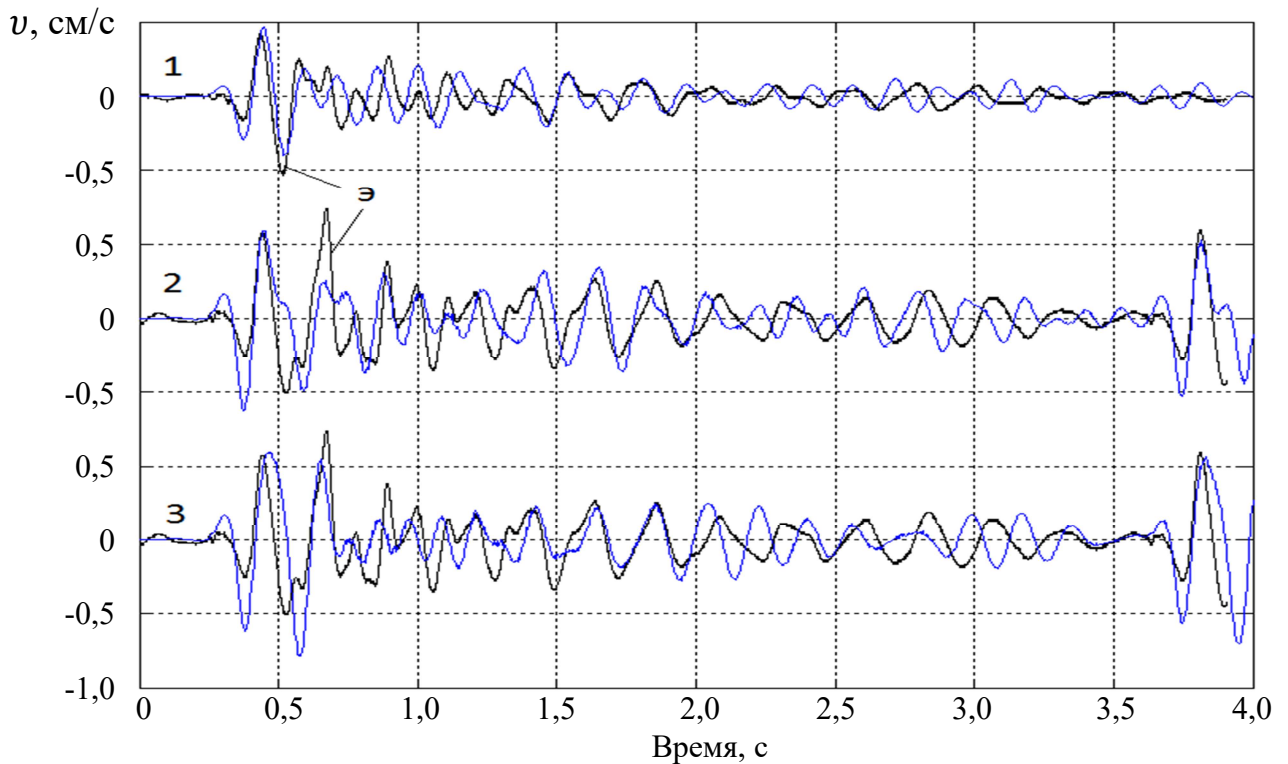


Рисунок 5.4 – Зависимости моделируемых и экспериментальных колебательных скоростей от времени: 1 – $P = 86,8$ Па ($n = 6$); 2 – $P = 129$ Па ($n = 7$); 3 – $P = 129$ Па ($n = 9$).

Буквой «э» - отмечены графики экспериментальных колебательных скоростей

Семимодовые модельные кривые имеют плохую сходимость к экспериментальным кривым колебательной скорости для УВВ с $P = 50,3$ Па (рисунок 5.3, график «4») и УВВ с $P = 129$ Па (рисунок 5.4, график «2»).

5.4 Анализ динамического воздействия одиночным импульсом ударной воздушной волны на наземное сооружение

В предположении нормального закона распределения частот построим кумулятивные прямые частот колебательных мод (рисунок 5.5).

Из анализа рисунка 5.5 следует, что в области пиковых давлений 50,3 Па и 86,8 Па колебательные моды практически подчиняются закону нормального распределения. При пиковом давлении 129 Па частоты колебательных мод характеризуются большим разбросом относительно кумулятивных прямых.

Предположим, что создаются предпосылки возникновения таких комбинаций частот колебательных мод, при которых возможна повышенная вибрация охраняемого объекта. Для выяснения этих комбинаций необходимо из модельной колебательной скорости выделить собственную колебательную скорость здания.

Вероятность

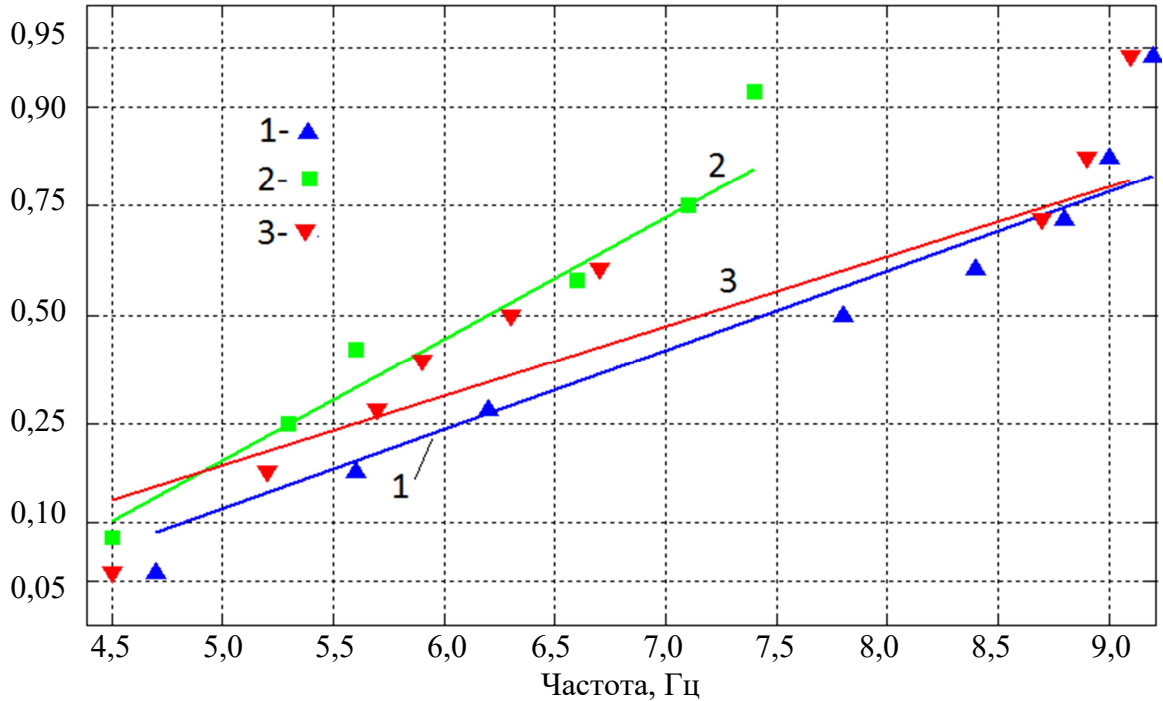


Рисунок 5.5 – Кумулятивные прямые нормального распределения частот колебательных мод [203]: 1 – $P = 50,3$ Па; 2 – $P = 86,8$ Па; 3 – $P = 129$ Па

Собственная колебательная скорость представляется в виде суперпозиции затухающих колебательных мод, описываемых уравнением (5.5). Процедура нахождения начальной амплитуды A_i , начальной фазы φ_i i -й моды и эпюры собственной колебательной скорости поясняется рисунком 5.6.

Из рисунка 5.2 следует, что продолжительность действия импульса УВВ составляет $\approx 0,25$ с для $P = 50,3$ Па. Согласно рисунку 5.6 видимое расхождение вынужденных и свободных колебаний лежит в интервале 0,5-0,7 с. Поэтому, процедура нахождения амплитуды и начальной фазы затухающей моды сводится к аппроксимации кривой, полученной как результат суперпозиции решений (5.1), для интервала времени спустя двух, трехкратной продолжительности импульса УВВ. Результаты определения параметров мод с помощью программы [116] сведены в таблицу 5.2.

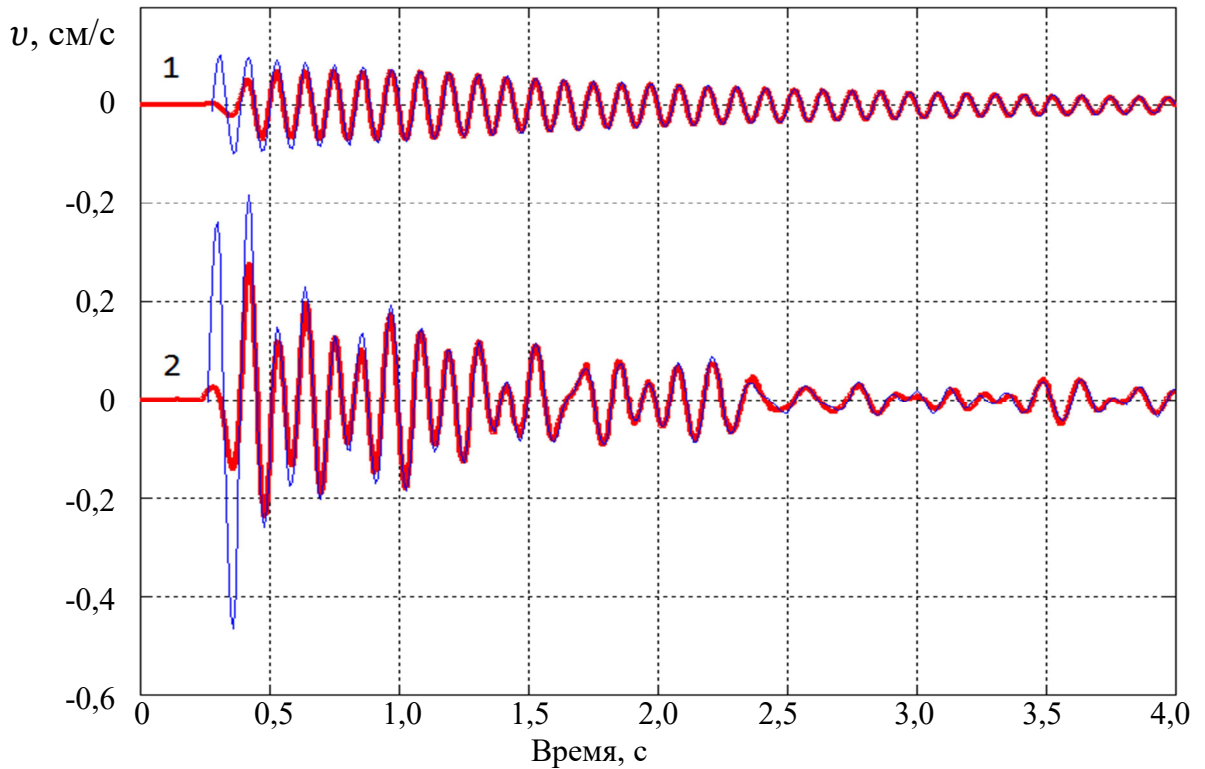


Рисунок 5.6 – Зависимости модельных колебательных скоростей от времени при возбуждении вибрации здания импульсом УВВ с $P = 50,3$ Па: 1 – одна мода с $\nu = 9$ Гц; 2 – сумма 9 мод. Тонкая линия - суперпозиция решений (5.5), толстая линия – суперпозиция решений (5.1)

Дополнительная информация о динамических характеристиках охраняемого объекта следует из анализа его фазо-частотных и амплитудно-частотных характеристик. Фазо-частотные характеристики здания, построенные по данным таблицы 5.2, показаны на рисунке 5.7, амплитудно-частотные характеристики - на рисунке 5.8.

Из анализа рисунка 5.7 следует, что фазо-частотные характеристики носят, в основном, линейный характер и смещаются вниз с ростом динамической нагрузки. Существенные отклонения от линейной зависимости наблюдаются при воздействии УВВ с $P = 129$ Па для частот больше 7,4 Гц.

Таблица 5.2 - Результаты определения параметров затухающих колебательных мод

Эпюра с пиковым давлением $P = 50,3$ Па																											
Колебательные моды																											
Эпюры	1			2			3			4			5			6			7			8			9		
	$v^2)$, Гц	A, см/с	$\varphi^3)$, рад	v, Гц	A, см/с	φ , рад	v, Гц	A, см/с	φ , рад	v, Гц	A, см/с	φ , рад	v, Гц	A, см/с	φ , рад	v, Гц	A, см/с	φ , рад	v, Гц	A, см/с	φ , рад	v, Гц	A, см/с	φ , рад	v, Гц	A, см/с	φ , рад
1 ¹⁾	7,2	0,48	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	8,3	0,1	-0,37	7,2	0,19	0,14	6,1	0,1	0,88	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	9,0	0,08	-1,41	8,6	0,17	-0,65	7,6	0,06	-0,57	6,7	0,1	0,55	5,9	0,1	0,85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	8,9	0,06	-1,23	8,7	0,11	-0,93	8,6	0,08	-0,65	8,0	0,05	-0,60	7,5	0,04	-0,09	6,7	0,08	0,55	5,9	0,09	0,85	-	-	-	-	-	-
5	9,2	0,06	-1,56	9,0	0,11	-1,53	8,8	0,07	-0,94	8,4	0,03	-0,37	7,8	0,06	-0,59	7,2	0,04	0,14	6,2	0,03	0,90	5,6	0,08	1,16	4,7	0,03	2,01
Эпюра с пиковым давлением $P = 86,8$ Па																											
Колебательные моды																											
6	7,4	0,14	-0,93	7,1	0,16	-0,31	6,6	0,14	-0,12	5,6	0,12	0,81	5,3	0,12	1,10	4,5	0,11	1,78	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Эпюра с пиковым давлением $P = 129$ Па																											
Колебательные моды																											
7	8,7	0,16	-1,20	8,3	0,07	-0,63	7,4	0,1	-2,19	6,9	0,1	-1,17	6,0	0,08	-0,64	5,2	0,36	0,26	4,4	0,22	0,77	-	-	-	-	-	-
8	9,1	0,05	-1,54	8,9	0,11	-1,17	8,7	0,05	-0,93	6,7	0,09	-1,14	6,3	0,18	-0,83	5,9	0,11	-0,63	5,7	0,14	-0,61	5,2	0,36	0,26	4,5	0,18	0,65

Примечания: ¹⁾ и ²⁾ соответствуют примечаниям к таблице 5.1; ³⁾ фаза вычислялась с учетом того, что затухающие колебания начинались в момент времени $t = 0$.

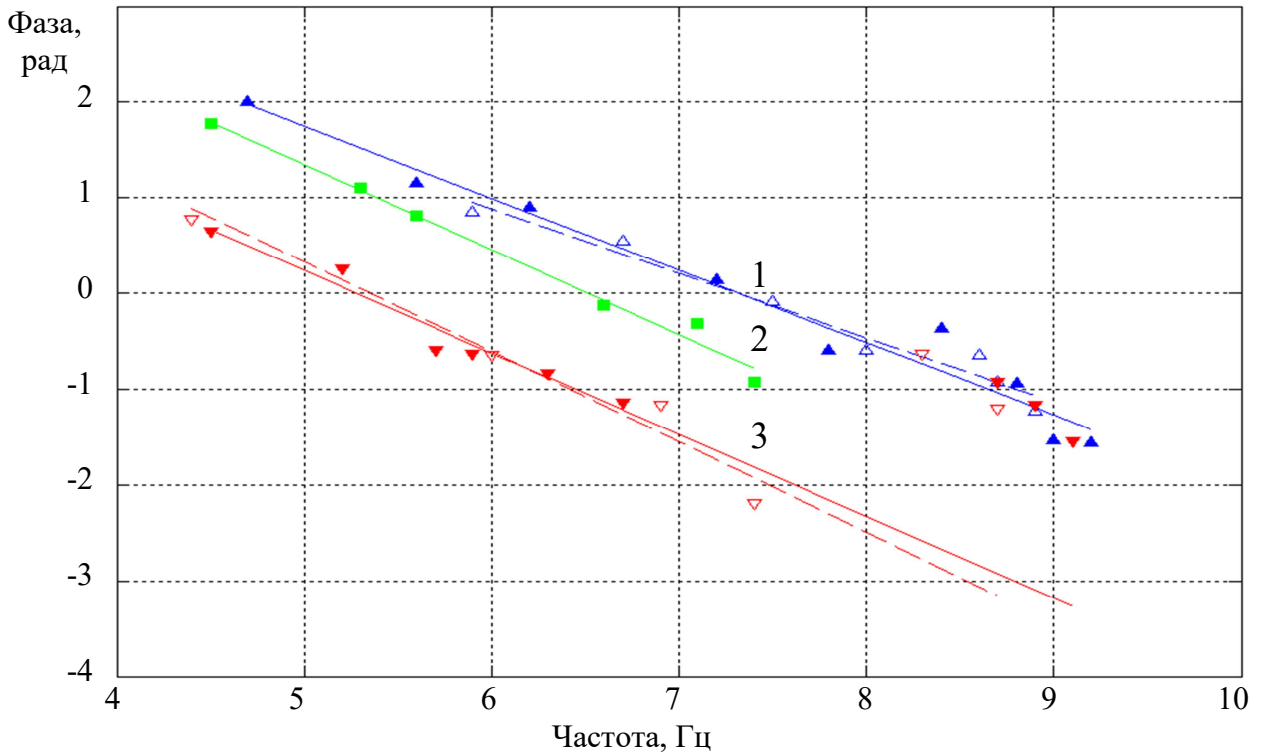


Рисунок 5.7 – Линейные аппроксимации фазо-частотных характеристик собственных колебательных скоростей:

1 – $P = 50,3$ Па; 2 – $P = 86,8$ Па; 3 – $P = 129$ Па. Линия – 9 мод, пунктир – 7 мод. Значки - частоты мод согласно таблице 5.2

Спектры, представленные на рисунке 5.8, наглядно демонстрируют необходимость разделять воздействие на объект и его отклик. Это видно по кривой 2. Полоса частот 3-5 Гц одновременно соответствует импульсу УВВ и колебаниям здания. Отметим непостоянство динамических параметров отклика в зависимости от уровня УВВ. С ростом динамического воздействия УВВ на здание его частотный спектр смещается в низкочастотную область.

Таким образом, исходя из изменчивого характера колебательных мод охраняемого объекта, зависимости их параметров от уровня воздействия, возникают предпосылки такой комбинации мод, при которой вибрация объекта может существенно возрасти даже после окончания динамической нагрузки.

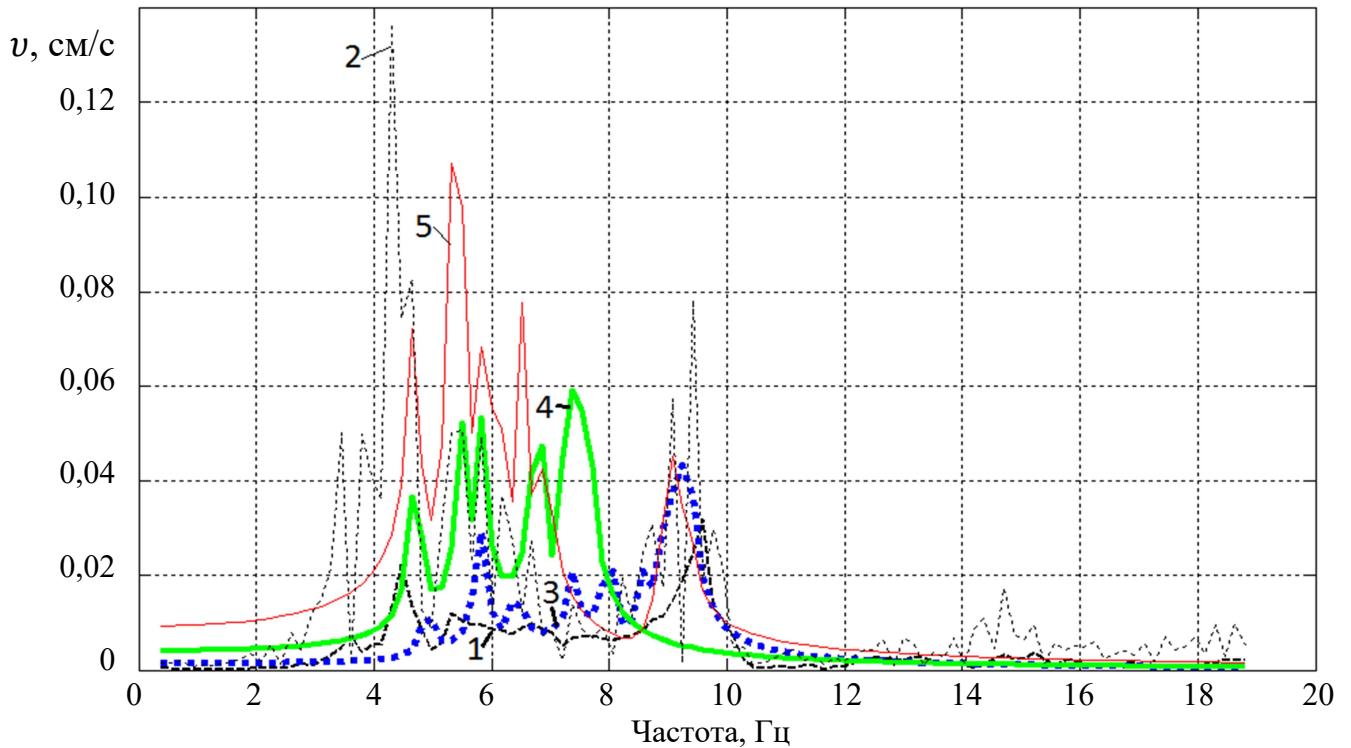


Рисунок 5.8 – Спектры колебательной скорости:

- 1 – спектр экспериментальной колебательной скорости при $P = 50,3$ Па;
- 2 – то же при $P = 129$ Па (отмечен пик, соответствующий импульсу УВВ);
- 3 – спектр собственной колебательной скорости в представлении 9-и мод при $P = 50,3$ Па;
- 4 – то же в представлении 6 мод при $P = 86,8$ Па;
- 5 – то же в представлении 9 мод при $P = 129$ Па

5.5 Прогноз колебательного процесса охраняемого объекта после воздействия на него импульса ударной воздушной волны

Условием возрастания вибрации здания после окончания воздействия являются низкие значения коэффициента затухания колебательных мод. Чтобы оценить эти значения, путем подбора единого коэффициента затухания для всех мод приведем эпюры модельных колебательных скоростей к равенству пиковых значений скоростей в эпюре во временных областях, когда действует импульс УВВ и когда происходят свободные затухающие колебания. По пиковому значению скорости $v_{п}$ и найденному коэффициенту затухания β построим зависимость огибающей кривой от времени t согласно уравнению (5.6):

$$v(t) = v_{п} \cdot \exp(-\beta \cdot t). \quad (5.6)$$

Значения параметров, входящих в уравнения огибающих кривых, приведены в таблице 5.3. Графики зависимостей колебательной скорости от времени изображены на рисунке 5.9.

Таблица 5.3 - Значения параметров, входящих в уравнения огибающих

Давление на фронте УВВ – Р, Па	50,3	86,8	129
Пиковое значение колебательной скорости, см/с	0,25	0,47	0,6
Коэффициент затухания, с ⁻¹	0,12	0,1	0,12

Уравнение (5.6) представляет собой огибающую кривую одномодовой колебательной скорости. Как следует из рисунка 5.9, при многомодовом режиме колебаний возможны «всплески» вибрации объекта, характеризующиеся вариативностью в зависимости от уровня динамического воздействия.

Согласно таблице 5.3 значение коэффициента затухания почти в четыре раза меньше значения, принятого при моделировании колебательной скорости здания согласно таблице 5.1. Поэтому для рассматриваемого здания при одиночном воздействии повышенная вибрация наблюдаться не будет. Тем не менее, малые значения коэффициента затухания могут реализовываться.

Об этом свидетельствуют результаты мониторинга зданий при ведении массовых взрывов на щебеночных карьерах Ленинградской области АО «Каменногорское карьероуправление», АО «Каменногорский комбинат нерудных материалов» (ККНМ). В качестве примера на рисунке 5.10 построена зависимость относительной амплитуды затухающих колебаний от времени девятиэтажного жилого дома, расположенного по адресу: Ленинградская обл., г. Каменногорск, Ленинградское шоссе, 92. Измерения проводились сейсмометрическим методом на 8-м этаже. Источником колебаний служили УВВ от массового взрыва общей массой 23 тонны, расположенного на расстоянии 4,7 км от дома.

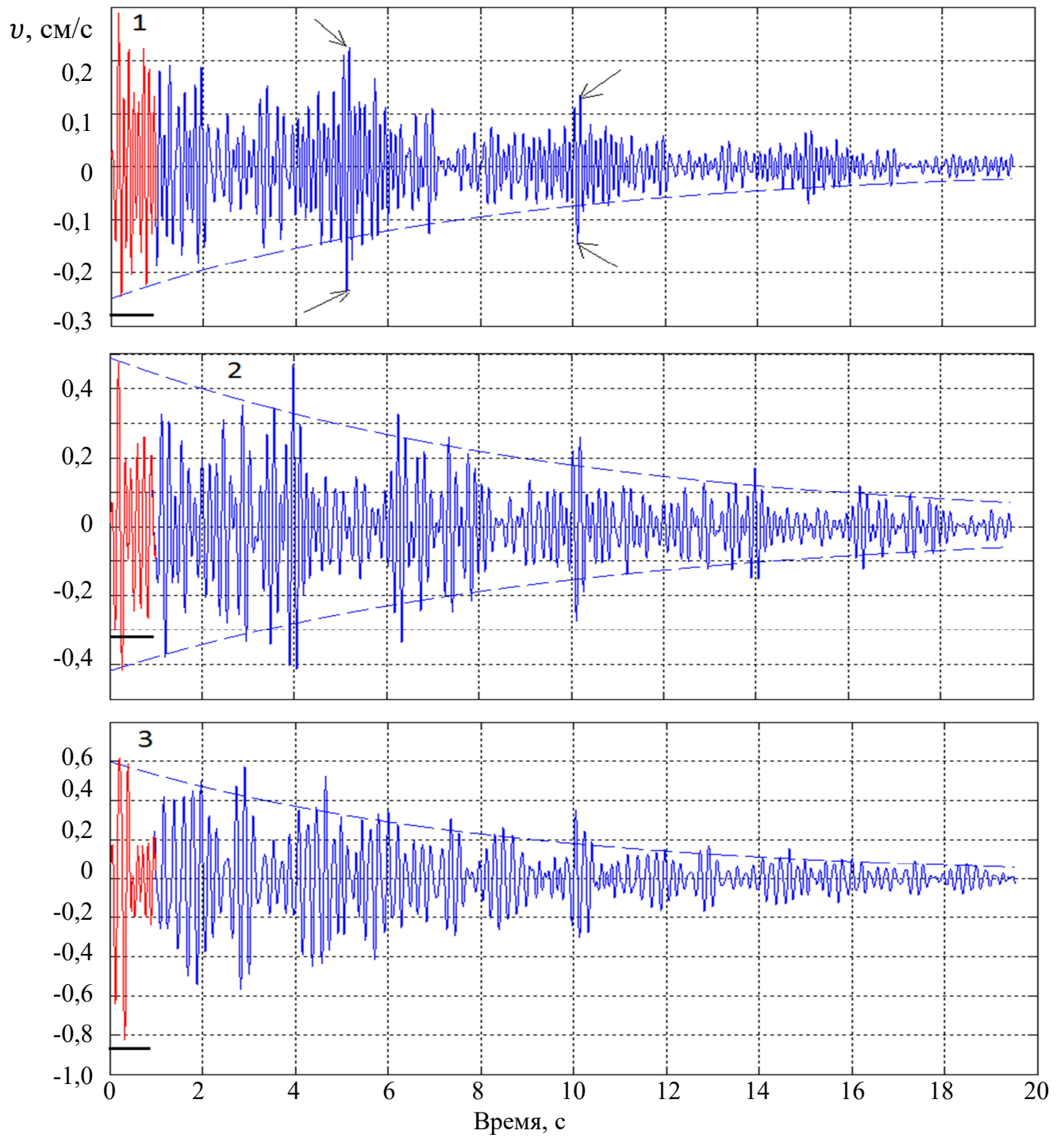


Рисунок 5.9 – Графики зависимостей колебательной скорости от времени:
 1 – $P = 50,3$ Па; 2 – $P = 86,8$ Па; 3 – $P = 129$ Па. Отрезок - продолжительность импульса УВВ.
 Штриховая линия – огибающая. Стрелками показаны области повышенной вибрации

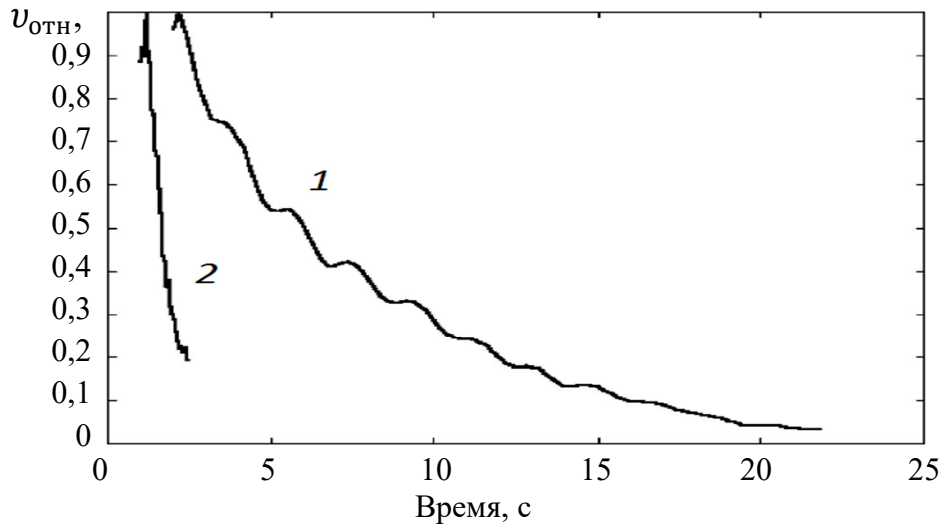


Рисунок 5.10 – Зависимости относительной амплитуды затухающих колебаний от времени:
1 – жилой дом; 2 – обогащательная фабрика [102]

Анализ графика 1 рисунка 5.10 позволяет установить значение коэффициента затухания жилого дома $0,18 \text{ с}^{-1}$, что близко к значениям, приведенным в таблице 5.3. В качестве сравнения на рисунке 5.10 приведен график 2 для обогащательной фабрики №16 со значением коэффициента затухания 1 с^{-1} . Анализ качества строительных конструкций упомянутых наземных объектов приводит к выводу, что наиболее вероятной причиной малых значений коэффициента затухания служит наличие дефектов несущих элементов строительной конструкции (рисунок 5.11).



Рисунок 5.11 – Характерные дефекты несущих элементов строительной конструкции девятиэтажного жилого дома, расположенного по адресу: Ленинградская обл., г. Каменногорск, Ленинградское шоссе, 92 [101]

Возвращаясь к анализу колебаний здания в приближении одномодового поведения (п.5.3), становится ясным, какие опасности могут быть недооценены помимо недостоверной оценки коэффициента затухания колебаний.

5.6 Функциональная зависимость между пиковой скоростью колебаний здания и пиковым избыточным давлением на фронте ударной воздушной волны

Практический интерес представляет зависимость пиковой скорости колебаний от пикового давления на фронте УВВ (рисунок 5.12).

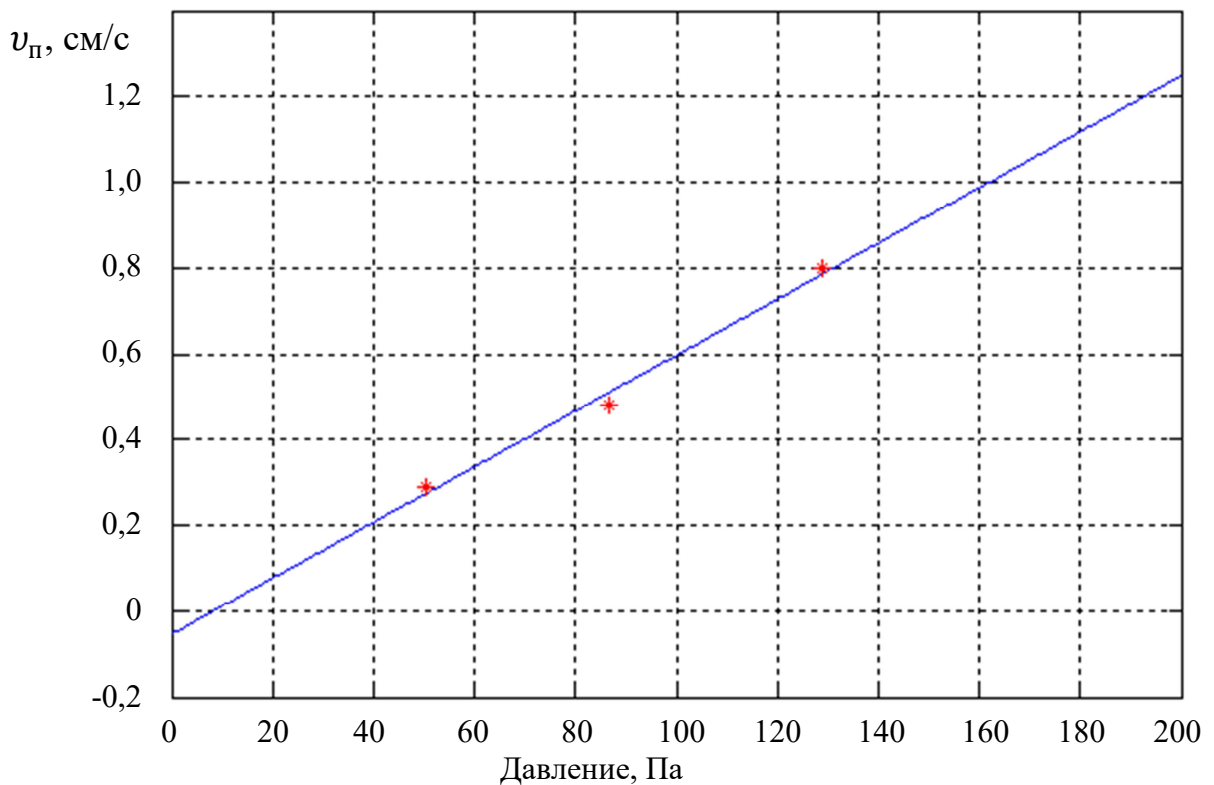


Рисунок 5.12 – Зависимость пиковых значений колебательной скорости от пикового значения избыточного давления на фронте УВВ для крыши жилого панельного пятиэтажного дома, расположенного по адресу: п. Семиозерье, ул. Центральная, д. 53. «*» - точки модельных эпюр пиковых значений колебательной скорости

Как следует из рисунка 5.12, эта зависимость носит линейный характер. Несмотря на малое количество данных, достоверность вида зависимости

подтверждается тем, что линия регрессии пересекает окрестность начала координат в пределах ошибки определения пикового избыточного давления, т.е. в пределах случайной составляющей ветровой нагрузки. Линейный вид зависимости также указывает на справедливость модели, изложенной в п. 5.1. Однако эта зависимость не является очевидной. Дело в том, что помимо параметра импульса УВВ как пиковое избыточное давление существует и другой параметр, как продолжительность импульса. Из рисунка 5.2 следует, что связь между этими параметрами далека от линейной зависимости. В то же время, по мере роста пикового избыточного давления на фронте импульса УВВ, воздействующего на здание, происходит перестройка спектра колебаний (рисунок 5.8) в сторону доминирования низкочастотных составляющих спектра в сочетании с изменением фазо-частотных характеристик (рисунок 5.7), носящая компенсирующий эффект.

Факт существования зависимости между пиковыми значениями колебательной скорости и избыточного давления не является новым. Согласно [112] конкретный вид этой зависимости определяется, исходя из значения отношения длительности положительной фазы УВВ к периоду собственных колебаний охраняемого объекта, т.е. τ_+/T . Если $\tau_+/T \leq 0,25$, то воздействие УВВ на объект считается коротким и смещение (для гармонических колебаний и скорость смещения) пропорционально импульсу давления УВВ. Если $\tau_+/T \geq 10$, то воздействие УВВ на объект считается длительным и смещение (скорость смещения) пропорционально избыточному давлению. В рассматриваемом случае не выполнено ни одно, ни другое условие, но вид функциональной зависимости соответствует условию $\tau_+/T \geq 10$. В этом нет никаких противоречий, так как спектр колебаний здания носит многомодовый характер, и воздействие импульса УВВ на здание не ограничивается только положительной фазой УВВ. Еще одно доказательство этого факта рассмотрено ниже. Аналогичная ситуация обсуждается в статье [37].

5.7 Оценка достоверности модельных параметров колебаний

Модельные колебательные скорости являются результатом решения многопараметрической задачи, не совсем точно описывающей рассматриваемый процесс. Каждая мода имеет 3 параметра (амплитуда, частота и коэффициент затухания), которые определяются в результате подгонки модельной кривой к экспериментальной кривой. Изменение одного параметра одной моды может быть компенсировано изменением аналогичного параметра другой моды в некотором интервале. Оценим предельную ширину такого интервала.

Оценка ошибки определения амплитуды. В качестве такой оценки рассмотрим суммы относительных амплитуд колебательных мод (таблица 5.1) для разного количества мод, слагающих колебательную скорость. Подгонка начинается с начального участка экспериментальной кривой (рисунок 5.3), что в совокупности позволяет минимизировать взаимное влияние коэффициента затухания и относительной амплитуды. Согласно данным, представленным в таблице 5.1, получим результаты для сумм относительных амплитуд. Например, при воздействии импульсом УВВ с $P = 50,3$ Па (в скобках указано количество мод): 0,9(1); 1,0(3); 1,25(5); 1,3(7); 1,35(9). Если не учитывать завышение амплитуд, то в качестве ошибки определения амплитуды примем максимальную величину на уровне 30-35% от значения амплитуды.

Оценка ошибки определения частоты. Ошибка будет наименьшей для наиболее интенсивных мод. Так, при воздействии импульсом УВВ с $P = 50,3$ Па примерно 50% от суммы относительных амплитуд приходится на комплекс частот 8,8-9,2 Гц. При этом заметные отклонения модельной кривой от экспериментальной кривой начинаются при изменении модельной частоты на 0,2-0,3 Гц. Влияние низкочастотных мод на модельную кривую скорости особенно заметно в ее средней части. Ошибку определения частоты низкочастотных мод также можно оценить на уровне 0,2-0,3 Гц.

Оценка ошибки определения коэффициента затухания. Ошибка относится к колебательной скорости в целом и проявляется в конечной части кривой колебательной скорости (рисунок 5.9). Анализ дает ошибку коэффициента затухания на уровне 20-25% от значений параметра. В пределах вычисленной ошибки прослеживается тенденция к уменьшению коэффициента затухания при возрастании динамической нагрузки на здание.

5.8 Основные сведения об обогатительной фабрике №16

5.8.1 Краткая характеристика охраняемого объекта

Исследование динамического воздействия взрывных работ на фабрику было вызвано необходимостью получения фактических данных по параметрам СВВ в основании фундамента по следующим причинам: уникальность оборудования и конструкции здания фабрики, построенной в условиях вечной мерзлоты; субъективное восприятие производственным персоналом реакции конструктивных элементов и здания на воздействие СВВ и УВВ от массовых взрывов. Основанием для проведения работ послужило письмо Акционерной компании «АЛРОСА» ЗАО «Нюрбинский горно-обогатительный комбинат» № 1363 от 11.12.2002. Экспертной организацией выступил Горный университет.

Исследования проводились в два этапа: определение коэффициента сейсмичности, уровня сейсмического воздействия массовых взрывов и взрывов наружных зарядов взрывчатого вещества на фабрику (2003 г.); определение параметров УВВ и параметров колебаний здания от взрывов наружных зарядов взрывчатого вещества и массовых взрывов (2004 г.). Исследовано динамическое воздействие 7-и массовых взрывов, 9-и взрывов наружных зарядов взрывчатого вещества и взрыва заглубленного заряда взрывчатого вещества.

Здание обогатительной фабрики находится на расстоянии 675 м от рабочего борта карьера на конец отработки. Фабрика представляет собой каркасное, панельное здание. Каркас выполнен из стали двутаврового профиля. Основное

здание фабрики имеет максимальную высоту 40 м, занимает площадь в плане 11880 м² и опирается на свайное основание из буронабивных железобетонных свай диаметром 600 мм и длинами 10 и 14 м.

Согласно СНиП 11-А, 12-69 была установлена допустимая скорость смещения в основании фабрики 2,8 см/с при условии, что объект соответствует согласно СНиП 11-7-81 сооружениям 2-го класса и 2-го ранга. Допустимые значения скорости оценивались так же по данным нормативного документа [121], действующего по настоящее время. Согласно таблице 14.1 из [121] при отсутствии уточняющих условий допустимая скорость смещения для сооружений, близких по характеристикам к охраняемому объекту, составляет 3 см/с. Согласно более позднему документу [41] допустимая скорость равна 2-6 см/с.

Расчет ожидаемой скорости смещения грунта для сейсмобезопасной массы заряда взрывчатого вещества в ступени замедления $Q = 2000$ кг и расстояния $R = 675$ м от фабрики до рабочего борта карьера на конец отработки производился со значением коэффициента сейсмичности $K_c = 600$ для особо ответственных случаев согласно таблице 14.2 [121] и составил (5.7):

$$v = K_c \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1,5} = 600 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{2000}}{675} \right)^{1,5} = 1,5 \text{ см/с.} \quad (5.7)$$

5.8.2 Геологическая характеристика и физико-механические свойства горных пород района расположения охраняемого объекта

Грунтовые условия в районе расположения обогатительной фабрики отвечают толще перекрывающих отложений трубки «Нюрбинская». Мощность деятельного слоя колеблется в пределах 0,2-1,5 м. Перекрывающие породы представлены аргиллитами, глинистыми алевролитами с пластами известковистых стяжений, алевропесчаниками, песками и песчаниками с включениями гравия, гальки, валунов доломитов и долеритов. На земной поверхности под воздействием атмосферных осадков перекрывающие породы разрушены до рыхлого состояния. Пример стратиграфической колонки пород на глубину свайного основания фабрики показан на рисунке 5.13.

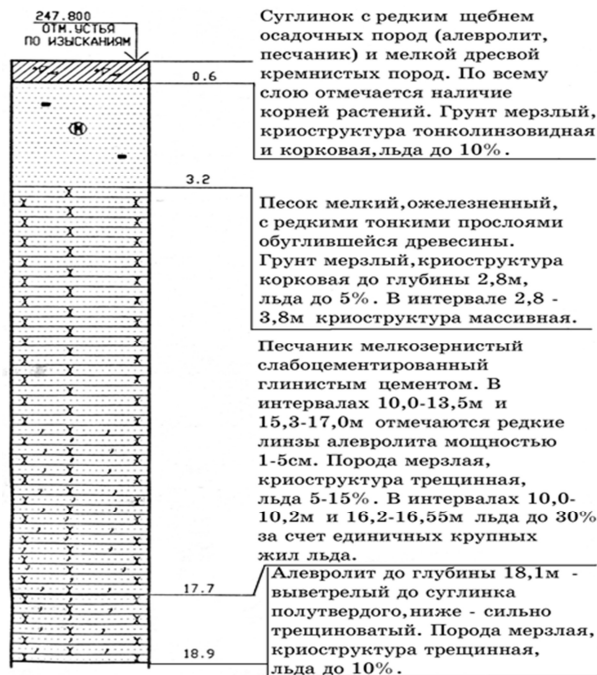


Рисунок 5.13 – Пример стратиграфической колонки пород

Трещиноватость пород в перекрывающем слое колеблется от 1-2 до 3-5 трещин на метр. Все трещины различно ориентированы и имеют морозобойное происхождение. Преобладают трещины субгоризонтального простирания. На глубинах 40-50 м залегает пачка аргиллитов повышенной трещиноватости.

Средние значения физико-механических параметров по перекрывающим породам: объемная масса $2,0 \text{ т/м}^3$; открытая пористость 26,7%; предел прочности при одноосном сжатии 5,81 МПа; то же при одноосном растяжении 1,14 МПа.

5.8.3 Краткая характеристика буровзрывных работ

При разработке карьера трубки «Нюрбинская» проектом предусмотрена подготовка пород к выемке по вскрышному и добычному горизонтам с применением буровзрывных работ. Бурение взрывных скважин диаметрами 227 мм и 257 мм производилось станками 5СБШ-200 и DM-M2 «Ингерсолл-рэнд» соответственно. Применялись штатные взрывчатые вещества: гранулиты АС-4, АС-8; аммонит 6ЖВ порошкообразный и патронированный; граммонит 79/21;

граммонит 30/70; гранулотол. Взрывание бескапсюльное. Использовались детонирующие шнуры ДШ-А, ДШЭ, ДШВ; промежуточные шашки-детонаторы Т-400г, ТГ-500. Зажигательные трубки изготавливались из огнепроводного шнура ОША, ОШП и капсулей-детонаторов КД-8, КД-8-УТС.

Проектом отработки карьера трубки «Нюрбинская» предусмотрена высота уступа $H_y = 15$ м. По техническим характеристикам задействованного на карьере экскаватора СТ-5130 максимальная высота черпания составляет 12 м. Из условий безопасной эксплуатации предусмотрена отработка взорванных блоков послойно в два этапа при взрывании 15 м уступов или разделение уступа и взрывание подступов высотой $H_{ny} = 7,5$ м.

Типовые параметры массовых взрывов: суммарная масса взрывчатых вещества 13-41 т; средний удельный расход ВВ 0,8 кг/м³; интервал времени короткозамедленного взрывания 20 мс (август 2003 г.) и 45 мс (с учетом рекомендаций, сентябрь 2004 г.); высота уступа 5,1-7,5 м; основная сетка скважин 6,1×6,0 м²; дополнительная - 4,0×4,0 м²; длина забойки 30-200% от длины колонки заряда взрывчатого вещества. Расстояние от мест проведения массовых взрывов до пунктов регистрации составляло 1,1-1,6 км. На рисунке 5.14 представлен пример схемы коммутации скважинных зарядов.

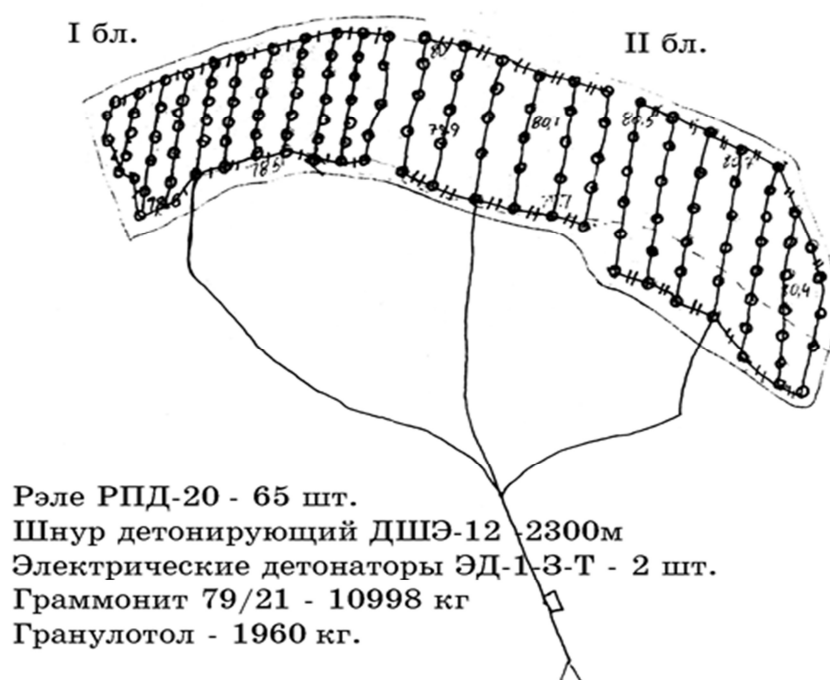


Рисунок 5.14 – Схема коммутации скважинных зарядов массового взрыва от 17 августа 2003г.

5.9 Средства измерения параметров динамического воздействия взрывных работ на карьере

Измерения параметров СВВ производилось с помощью серийно выпускавшихся сейсмических датчиков НС-3, СВ-5, СВ-30 и АЦП Е-330 производства L – Card (Москва). Для определения параметров УВВ была разработана оригинальная измерительная установка [102].

5.9.1 Измерительная установка для определения параметров ударных воздушных волн на основе цифрового осциллографа TDS3034B

Осциллограф TDS3034B является сертифицированным средством измерения, имеет 4 независимых аналогово-цифровых 9-и разрядных каналов с полосой пропускания до 300 МГц и памятью до 10000 отсчетов на каждый канал. Установка временного сдвига запуска регистрации от начала развертки позволяет записать предысторию сигнала без применения датчиков – упредителей.

Первичными преобразователями избыточного давления на фронте УВВ в электрический сигнал являются пьезоэлектрические датчики давления. Уравнение преобразования имеет вид (5.8):

$$Q(t) = k \cdot P(t), \quad (5.8)$$

где $Q(t)$ – индуктируемый заряд;

$P(t)$ – избыточное давление на фронте УВВ; t – время;

k – коэффициент преобразования.

Наиболее чувствительным пьезоэлектриком является сульфат лития с пьезомодулем $d_{33} = 18,3$ пКл/Н. Поэтому, для исследования слабых УВВ использовались датчики на основе этого материала, калиброванные с помощью датчика ножевого типа ДСЛ 20-6, имеющего следующие характеристики:

- статическая чувствительность при $+20$ °С – 100 пКл/атм $\pm 1,2\%$;
- зависимость чувствительности от температуры – $2,3 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹.

Недостатки датчиков этого типа: высокая чувствительность к температурным воздействиям; необходимость использования антивибрационного

кабеля; зависимость чувствительности от длины кабеля. Указанные недостатки отсутствуют у дифференциальных датчиков давления MPX2010 с техническими характеристиками, представленными в таблице 5.4.

Таблица 5.4 - Технические характеристики датчика давления MPX2010

Характеристика	Значение
Рабочий диапазон давлений, кПа	0...10
Чувствительность, мВ/кПа	2,5
Линейность в % от полной шкалы	± 1
Выходное сопротивление, кОм	1,4
Время отклика на импульс давления, мс	1
Рабочий диапазон температур, °С	- 40...+70

На рисунке 5.15 представлена измерительная установка для определения параметров УВВ на основе цифрового осциллографа TDS3034В.

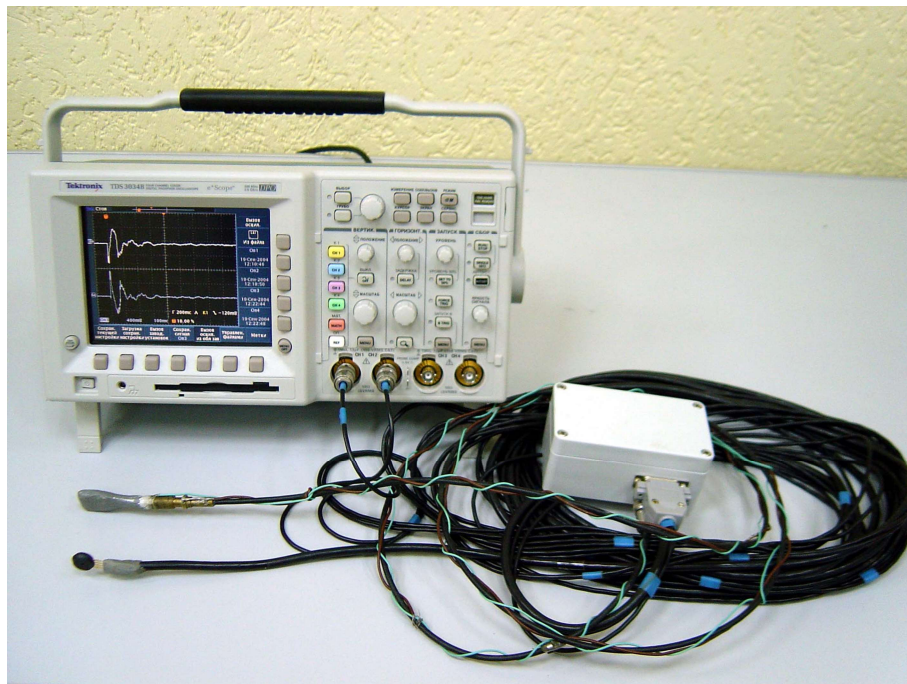


Рисунок 5.15 – Измерительная установка для определения параметров УВВ на основе цифрового осциллографа TDS3034В [152]

5.9.2 Апробация измерительной установки в полигонных условиях

Целью апробации являлась тарировка датчика давления МРХ2010 путем сравнения эпюр избыточного давления от тарлируемого датчика и от калиброванного датчика ДСЛ 20-6. В качестве источника УВВ служил взрыв тротиловой шашки Т-400, подвешенной на детонирующем шнуре на высоту около полутора метров (рисунок 5.16). Примерно на такой же высоте располагались датчики давления. Расстояние между шашкой и датчиками составляло 9,5 метров. Частота выборки аналогового сигнала составляла 5 кГц. Измерения проводились при температуре +7 °С и небольшом боковом ветре. Путем сравнения эпюр (рисунок 5.17) получены результаты для датчика МРХ2010:

Номер показания датчика	1	2	3	4
Зарегистрированное давление, кПа	7,17	9,64	8,52	10,5

Из рисунка 5.17 следует, что продолжительность положительной фазы импульса УВВ близка к значению, рассчитанному по формуле М.А. Садовского (5.9):

$$\tau_+ = 1,5 \cdot \sqrt[6]{q} \cdot \sqrt{R}, \text{ мс.} \quad (5.9)$$

Для $q = 0,4$ кг и $R = 9,5$ м получим $\tau_+ = 4$ мс.



Рисунок 5.16 – Тарировка датчиков давления в полигонных условиях

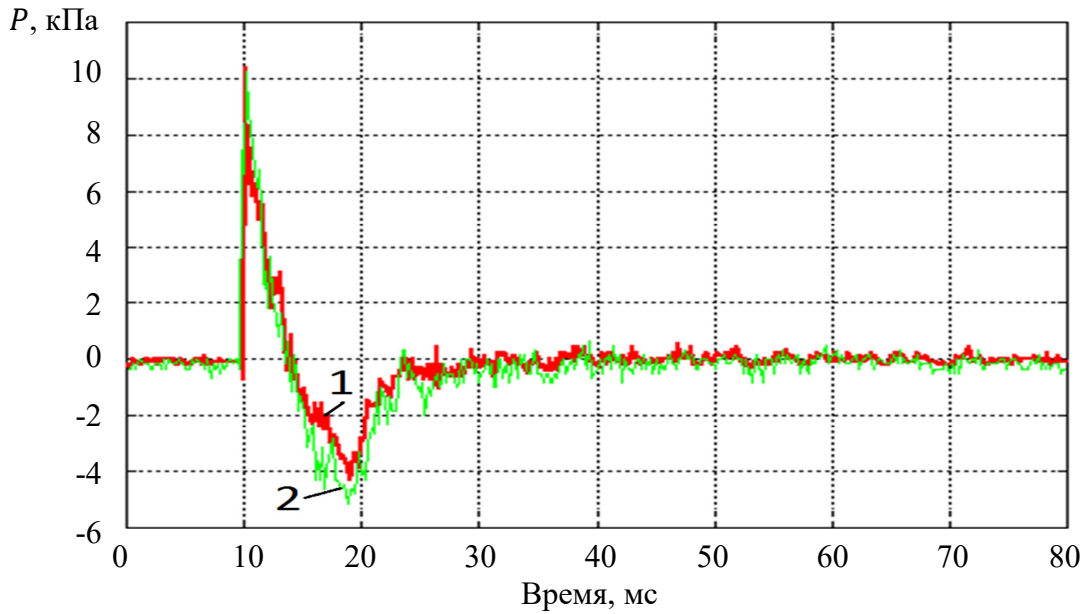


Рисунок 5.17 – Эпюры избыточного давления УВВ [152]:
1 – тарируемый датчик МРХ2010; 2 – калиброванный датчик ДСЛ 20-6

5.10 Оценка коэффициента сейсмичности многолетнемерзлых грунтов

С помощью экскаватора снимался оттаявший грунт на площади примерно 3 м². Точка измерения была удалена на расстояние не менее 30 м от верхней бровки борта карьера и дренажных канав. В качестве источника СВВ использовался заглубленный скважинный заряд взрывчатого вещества массой 40 кг. Сейсмограммы регистрировались с помощью сейсмоприемников СВ-30, установленных на грунте (рисунок 5.18).

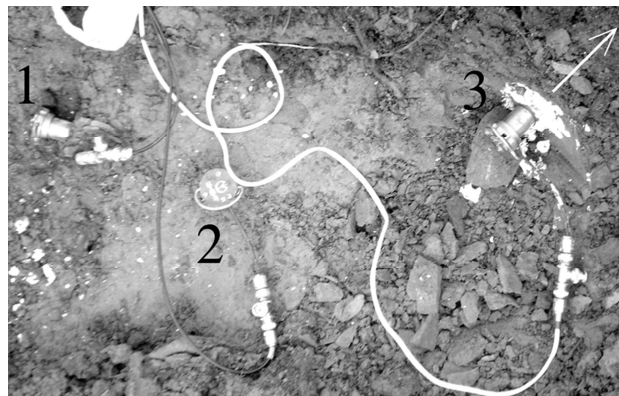


Рисунок 5.18 – Положение датчиков на грунте, регистрирующих компоненты скорости смещения: 1 – тангенциальную; 2 – вертикальную; 3 – радиальную.

Стрелкой показано направление на взрыв

Результаты измерений представлены на рисунке 5.19.

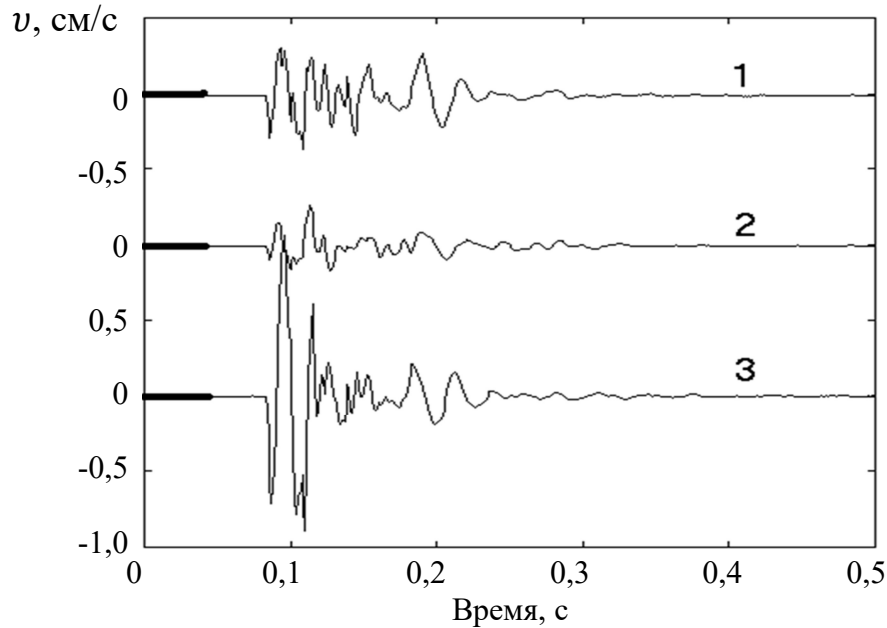


Рисунок 5.19 – Велосиграммы компонент скорости смещения грунта:

1 – тангенциальная; 2 – вертикальная; 3 – радиальная

Как следует из рисунка 5.19, радиальная компонента скорости смещения грунта является доминирующей компонентой, что указывает на преобладание объемных сейсмических волн над поверхностными волнами.

По трем компонентам скорости смещения грунта было вычислено пиковое значение модуля скорости смещения $v_{\text{пм}} = 1,11$ см/с. Тогда коэффициент сейсмичности с учетом значения показателя затухания $n = 1,5$ будет $K_c = 164$. Следовательно, формула для прогноза скорости смещения будет вида (5.10):

$$v_{\text{пм}} = 164 \left(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}} \right)^{-1,5}. \quad (5.10)$$

Подстановка численных значений в формулу (2.12) для оценки коэффициента сейсмичности приводит к равенству (5.11.1):

$$K_{\text{сф}} = \exp \left[\frac{\ln(v_{\text{п}}) + 0,5 \cdot \ln \left(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}} \right)}{1 - 0,23 \cdot \ln \left(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}} \right)} \right] = \exp \left[\frac{\ln(1,11) + 0,5 \cdot \ln \left(\frac{95,5}{\sqrt[3]{40}} \right)}{1 - 0,23 \cdot \ln \left(\frac{95,5}{\sqrt[3]{40}} \right)} \right] = 1930. \quad (5.11.1)$$

При этом показатель затухания равен (5.11.2):

$$n_{\text{ф}} = 0,5 + 0,23 \cdot \ln(K) = 0,5 + 0,23 \cdot \ln(1930) = 2,24. \quad (5.11.2)$$

Следует обратить внимание на весьма большое расхождение между парами значений параметров (K_c, n) и ($K_{c\phi}, n_\phi$). Однако в этом нет ничего удивительного, так как в паре (K_c, n) не предполагается функциональной связи между коэффициентом сейсмичности и показателем затухания. Отметим, что $n_\phi > n$. Это неравенство имеет физическое объяснение: преобладают объемные волны, которые затухают быстрее поверхностных волн.

В силу объективных причин имелась возможность получения только одного значения скорости смещения вдали от охраняемого объекта. Корректность оценок коэффициента сейсмичности и показателя затухания определялась по результатам мониторинга воздействия СВВ в основании фабрики от массовых взрывов.

5.11 Исследование и прогноз уровня воздействия сейсмозрывных волн от массовых взрывов и взрывов наружных зарядов взрывчатых веществ на обогатительную фабрику

Исследовалось сейсмическое воздействие 2-х массовых взрывов. Расположение взрывов показано на рисунке 5.20, а расположение пунктов регистрации СВВ – на рисунке 5.21.

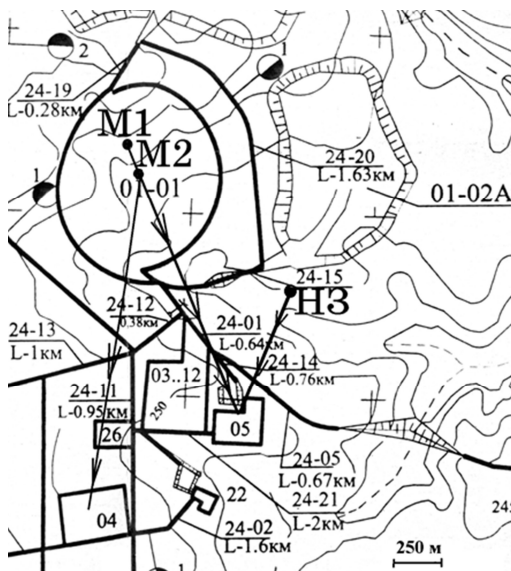


Рисунок 5.20 – Фрагмент ситуационного плана: 04 – Нефтебаза; 05 - Обогатительная фабрика №16; M1 – место проведения массового взрыва 12.08.2003 г.; M2 – место проведения массового взрыва 17.08.2003 г.; H3 – место взрыва наружных зарядов взрывчатого вещества

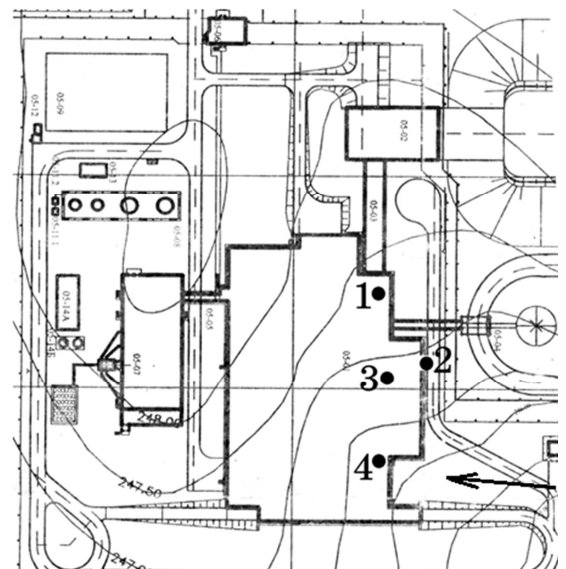


Рисунок 5.21 – Расположение пунктов регистрации СВВ и УВВ: 1 – на крыше здания; 2 – на грунте возле фабрики; 3 и 4 – измерения внутри здания. Стрелкой показано направление распространения УВВ от взрыва наружных зарядов

Первый массовый взрыв производился на вскрышном уступе с ограничением по массе взрывчатого вещества в ступени замедления 2 т, второй массовый взрыв (опытно-промышленный) с максимальной массой взрывчатого вещества в ступени замедления 3,84 т – на добычном уступе. Пункты регистрации СВВ (рисунок 5.21) располагались перед фабрикой на грунте, внутри здания (рисунок 5.22) и на крыше самой высокой части здания.

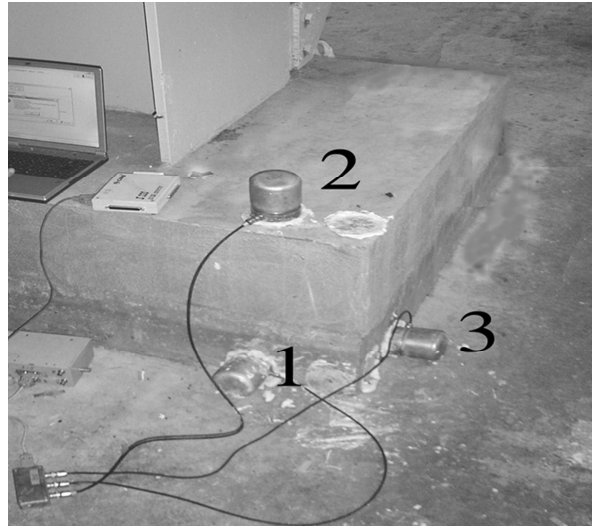


Рисунок 5.22 – Расположение датчиков НС-3 на двутавровой балке (пункт 3, рисунок 5.21) компонент скорости смещения: 1 – тангенциальная; 2 – вертикальная; 3 – радиальная

На рисунках 5.23-5.24 представлены велосигramмы наиболее интенсивной вертикальной компоненты скорости смещения.

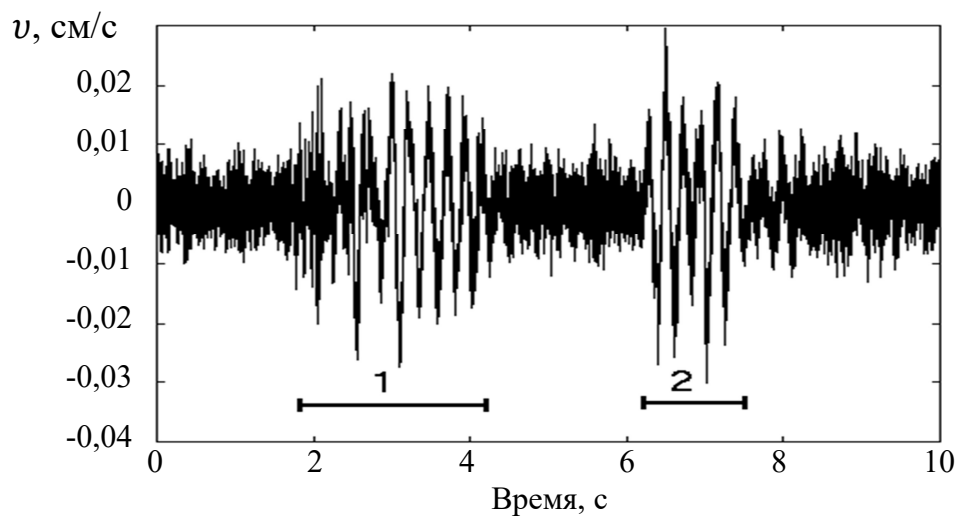


Рисунок 5.23 – Велосигramма вертикальной компоненты скорости смещения основания фабрики (пункт 3) от массового взрыва 12.08.2003 г.

Цуги колебаний соответствуют воздействиям: 1 – СВВ; 2 – УВВ

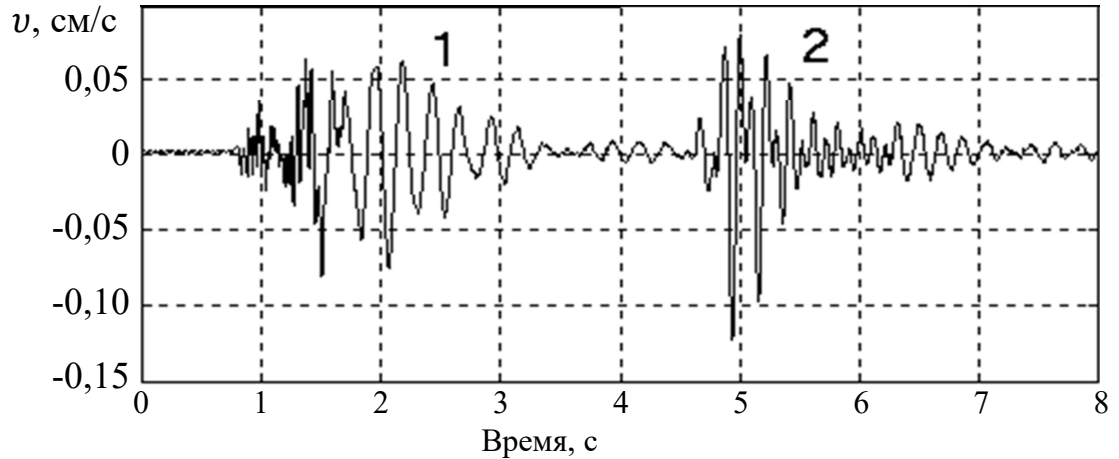


Рисунок 5.24 – Велосиграмма вертикальной компоненты скорости смещения основания фабрики (пункт 4) от массового взрыва 17.08.2003 г. [13].

Цуги колебаний соответствуют воздействиям: 1 – СВВ; 2 – УВВ

На велосиграммах (рисунки 5.23-5.24) четко фиксируются два цуга колебаний, следующих друг за другом с задержкой около 4 с. С учетом расстояний от массовых взрывов до пунктов регистрации сейсмического сигнала можно утверждать, что 1-й цуг (1-го типа) соответствует воздействию СВВ на основание фабрики, а 2-й цуг (2-го типа) – воздействию УВВ на ее фасад. Велосиграммы грунта имеют аналогичный вид.

Были проведены дополнительные исследования воздействия УВВ на фабрику серией взрывов наружных зарядов массами 20 кг, 40 кг и 60 кг на расстоянии 612 м от фабрики (рисунок 5.25, направление стрелки соответствует направлению стрелки на рисунке 5.21).



Рисунок 5.25 – Направление на взрыв наружного заряда ВВ (13.08.2003г.)

Измерения проводились в пунктах регистрации 3, 4 (рисунок 5.21). Из-за вибрации механизмов не удалось получить велосигramму в пункте 3. Велосигramма, зарегистрированная в пункте 4, показана на рисунке 5.26.

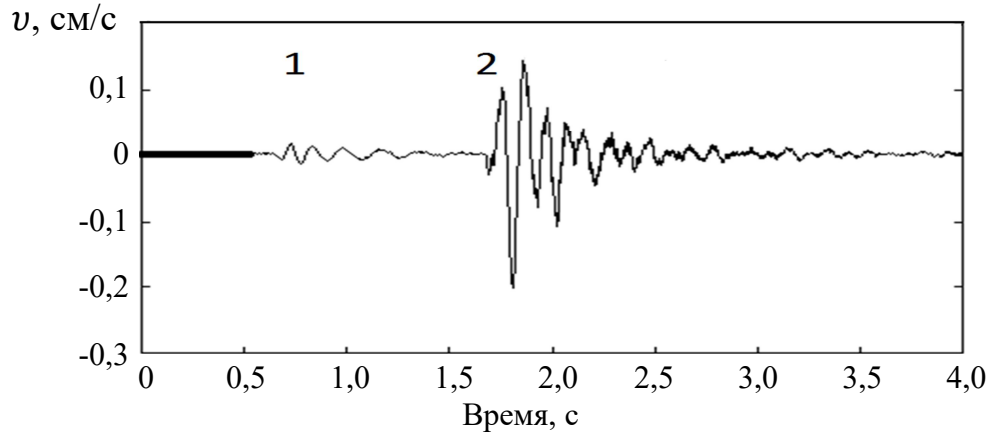


Рисунок 5.26 – Велосигramма вертикальной компоненты скорости смещения основания фабрики (пункт 4) от взрыва наружного заряда взрывчатого вещества массой 60 кг

В таблицу 5.5 сведены параметры колебаний здания.

Таблица 5.5 - Параметры колебаний здания в пункте регистрации 4

Масса накладного заряда ВВ, кг	Пиковое значение вертикальной компоненты скорости смещения, см/с	
	Цуг 1-го типа	Цуг 2-го типа
20	0,0064	0,049
40	0,0098	0,09
60	0,0176	0,2

Из анализа рисунка 5.26 и таблицы 5.5 следует, что в пункте 4 амплитуда цуга 2-го типа почти в 10 раз превышает амплитуду цуга 1-го типа, а зависимость амплитуд цугов от массы наружного заряда взрывчатого вещества близка к линейной, что согласуется с результатом, представленным на рисунке 5.12, для жилого дома. Отмеченные обстоятельства являются указанием на факт раскочки фасада здания в результате воздействия на него УВВ. Отметим, что цуг 1-го типа

имеет только вертикальную компоненту скорости смещения, т.е. при взрыве наружного заряда взрывчатого вещества возбуждается поверхностная СВВ.

Рассмотрим вопрос прогноза воздействия взрывов на обогатительную фабрику по сейсмическому фактору. С помощью формулы М.А. Садовского аппроксимируем значения скоростей смещения, приведенные в таблице 5.5, зависимостью вида $u_{пв}(Q)$ (рисунок 5.27).

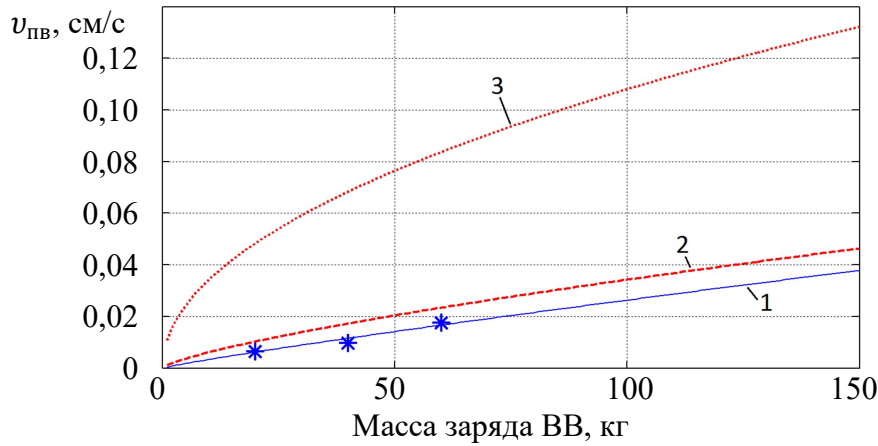


Рисунок 5.27 – Зависимости пикового значения вертикальной компоненты скорости смещения от массы наружного заряда взрывчатого вещества. 1 – аппроксимация.

Прогноз с использованием значений параметров: 2 – $K_{сф}, n_{ф}$; 3 – $K_{с}, n$. * - эксперимент

Как следует из рисунка 5.27, удовлетворительное качество прогноза получается при использовании значений функционально связанных коэффициентов сейсмичности и показателя затухания, несмотря на совершенно разные условия взрывания заглубленного заряда и наружных зарядов взрывчатых веществ. Аппроксимация получена для коэффициента сейсмичности $K_a = 1,34 \cdot 10^4$ и показателя затухания $n_a = 2,69$. Если подставить значение K_a в формулу (5.10.2), то ожидаемое значение показателя затухания будет: $n_o = 0,5 + 0,23 \cdot \ln(1,34 \cdot 10^4) = 2,69$, откуда $n_o \cong n_a$. Согласно классификации сейсмических источников (глава 3) взрывные работы для условий карьера «Нюрбинский» следует отнести к источникам нормального сейсмического воздействия. При этом не играет особой роли заметное расхождение пар параметров (K_a, n_a) и $(K_{сф}, n_{ф})$. Главное в том, что прогнозное и фактическое значения пиковой скорости смещения оказываются достаточно близкими.

Дадим прогнозную оценку сейсмического воздействия массового взрыва, проведенного 17.08.2003. Сложность прогнозирования заключается в выборе массы эквивалентного заряда взрывчатого вещества $Q_{\text{ЭКВ}}$. Рассмотрим следующие подходы:

1. Принять в качестве $Q_{\text{ЭКВ}}$ наибольшую массу взрывчатого вещества в ступенях замедления $Q_{\text{НМ}}$;
2. Воспользоваться предложениями [27] и п. 794 Правила безопасности [127]:

$$Q_{\text{ЭКВ}} = \frac{Q_{\Sigma}}{N^{1/4}},$$

где Q_{Σ} – общая масса одновременно взрывааемых зарядов за массовый взрыв, N – число зарядов взрывчатого вещества или количество ступеней замедления;

3. Принять $Q_{\text{ЭКВ}} = Q_{\Sigma}$.

Согласно проекту массового взрыва примем $Q_{\text{НМ}} = 3840$ кг; $Q_{\Sigma} = 13018$ кг; $N = 7$; $R = 1300$ м. Из велосиграммы для 1-го цуга колебаний (рисунок 5.24) следует, что $v_{\text{ПВ}} = 0,08$ см/с. Результаты расчета прогнозных оценок пикового значения модуля скорости смещения сведены в таблицу 5.6.

Таблица 5.6 - Прогнозные оценки пикового значения модуля скорости смещения

Подход	$Q_{\text{ЭКВ}}$, КГ	$v_{\text{ПМ}}$, см/с	
		По формуле (5.10)	По формулам (5.11.1)-(5.11.2)
1	3840	0,22	0,10
2	8003	0,31	0,17
3	13018	0,40	0,24

Из анализа таблицы 5.6 следует, что прогноз с фиксированным значением показателя затухания ($n = 1,5$) во всех случаях завышен. С учетом функциональной связи между коэффициентом сейсмичности и показателем затухания (подход 1) прогноз согласуется со значением $v_{\text{ПВ}} = 0,08$ см/с, но завышен при выборе подходов 2 и 3.

Замечание. Не следует считать, что оценка коэффициента сейсмичности при показателе затухания $n = 1,5$ является некорректной. При подстановке значения $K = 164$ в неравенство: $0,23\ln K + 0,53 \geq n \geq 0,23\ln K + 0,23$ (глава 3), получим $1,7 \geq n \geq 1,4$. Откуда следует, что сейсмический источник с $n = 1,5$ является источником нормального сейсмического воздействия. С позиции обеспечения безопасности при ведении взрывных работ завышенные оценки скорости смещения грунта накладывают более жесткие требования к максимальной массе одновременно взрывааемых зарядов взрывчатых веществ.

5.12 Результаты исследования колебаний верхней части обогатительной фабрики при взрывании наружных зарядов взрывчатых веществ

В качестве источника УВВ использовалась серия взрывов наружных зарядов граммонита 79/21 массами 40, 80, 120 кг (2004 г). Заряды располагались на отвале карьера (рисунок 5.28) на расстоянии 1120 м от точки регистрации УВВ.



Рисунок 5.28 – Вид на фабрику со стороны установки наружных зарядов взрывчатого вещества. Стрелкой показано место регистрации УВВ

Из рисунка 5.28 следует, что фронт УВВ практически параллелен фасаду фабрики. С помощью сейсмоприемника НС-3 регистрировались радиальные компоненты скорости колебаний здания. Температура воздуха составляла $+11^{\circ}\text{C}$,

дул слабый боковой ветер. Эксперимент проходил в условиях воздействия кратковременных сильных электромагнитных помех. Результаты всех измерений сведены в таблицу 5.7.

Таблица 5.7 - Результаты измерений параметров УВВ и радиальных колебаний здания

Масса заряда, кг	Пиковое значение скорости колебаний, см/с	Пиковое значение избыточного давления, Па	Длительность положительной фазы УВВ, мс
40	1,21	65	13
80	1,97	90	17
120	2,76	120	21

На рисунке 5.29 представлены эпюры скорости колебаний здания, на рисунке 5.30 – эпюры избыточного давления.

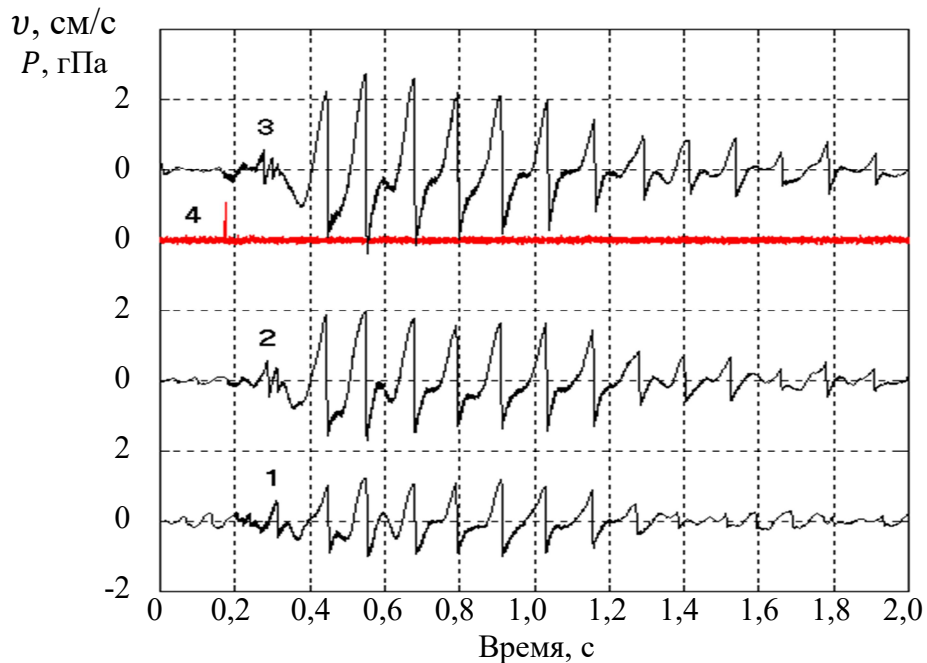


Рисунок 5.29 – Эпюры радиальной компоненты скорости колебаний здания от взрыва наружных зарядов взрывчатого вещества массами: 1 – 40 кг; 2 – 80 кг; 3 – 120 кг; 4 – эпюра УВВ от взрыва заряда 80 кг. Эпюры синхронизированы

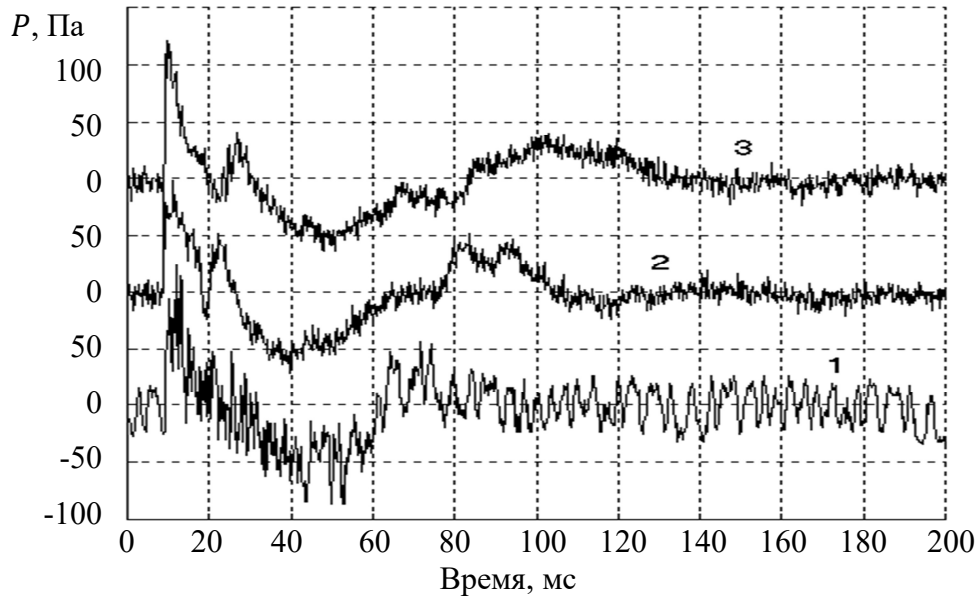


Рисунок 5.30 – Эпюры избыточного давления УВВ от взрыва наружных зарядов взрывчатого вещества массами: 1 – 40 кг; 2 – 80 кг; 3 – 120 кг

5.13 Результаты совместных исследований динамического воздействия массовых взрывов и взрывов наружных зарядов взрывчатых веществ на обогатительную фабрику

Проведены исследования 5-и массовых взрывов и 3-х взрывов наружных зарядов взрывчатого вещества. Взрывы наружных зарядов осуществлялись вблизи мест проведения массовых взрывов спустя 15-20 минут после массового взрыва. На рисунке 5.31 показаны места проведения взрывов и пунктов регистрации.

На рисунке 5.32 представлен вид на массовый взрыв. На рисунке 5.33 показаны расстановка датчиков УВВ у борта карьера и вид на взрыв 3-го наружного заряда взрывчатого вещества (обозначения «9» и «8» на рисунке 5.31 соответственно).

На рисунке 5.34 в качестве примера приведена усредненная эпюра избыточного давления от взрыва 3-го наружного заряда взрывчатого вещества.



Рисунок 5.32. Направление на 2-й массовый взрыв со стороны пункта регистрации на крыше обогатительной фабрики (показано стрелкой). На вставке показано облако от взрыва через 8 с



Рисунок 5.33 – Расстановка датчиков УВВ у борта карьера и вид на взрыв 3-го наружного заряда взрывчатого вещества

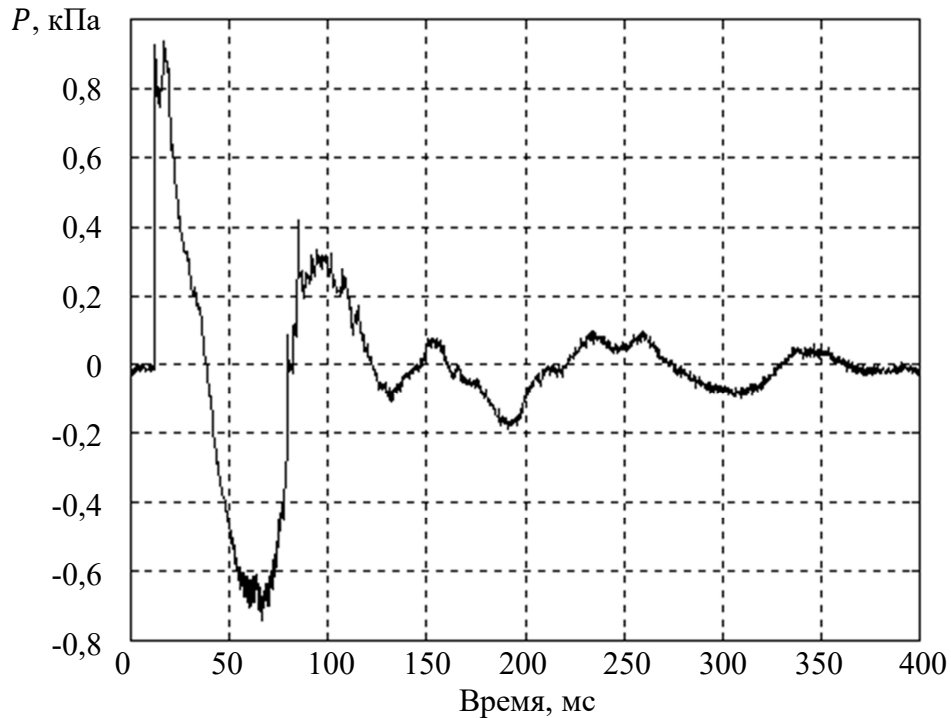


Рисунок 5.34 – Эпюра избыточного давления на фронте УВВ от взрыва 3-го наружного заряда взрывчатого вещества

Были зарегистрированы 2 типа эпюр от массовых взрывов. Первый тип (3-й и 5-й массовые взрывы) напоминает эпюру от взрыва наружного заряда взрывчатого вещества (рисунок 5.35), второй тип (4-й массовый взрыв) представляет собой квазипериодическую последовательность импульсов УВВ (рисунок 5.36).

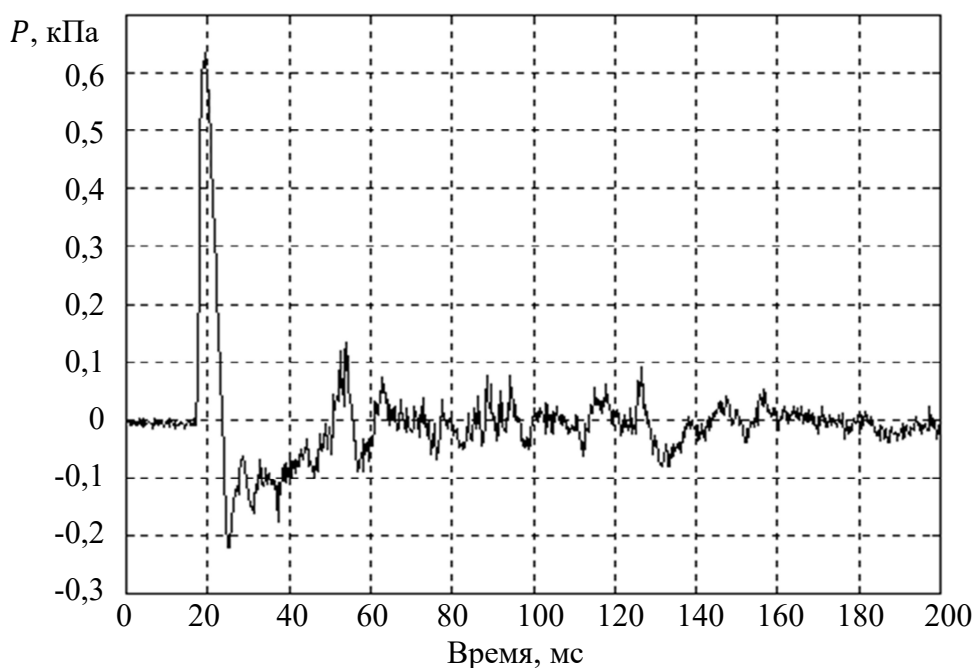


Рисунок 5.35 – Эпюра избыточного давления УВВ от 5-го массового взрыва

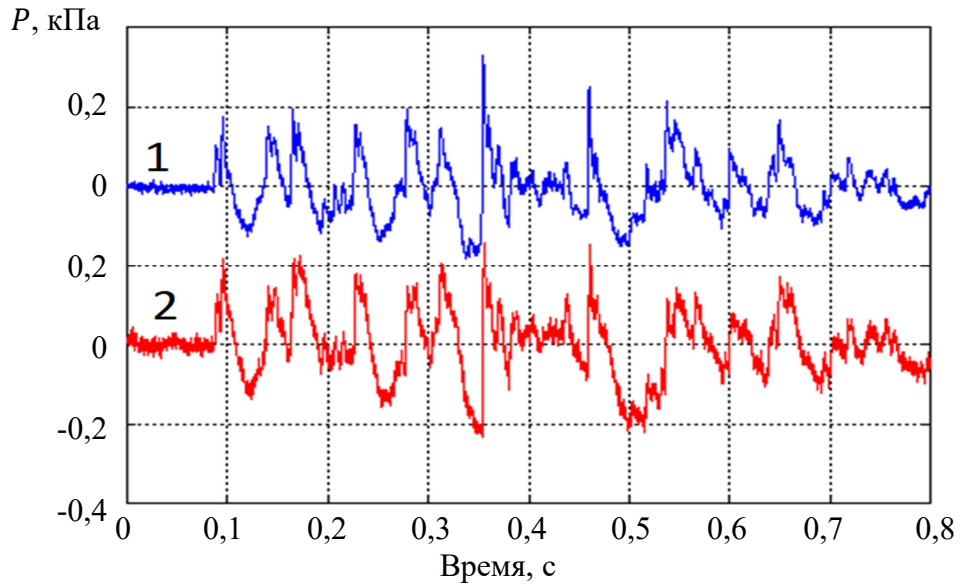


Рисунок 5.36 – Эпюры избыточного давления УВВ от 4-го массового взрыва, полученные с помощью датчиков давления: 1 – ДСЛ 20-6; 2 – МРХ2010

На рисунке 5.37 представлены эпюры колебательной скорости крыши обогатительной фабрики от массовых взрывов, произведенных на вскрышных уступах.

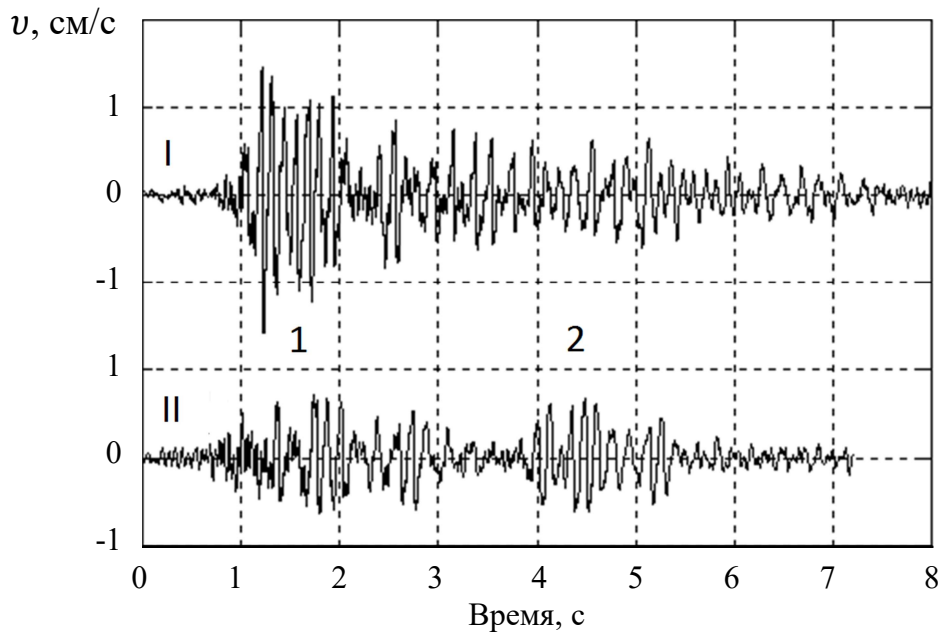


Рисунок 5.37 – Эпюра радиальной компоненты скорости колебаний от массовых взрывов: I – 1-го; II – 2-го. 1 – воздействие на здание СВВ; 2 – то же УВВ

В таблице 5.8 приведены параметры взрывов и результаты инструментальных замеров.

Таблица 5.8 - Основные параметры взрывов и результаты инструментальных замеров

Дата	Взрыв	Q_{Σ} , кг (N)	R_p , м ($R_{0ф}$, м)	$(v_{пр}, \text{см/с})$ $P_{пик}, \text{Па}$	τ_+ , мс
12.09.04	1-й массовый	29979,6 (17)	1082	$(1,58)^*$	-
	2-й массовый	21672 (15)	1173	$(0,72)^*$	-
	1-й наружный	120	1170	(1,62)	-
16.09.04	3-й массовый	13107,6 (22)	831 (1598)	63	5
	4-й массовый	41153,2 (25)	623 (1299)	До 240	До 60
	2-й наружный	120	497 (1173)	920	26
18.09.04	5-й массовый	13550,8 (31)	520 (1537)	620	9
	3-й наружный	120	365 (1390)	960	26

Примечания. R_p – расстояние от места взрыва до пункта регистрации, м; $R_{0ф}$ – то же до фабрики, м; $P_{п}$ – пиковое значение избыточного давления, Па; $v_{пр}$ – пиковое значение радиальной компоненты скорости колебаний здания фабрики, см/с; τ_+ - продолжительность положительной фазы УВВ, мс. Интервал времени короткозамедленного взрывания 45 мс. 1-й, 2-й и 4-й массовые взрывы производились на вскрышных уступах, 3-й и 5-й массовые взрывы – на добычных уступах.

*) – значение определено для раскочки, возбужденной СВВ (рисунок 5.37).

В процессе исследований установлено, что возможна сильная раскочка здания (более чем 15-и кратное усиление радиальной компоненты скорости колебаний). В частности, это следует из анализа наиболее интенсивной радиальной составляющей колебательной скорости крыши здания (рисунок 5.38) с пиковым значением 1,75 см/с и наиболее интенсивной вертикальной составляющей колебательной скорости основания здания (рисунок 5.24) с пиковым значением 0,12 см/с.

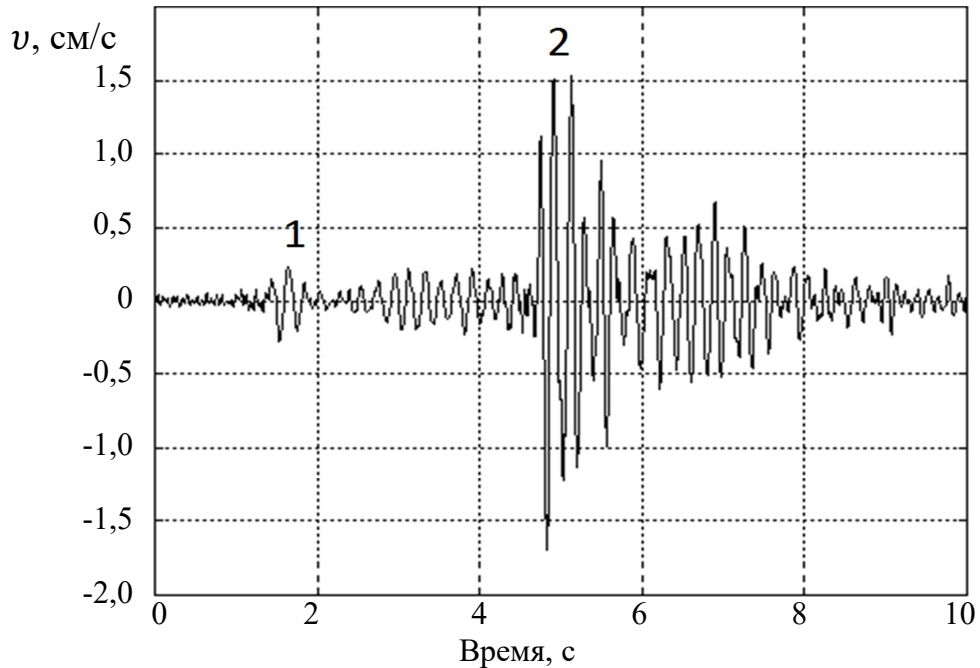


Рисунок 5.38 – Эпюра радиальной компоненты скорости колебаний от массового взрыва (17.08.2003 г.). 1 – воздействие на здание СВВ; 2 – то же УВВ

5.14 Прогноз динамического воздействия карьерных массовых взрывов на охраняемый объект по фактору ударной воздушной волны

Дадим оценку избыточному давлению УВВ от массовых взрывов. Для этого воспользуемся формулой для избыточного давления УВВ от одновременного взрыва группы скважинного заряда [156] вида (5.12):

$$\Delta P = 5,3 \cdot 10^5 \cdot k_3 \cdot k_M \cdot k_T \cdot \sqrt{N_{\text{гр}}} \cdot \left(\frac{21d}{R}\right)^{1,5}, \quad (5.12)$$

где k_3 – коэффициент влияния забойки;

k_M – коэффициент на метеоусловия;

k_T – коэффициент влияния крепости породы на контакте порода – заряд взрывчатого вещества на давление УВВ;

$N_{\text{гр}}$ – количество зарядов взрывчатого вещества в группе;

d – диаметр зарядов взрывчатого вещества, м;

R – расстояние до местоположения взрывааемых зарядов взрывчатого вещества, м.

В соответствии [165] формула (5.12) справедлива для группы зарядов взрывчатого вещества в ступени замедления при условии, что интервал времени замедления не менее 50 мс.

Согласно таблице 5.8 для массовых взрывов, генерирующих эпюры УВВ 1-го типа, в качестве оценки $N_{гр}$ примем количество ступеней замедления $N_{гр} = 22$ (3-й), $N_{гр} = 31$ (5-й). Для 4-го массового взрыва (эпюра УВВ 2-го типа) – количество скважинных зарядов в ступени замедления: $N_{гр} = 12$. Для всех взрывов примем среднюю длину забойки 1,5 м. Отношение этого параметра к диаметру заряда взрывчатого вещества будет $1,5/0,25 = 6$, для которого согласно рисунку 11.5 [156] $k_3 = 0,3$. Согласно рисунку 5.13 в предположении взрывания мерзлых грунтов при положительной температуре примем $k_m = 1$, $k_T = 0,45$. Результаты представим в виде зависимости (5.13):

$$\Delta P = A \cdot \sqrt{\frac{N_{гр}}{R^3}}, \quad (5.13)$$

где $A = 5,3 \cdot 10^5 \cdot k_3 \cdot k_m \cdot k_T \cdot (21d)^{1,5} = 5,3 \cdot 10^5 \cdot 0,3 \cdot 1 \cdot 0,45 \cdot (21 \cdot 0,25)^{1,5} = 8,61 \cdot 10^5 \text{ Па/м}^{3/2}$.

На рисунке 5.39 показан расчетный график.

Чтобы сопоставить массовые взрывы и взрывы наружных зарядов взрывчатого вещества по пиковому избыточному давлению УВВ, используем аппроксимацию [156] в виде (5.14):

$$\Delta P = B \left(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}} \right)^{-1,5}, \quad (5.14)$$

где B – коэффициент, определяемый из критерия наилучшего приближения кривой (5.14) и экспериментальных данных.

В качестве Q для массовых взрывов, производимых на добычных уступах, возьмем эквивалентный заряд, определяемый по формуле (5.15.1):

$$Q_{эКВ} = Q_{\Sigma} / \sqrt{N}. \quad (5.15.1)$$

То же – на вскрышных уступах – по формуле (5.15.2):

$$Q_{эКВ} = Q_{нм} / \sqrt{N_{ст}}, \quad (5.15.2)$$

где $N_{\text{ст}}$ – количество скважинных зарядов в ступени замедления с максимальной массой взрывчатого вещества.

Исходя из проектных данных массовых взрывов и формул (5.15.1) – (5.15.2), получим следующие значения масс эквивалентных зарядов:

Массовый взрыв	3-й	4-й	5-й
$Q_{\text{экв}}$, кг	2794	475	2434

Остальные значения параметров взрывов, необходимые для оценки коэффициента B в аппроксимации (5.14), возьмем из таблицы 5.8. Графики зависимостей избыточного давления УВВ от приведенного расстояния представлены на рисунке 5.40.

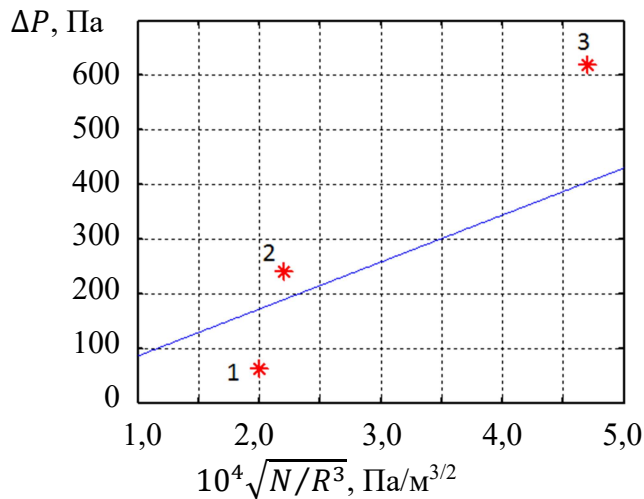


Рисунок 5.39 – Расчетная зависимость избыточного давления УВВ от массовых взрывов. Экспериментальные значения ΔP от массовых взрывов: 1 – 3-й; 2 – 4-й; 3 – 5-й

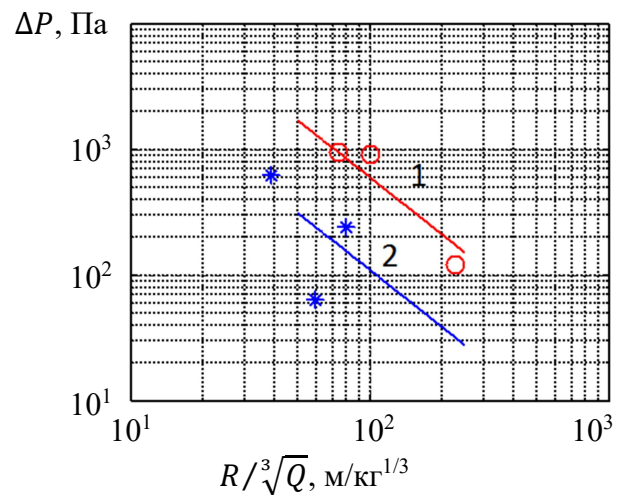


Рисунок 5.40 – Расчетные зависимости избыточного давления УВВ: 1 – наружные заряды взрывчатого вещества; 2 – массовые взрывы. Эксперимент: «o» - наружные заряды; «*» - массовые взрывы

В результате аппроксимации экспериментальных значений избыточного давления УВВ были получены следующие значения коэффициентов B : $6,0 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot \text{м}^{3/2} / \text{кг}^{1/2}$ – для взрывов наружных зарядов взрывчатого вещества; $11 \cdot 10^4 \text{ Па} \cdot \text{м}^{3/2} / \text{кг}^{1/2}$ – для массовых взрывов. Отметим, что величина коэффициента B для взрывов наружных зарядов согласуется со средним значением аналогичного коэффициента при взрывании на скальных грунтах [156] ($5,3 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot \text{м}^{3/2} / \text{кг}^{1/2}$).

С целью сравнения по воздействию УВВ массовых взрывов и взрывов наружных зарядов необходимо так изменить массу эквивалентного заряда массового взрыва, чтобы график 2 ложился на график 1 рисунка 5.40. Это возможно, если массу эквивалентного заряда уменьшить в 25 раз.

Назовем величину $Q_{\text{эфф}} = Q_{\text{экв}}/25$ эффективной массой заряда взрывчатого вещества массового взрыва. Эффективная масса заряда взрывчатого вещества массового взрыва – это масса заряда взрывчатого вещества, при которой массовый взрыв производит УВВ с таким же пиковым избыточным давлением, что и взрыв наружного заряда взрывчатого вещества такой же массы.

В параграфе 5.6 получена линейная зависимость между пиковой колебательной скоростью здания и пиковым избыточным давлением на фронте УВВ. Аналогичная зависимость существует и в случае колебаний обогатительной фабрики от взрывов наружных зарядов. По данным таблицы 5.7 результаты линейной регрессии представлены на рисунке 5.41.

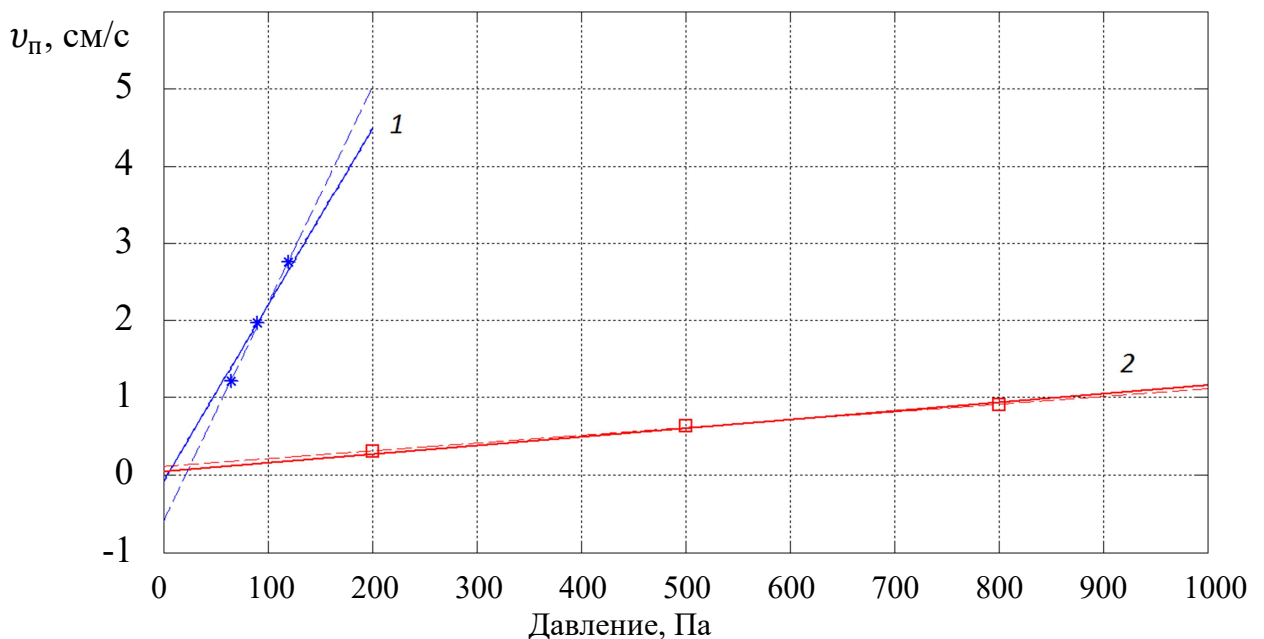


Рисунок 5.41 – Зависимости пиковых значений колебательной скорости от пикового значения избыточного давления на фронте УВВ: 1 – для обогатительной фабрики;

«*» - экспериментальные точки согласно таблице 5.7; 2 – для здания;

«□» - экспериментальные точки согласно [70].

Сплошные прямые – аппроксимация с учетом начала координат;

пунктирные прямые – без учета

Анализ графика 1 (пунктирная линия) на рисунке 5.41 свидетельствует о том, что прямая регрессии пересекает ось абсцисс при большем значении пикового давления, нежели того, что отмечен на рисунке 5.12, так как в отличие от жилого дома здание фабрики представляет собой строительную конструкцию разной высоты (от 20 до 40 м). В пользу линейной зависимости между пиковой колебательной скоростью и пиковым давлением также свидетельствует график 2, построенный по данным [70].

Устанавливая связь между скоростью колебаний здания и пиковым избыточным давлением на фронте УВВ, связывая последний параметр с массой наружного заряда взрывчатого вещества по формуле (5.14), возможен прогноз динамического воздействия массового взрыва на наземный охраняемый объект по фактору УВВ. В качестве примера рассмотрим опытно-промышленный взрыв от 17.08.2003. Исходные данные: добычной уступ; $Q_{\Sigma} = 13018$ кг; $N_{\text{ст}} = 7$; $R = 1300$ м. По формуле (5.15.1) $Q_{\text{экв}} = Q_{\Sigma} / \sqrt{N_{\text{ст}}} = 13018 / \sqrt{7} = 4920$ кг. Откуда $Q_{\text{эфф}} = 4920 / 25 = 197$ кг. По формуле (5.14) $\Delta P = B \left(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}} \right)^{-1,5} = 11 \cdot 10^4 \left(\frac{1300}{\sqrt[3]{197}} \right)^{-1,5} = 33$ Па. Угловой коэффициент линии 1 (рисунок 5.41, пунктир) равен 0,028 см/(Па·с), то же для сплошной линии – 0,023 см/(Па·с). Прогнозное пиковое значение радиальной компоненты скорости колебаний будет $u_{\text{пр}} = 33 \cdot (0,023 \dots 0,028) = 0,76 - 0,92$ см/с. Из рисунка 5.38 следует, что реальное значение этого параметра составляет 1,5-1,7 см/с, что практически в 2 раза превышает прогнозное значение.

Поскольку расхождение результатов заметное, то возникает вопрос: «Является ли УВВ от массовых взрывов единственной причиной раскачки наземного сооружения?». Если нет, то, несмотря на большой временной сдвиг (≈ 4 с) цугов колебаний здания от СВВ и УВВ, динамическое воздействие СВВ и УВВ на охраняемый объект носит совместный характер [146]. Для обоснования этого необходимо определить собственный колебательный спектр здания и колебательный спектр при различных условиях динамического воздействия.

5.15 Определение параметров собственных колебательных мод обогатительной фабрики по эюрам колебательной скорости

Обогатительная фабрика как промышленный объект имеет внутренние источники колебаний. Поэтому, в отличие от жилого дома, появляется возможность регистрировать почти свободные колебания наружной части здания. Для этого, как показано на рисунке 5.42, на крыше в месте крепления пожарной лестницы были установлены сейсмические датчики НС-3. Пример эюры радиальной компоненты колебательной скорости приведен на рисунке 5.43.

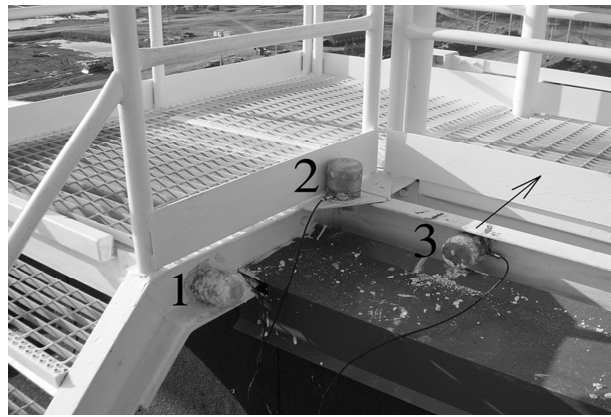


Рисунок 5.42 – Расположение датчиков компонент колебательной скорости:
1 – тангенциальной; 2 – вертикальной; 3 – радиальной. Стрелка - направление на карьер

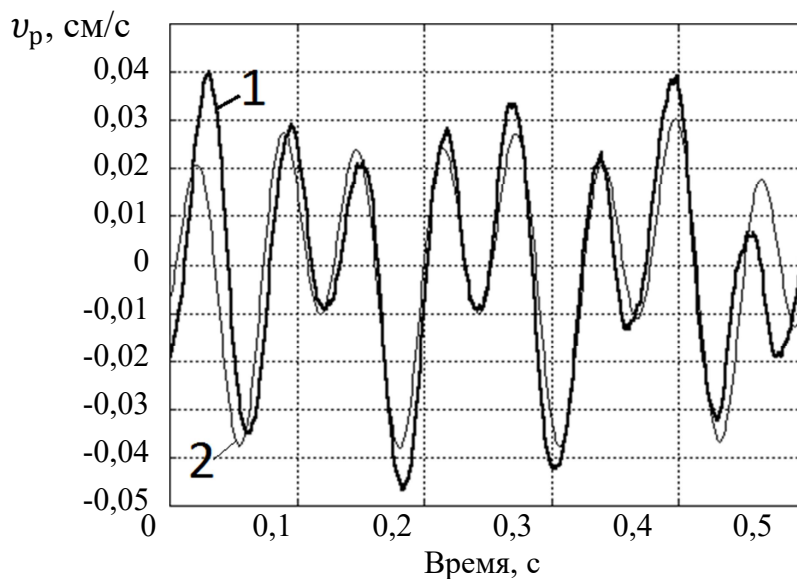


Рисунок 5.43 – Эюры радиальной компоненты колебательной скорости:
1 – экспериментальная; 2 - модельная

Модельная эпора (рисунок 5.43) получена как результат сложения 2-х колебаний одного направления. Реальный спектр или амплитудно-частотная характеристика компонент колебательной скорости получается в результате дискретного преобразования Фурье их экспериментальных эпор (рисунок 5.44).

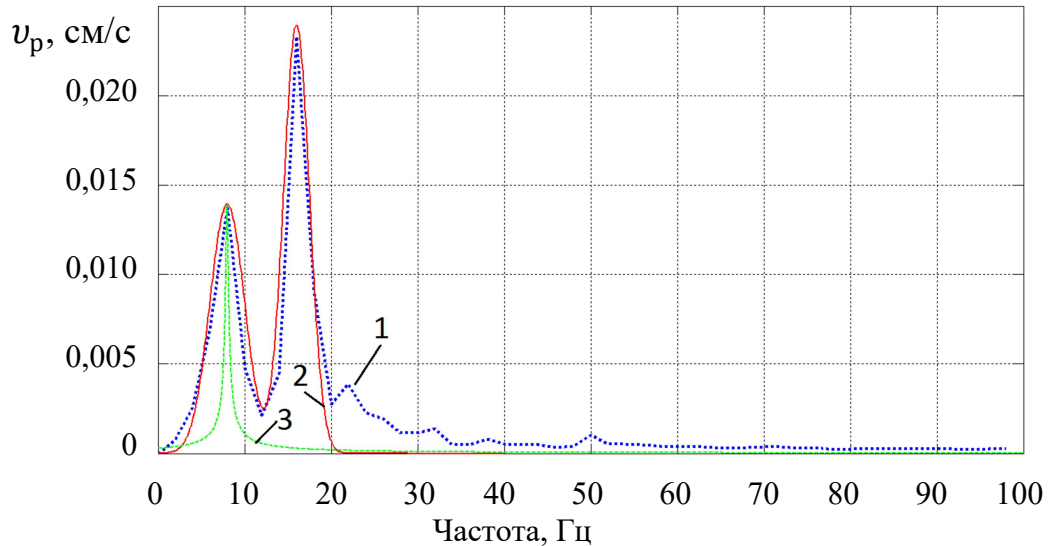


Рисунок 5.44 – Амплитудно-частотная характеристика радиальной компоненты колебательной скорости: 1 – экспериментальная; 2, 3 - модельные

Известно, что затухающее колебание в спектральном представлении описывается кривой Лоренца (кривая 3 на рисунке 5.44 для коэффициента затухания равного 1 с^{-1}). Используя результаты, полученные в начале текущей главы, будем считать, что реальное колебание представляет собой совокупность затухающих гармоник с распределением частот, подчиняющихся нормальному закону. Тогда реальное колебание в спектральном представлении описывается кривой Гаусса (кривая 2 на рисунке 5.44). В этом случае характеристикой ширины кривой является σ – среднее квадратичное отклонение. Из сравнения экспериментального и модельных графиков следует, что аппроксимация реального колебания в виде кривой Гаусса более предпочтительна [102].

В достоверности определения параметров колебательных мод фабрики без использования внешнего источника динамического воздействия и правильности выбора аппроксимации колебательной моды в спектральном представлении в виде кривой Гаусса легко убедиться, используя способ определения параметров

колебательных мод, рассмотренный в начале текущей главы. Для определенности используем эпюру УВВ с пиковым избыточным давлением $P = 120$ Па (рисунок 5.30). Из-за зашумленности эпюры аппроксимируем ее в виде кусочно-гладкой кривой методом наименьших квадратов с использованием полиномов 1-3-й степени (рисунок 5.45). Крутизна нарастания избыточного давления (линейный участок, отмеченный на рисунке 5.45 цифрой «1») составляет $0,15$ МПа/с.

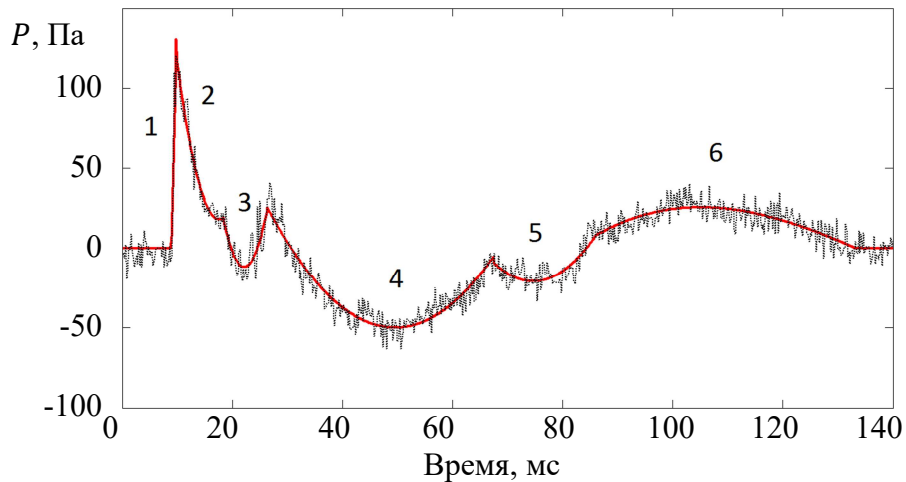


Рисунок 5.45 – Аппроксимация эпюры избыточного давления. Цифрами обозначены участки аппроксимации реальной эпюры

Используя аппроксимацию эпюры избыточного давления и экспериментальную зависимость радиальной компоненты колебательной скорости (кривая 3 рисунка 5.29), получим модельную эпюру радиальной компоненты колебательной скорости (рисунок 5.46). При моделировании частота колебаний принималась $8,2$ Гц. Отметим, что эпюры УВВ и скорости колебаний здания (обозначены цифрами 4 и 3 на рисунке 5.29) сдвинуты по времени на $0,17$ с. Это связано с тем, что для записи эпюры скорости колебаний использовался низкочастотный сейсмический датчик НС-3, который вносил дополнительную задержку. Этот факт отмечен стрелками 1 и 2 на рисунке 5.46.

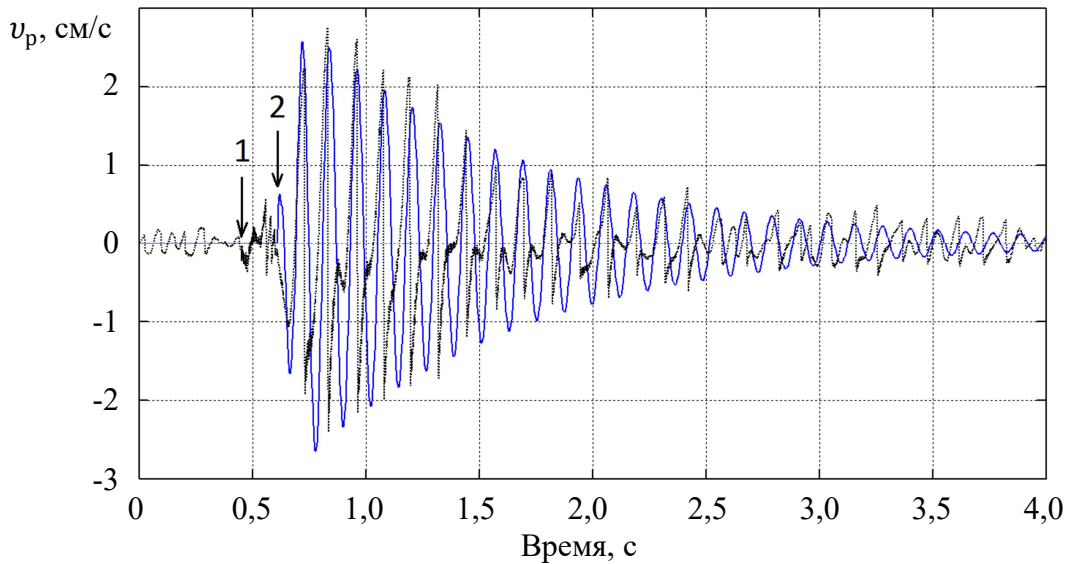


Рисунок 5.46 – Эпюры радиальной компоненты колебательной скорости: эксперимент (прерывистая кривая); модель (сплошная кривая). 1 – момент времени прихода импульса УВВ, зарегистрированный датчиком НС-3; 2 – момент времени, принятый при моделировании

Модельная эпюра радиальной компоненты колебательной скорости получена без учета моды 16,2 Гц. Отметим два аргумента в пользу такого решения. На рисунке 5.47 приведены амплитудно-частотные характеристики экспериментальной и модельной колебательной скорости для 3-х временных окон. Дискретное преобразование Фурье эпюр радиальной компоненты колебательной скорости осуществлялось для интервалов времен кратных одной, двух и трех значений обратных величин коэффициента затухания (1 c^{-1}) модельной эпюры. Аппроксимации Фурье-образов строились в приближении кривой Гаусса.

Из анализа аппроксимаций рисунка 5.47 следует, что для временных окон шириной в 1 с и 2 с мода 8 Гц почти в 2 раза по амплитуде превышает моду 16,2 Гц (согласно рисунку 6.32 наблюдается обратная ситуация), для временного окна шириной в 3 с амплитуды мод 8 Гц и 16,2 Гц практически одинаковы. Поэтому мода 16,2 Гц не имеет связи с внешним источником возбуждения колебаний (или такая связь не существенна), что является первым аргументом в пользу того, что ее не следует учитывать при моделировании. Вторым аргументом

заключается в том, что даже если и учитывать эту моду, то это не улучшает качества сходства экспериментальной и модельной эпюр колебательной скорости.

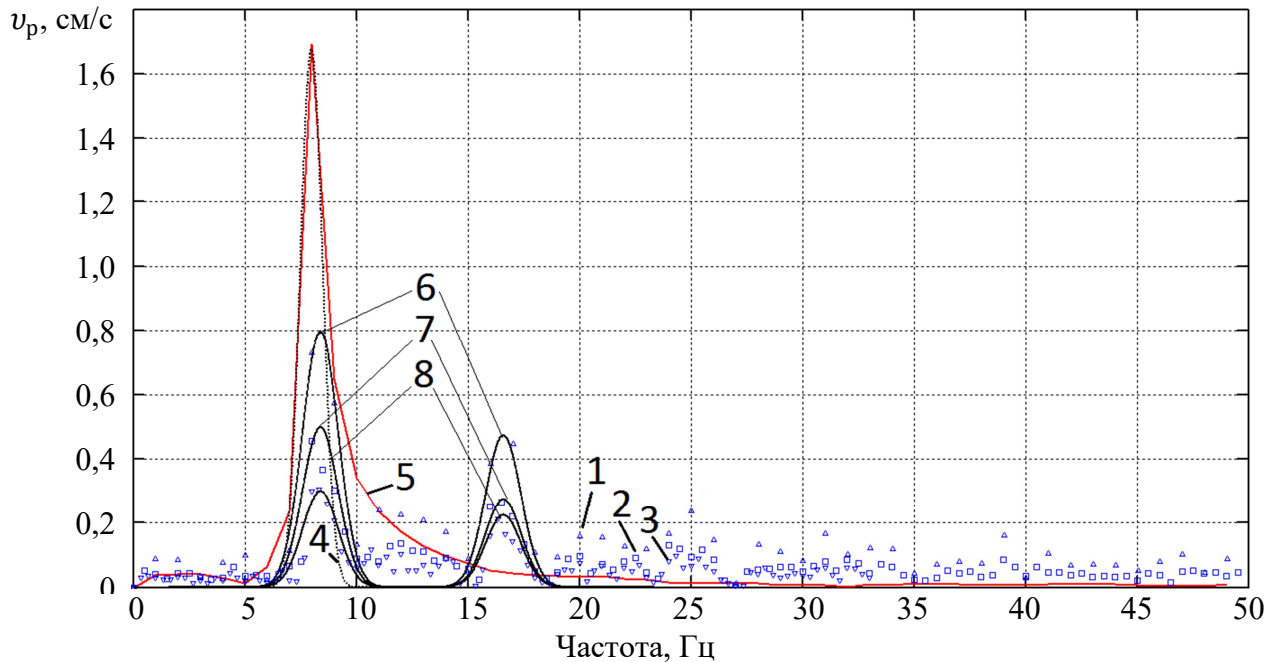


Рисунок 5.47 – Амплитудно-частотные характеристики радиальной компоненты колебательной скорости для временных окон: 1 с – «1», «4», «5», «6»; 2 с – «2», «7»; 3 с – «3», «8».

Графики: 1-3 – эксперимент; 4, 6-8 – аппроксимация; 5 – модель. Источник колебаний – взрыв наружного заряда взрывчатого вещества массой 120 кг

Факт зависимости амплитуды колебательной моды от ширины временного окна является следствием, вытекающем из теории преобразования Фурье. В преобразовании Фурье сигнал представляется через гармонические составляющие. В нашем случае имеют место затухающие колебания. Необходимость применения аппроксимации спектра, полученного путем дискретного преобразования Фурье, вытекает из конечности выборки при оцифровке аналогового сигнала. Если частота максимума колебательной моды попадает между ближайшими частотами дискретного преобразования Фурье, то вычисленный максимум имеет неявный вид (точки 1-3 рисунка 5.47). Чтобы установить действительное положение максимума и его значение необходимо «натянуть» кривую Гаусса на соответствующие точки дискретного преобразования Фурье (точки 1 и кривая 6 рисунка 5.47). Параметры

колебательных мод фабрики для различных режимов возбуждения представлены в таблицах 5.9-5.10.

Таблица 5.9 - Параметры колебательных мод фабрики от взрыва наружных зарядов взрывчатого вещества

Q , кг	Δt , с	I мода				II мода			
		f_a , Гц	$v_{ка}$, см/с	v_a , см/с	σ , Гц	f_a , Гц	$v_{ка}$, см/с	v_a , см/с	σ , Гц
120	1,0	8,4	1,6	0,8	0,8	16,6	0,95	0,47	0,8
	2,0		1,0	0,5			0,55	0,27	
	3,0		0,6	0,3			0,45	0,22	
80	1,0	8,4	1,0	0,5	0,8	16,6	0,65	0,33	0,8
	2,0		0,6	0,3			0,4	0,2	
	3,0		0,4	0,2			0,3	0,15	
40	1,0	8,6	0,28	0,23	0,5	16,7	0,2	0,16	0,5
	2,0		0,17	0,13			0,15	0,12	

Примечания:

1. Приняты следующие обозначения: Q – масса наружного заряда взрывчатого вещества; Δt – ширина временного окна, по которому производится дискретное преобразование Фурье; f_a – аппроксимированное значение частоты моды с помощью функции плотности нормального распределения; $v_{ка}$ – коэффициент аппроксимации; v_a – аппроксимированное значение амплитуды скорости колебаний.
2. Величины v_a и $v_{ка}$ связаны соотношением: $v_a = v_{ка} \cdot Norm(f, f_a, \sigma)$, где $Norm$ - функция плотности нормального распределения частоты f .
3. Для амплитудно-частотной характеристики модельной радиальной компоненты колебательной скорости (кривая 5 рисунка 5.47) для $\Delta t = 1$ с получены следующие параметры: $f_a = 8,2$ Гц, $v_{ка} = 1,9$ см/с, $v_a = 1,7$ см/с, $\sigma = 0,45$ Гц.

Таблица 5.10 - Параметры колебательных мод фабрики от внутренних источников

Направление колебаний	Частота, Гц	СКО ^{*)} , Гц	Амплитуда, см/с
Радиальное	8	1,5	0,014
	16,2	1,2	0,024
Тангенциальное	4,2	1,5	0,0053
	16,2	1,5	0,0088
Вертикальное	5,0 ^{**)}	2,5	0,0026
	16,2	1,5	0,016

Примечание: ^{*)} среднее квадратичное отклонение; ^{**)} весьма грубая оценка параметров моды.

Из анализа таблиц 5.9-5.10 следует:

- среднее квадратичное отклонение модельной колебательной моды почти в 2 раза меньше средних квадратичных отклонений экспериментальных колебательных мод;
- частоты модельной и экспериментальных мод, полученных от УВВ при взрыве наружных зарядов и от внутренних источников, отличаются не более чем на 3%;
- коэффициенты аппроксимации для модельной и экспериментальной колебательной моды отличаются не более чем на 20%;
- с увеличением уровня динамического воздействия взрывных работ на наземный охраняемый объект происходит смещение спектра колебаний в низкочастотную область [148] и уменьшение средних квадратичных отклонений колебательных мод (подобный факт уже был отмечен в параграфе 5.4).

Проведенный анализ показывает корректность применения аппроксимации колебательного спектра здания с помощью нормального закона распределения частот колебательных мод и свидетельствует, в основном, об одномодовом характере радиальных колебаний верхней части фабрики.

5.16 Анализ колебательных мод обогатительной фабрики при динамическом воздействии взрывных работ на карьере

Анализ колебательных мод обогатительной фабрики будем проводить с учетом следующей последовательности построения спектров компонент колебательной скорости: нижняя часть здания от взрыва наружного заряда взрывчатого вещества (рисунок 5.26) и опытно-промышленного массового взрыва (рисунок 5.24); верхняя часть здания от опытно-промышленного массового взрыва (рисунок 5.38) и 2-го массового взрыва (рисунок 5.37, кривая «II»).

На рисунках 5.48-5.49 показаны спектры вертикальной компоненты колебательной скорости нижней части здания от СВВ и УВВ соответственно; на рисунке 5.50 - спектры радиальной компоненты колебательной скорости верхней части здания от СВВ и УВВ опытно-промышленного массового взрыва соответственно; на рисунках 5.51-5.52 – от СВВ и УВВ 2-го массового взрыва соответственно. Аппроксимации спектров на рисунках 5.48-5.50 получены для временного окна 1 с, на рисунках 5.51-5.52 – для временного окна 2 с.

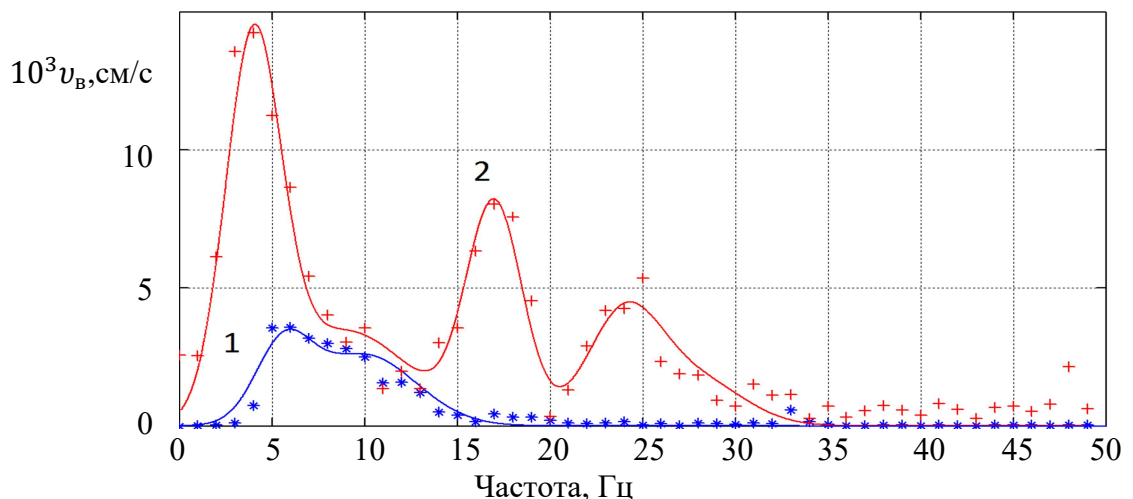


Рисунок 5.48 – Спектры вертикальной компоненты колебательной скорости нижней части здания от СВВ. Эксперимент: «*» - взрыв наружного заряда взрывчатого вещества; «+» - массовый взрыв. 1, 2 – аппроксимации

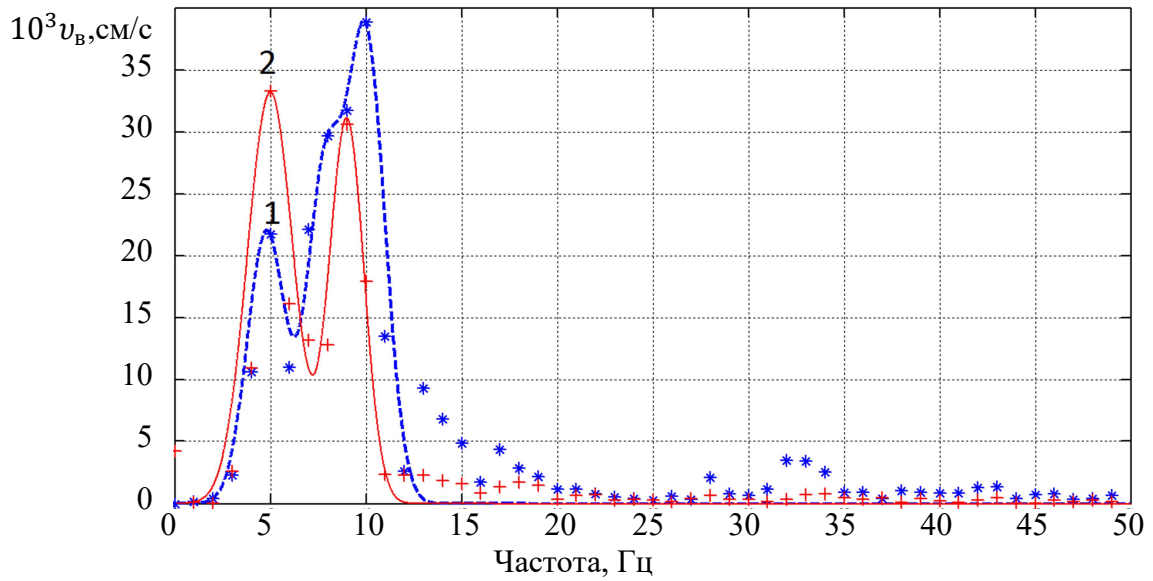


Рисунок 5.49 – Спектры вертикальной компоненты колебательной скорости нижней части здания от УВВ. Обозначения: см. рисунок 5.48

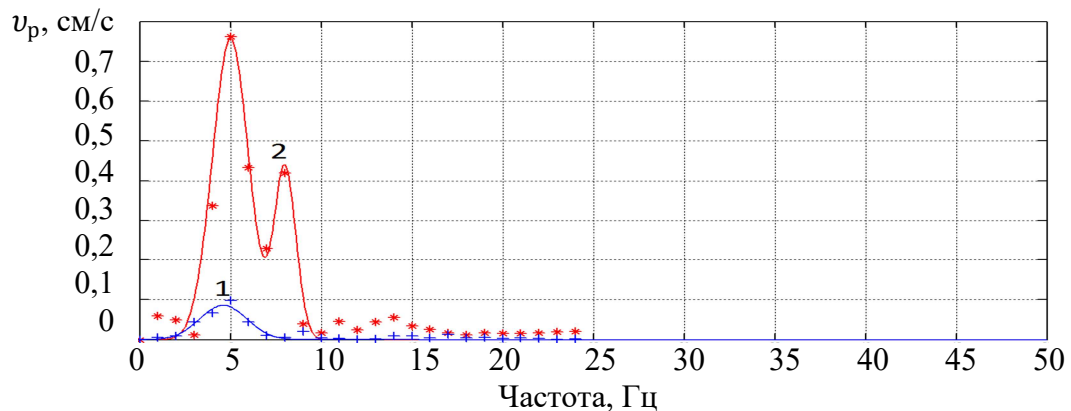


Рисунок 5.50 – Спектры радиальной компоненты колебательной скорости верхней части здания от массового взрыва [13].

Эксперимент: «+» - воздействие СВВ; «*» - воздействие УВВ. 1, 2 – аппроксимации

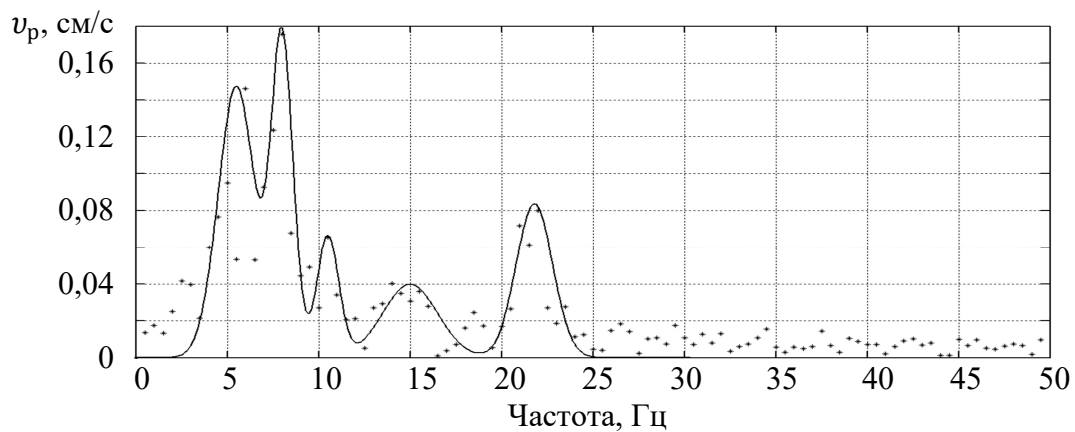


Рисунок 5.51 – Спектры радиальной компоненты колебательной скорости верхней части здания от СВВ 2-го массового взрыва. Эксперимент: «*». Аппроксимация: сплошная кривая

В таблицу 5.11 сведены параметры колебательных мод, использованные при построении аппроксимаций спектров колебательных скоростей.

Таблица 5.11 - Параметры колебательных мод

Взрыв	Участок эпюры	Нижняя часть здания				Крыша здания			
		f_a , Гц	$v_{ка}$, см/с	v_a , см/с	σ , Гц	f_a , Гц	$v_{ка}$, см/с	v_a , см/с	σ , Гц
Опытно- промышленный	СВВ	4	0,05	0,014	1,5	4,6	0,28	0,08	1,3
		9	0,03	0,003	3,5	-			
		17	0,03	0,008	1,5				
		24	0,02	0,004	2				
		28	0,01	0,003	2,5				
	УВВ	5,1	0,1	0,031	1,2	5	1,9	0,76	1,0
		9	0,07	0,03	0,9	8	0,65	0,45	0,6
Наружный заряд ВВ массой 60 кг	СВВ	5,6	0,01	0,004	1,5	-			
		10	0,018	0,003	2,8				
	УВВ	4,8	0,055	0,021	1				
		7,8	0,057	0,027	0,9				
		10	0,094	0,035	1				
2-й массовый	СВВ	-				5,5	0,37	0,14	1
						8	0,26	0,17	0,6
						10,5	0,1	0,06	0,6
						15	0,15	0,08	1
						21,8	0,21	0,04	1,5
	УВВ	-				6,3	0,2	0,18	0,4
						8,4	0,32	0,18	0,7
1-й наружный заряд ВВ	УВВ	-				6,8	0,3	0,06	1,5
						8,5	0,58	0,45	0,5
						16,6	0,23	0,18	0,5

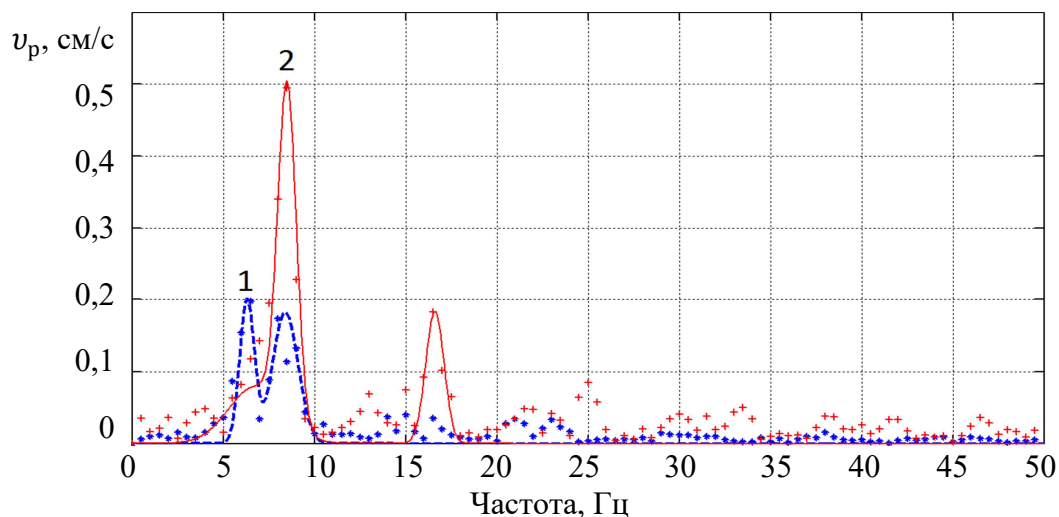


Рисунок 5.52 – Спектры радиальной компоненты колебательной скорости верхней части здания от УВВ: 2-го массового взрыва («*» - эксперимент, «1» - аппроксимация); взрыва 1-го наружного заряда взрывчатого вещества («+» - эксперимент, «2» - аппроксимация)

Анализируя рисунки 5.48-5.52 и параметры колебательных мод (таблица 5.11), приходим к следующим выводам:

- при переходе от нижней к верхней частям здания происходит резкое возрастание амплитуды колебательной скорости до 15 раз при воздействии опытно-промышленного массового взрыва;

- различие в динамическом воздействии на здание взрыва наружного заряда взрывчатого вещества и массового взрыва выражается в появлении дополнительной интенсивной моды (5 Гц при массовом взрыве) в спектре колебательной скорости крыши;

- динамическое воздействие массовых взрывов, проводимых на вскрышных уступах, характеризуется примерно одинаковыми амплитудами колебательных мод от СВВ и УВВ (малой раскачкой здания);

- при взрывании наружного заряда взрывчатого вещества после массового взрыва проявляется дополнительная мода (6,8 Гц) малой амплитуды в спектре колебательной скорости крыши здания, которая наиболее характерна для массового взрыва;

- при увеличении динамического воздействия на здание от взрыва наружного заряда взрывчатого вещества до массового взрыва наблюдается смещение спектра колебательной скорости в низкочастотную область;

- средние квадратичные отклонения колебательных мод нижней части здания превышают аналогичные параметры колебательных мод верхней части здания до 50%;

- полоса частот с максимумом 21,8 Гц соответствует интервалу времени короткозамедленного взрывания $1/21,8 \approx 46$ мс (проектное значение 45 мс).

5.17 Обсуждение совместного воздействия сеймовзрывных и ударных воздушных волн на охраняемый объект

Анализ коэффициента затухания колебательных мод, проведенный в параграфе 5.15, дает оценку в 1 с^{-1} . Окончание цуга колебаний от СВВ и начало цуга колебаний от УВВ разнесены по времени, по крайней мере, на 3 с. Это означает амплитуда колебаний от СВВ к моменту начала колебаний от УВВ должна уменьшиться примерно в $e^3 \approx 20$ раз. Поэтому по фактору затухания колебаний практически не должно быть совместного воздействия СВВ и УВВ.

Доказано появление дополнительной весьма интенсивной моды 5 Гц, характерной для вертикальной компоненты колебательной скорости нижней части здания, в спектре радиальной компоненты колебательной скорости крыши здания именно после воздействия СВВ. Появление дополнительных мод, смещение мод по частоте, изменение их средних квадратичных отклонений является доказательством нелинейного поведения системы «сооружение-грунт» при динамическом воздействии взрывных работ. В параграфе 5.14 дана прогнозная оценка пикового значения радиальной компоненты колебательной скорости крыши, которая оказалась почти в 2 раза меньше ее экспериментального значения. Если исключить моду 5 Гц, то исчезнет отмеченное расхождение.

Между опытно-промышленным взрывом с одной стороны и 1-м, 2-м массовыми взрывами с другой стороны есть существенное различие. Если в первом случае взрыв производился с интервалом времени замедления 20 мс, то во втором случае интервал времени замедления составлял 45 мс. Это существенно меняет спектр колебательных мод. При воздействии опытно-промышленного взрыва на здание успевает произойти формирование мощной моды 5 Гц (рисунок 5.50), т.е. происходит аккумуляция энергии СВВ и энергии УВВ в одном временном окне посредством перестройки колебательного спектра здания.

При динамическом воздействии на здание других массовых взрывов не происходит формирование моды 5 Гц, хотя в спектре радиальной компоненты колебательной скорости обнаруживается мода 6,3 Гц (рисунок 5.52 и таблица 5.11). Это свидетельствует о том, что порций сейсмической энергии, поступающих в основание здания при интервале времени замедления 45 мс, не достаточно для создания сильной раскачки. Доказательством, что сейсмическая энергия поступает порциями, является наличие полосы частот с максимумом, расположенным на частоте 21,8 Гц (рисунок 5.51), которая соответствует интервалу времени замедления. Если сравнивать воздействие 1-го и 2-го массовых взрывов на здание от момента прихода УВВ, то обнаружится, что 1-й массовый взрыв (при его более близком расположении к зданию и большей массе взрывчатого вещества по сравнению со 2-м массовым взрывом) приводит к меньшей раскачке здания (рисунок 5.37).

Таким образом, имеет место совместное воздействие СВВ и УВВ на здание обогатительной фабрики от массовых взрывов, проявляющиеся в явлении сильной раскачки наружной части здания. При этом раскачка существенно уменьшается при переходе к большим интервалам времени замедления [150].

В таблице 5.12 приведены индикативные оценки соответствия наиболее интенсивных колебательных мод уровням колебаний согласно санитарно-гигиеническим нормам, изложенным в [48].

Таблица 5.12 - Индикативные оценки соответствия наиболее интенсивных колебательных мод уровням колебаний согласно санитарно-гигиеническим нормам

Частота колебаний, Гц	Амплитуда колебательной скорости, см/с	Амплитуда смещения ^{*)} - a , см	Допустимая амплитуда смещения, см
5	0,76	0,024	0,016
8	0,45	0,009	0,0056

Примечание: ^{*)} – амплитуда смещения вычислялась по формуле $a = v / (2\pi\nu)$.

Как следует из таблицы 5.12 и [48], колебательные моды с частотами 5 и 8 Гц по восприятию человеком относятся к категории сильно ощутимых. Это обстоятельство подтверждает параграф 5.8.1 с точки зрения субъективного восприятия производственным персоналом реакции конструктивных элементов и здания фабрики на воздействие СВВ, а так же и УВВ от массовых взрывов [13].

5.18 Выводы по Главе 5

1. Разработан способ прогноза колебаний наземных объектов при импульсном воздействии УВВ, позволяющий находить параметры колебательных мод (амплитуду, частоту колебаний, коэффициент затухания колебаний) из экспериментальных эпюр скоростей колебаний.

2. Исследовано воздействие УВВ на жилой дом от взрывных работ для пиковых избыточных давлений на фронте УВВ в диапазоне 50,3-129 Па и радиальной компоненты скорости колебаний здания в диапазоне 3-8 мм/с; проведено моделирование зависимости радиальной компоненты скорости колебаний от времени для количества колебательных мод 1-9: при одномодовом приближении значение коэффициента затухания превышает в два раза значение коэффициента затухания, принимаемого при многомодовом анализе.

3. Показано, что с возрастанием пикового давления на фронте УВВ спектр колебательных мод претерпевает качественное изменение в сторону доминирования низкочастотных составляющих и появления дополнительных колебательных мод, а само изменение носит немонотонный характер.

4. Показано, что для пиковых избыточных давлений на фронте УВВ в интервале 50,3-129 Па колебательные моды здания, в основном, подчиняются закону нормального распределения.

5. Теоретически дана оценка значения коэффициента затухания колебаний (меньше $0,12 \text{ с}^{-1}$), при котором возможно увеличение амплитуды скорости колебаний охраняемого объекта после воздействия на него импульсом УВВ.

6. Установлена прямая пропорциональная зависимость между пиковой скоростью колебаний жилого дома панельного типа с ленточным фундаментом и пиковым избыточным давлением на фронте УВВ.

7. Значения модельных параметров колебаний определяются с ошибками: амплитуды – 30-35%; частоты - 0,2-0,3 Гц; единого для всех колебательных мод коэффициента затухания колебаний – 20-25%.

8. Разработана и апробирована измерительная установка для определения параметров УВВ на основе цифрового осциллографа TDS3034B, позволяющая регистрировать эпюры УВВ в диапазоне избыточных давлений 10-10000 Па с соотношением сигнал-шум до 1000:1 и частотой дискретизации до 5 кГц.

9. Для многолетнемерзлых горных пород в предположении существования функциональной связи между коэффициентом сейсмичности и показателем затухания по результатам взрыва одиночного заглубленного заряда взрывчатого вещества произведена оценка коэффициента сейсмичности ($K_{сф} = 1930$) и показателя затухания ($n_{ф} = 2,24$).

10. Из анализа сейсмического воздействия взрыва наружных зарядов взрывчатого вещества разной массы экспериментально доказано, что существует функциональная связь между коэффициентом сейсмичности и показателем затухания. Прогноз сейсмического воздействия массового взрыва с применением

значений коэффициента сейсмичности и показателя затухания, полученных в предположении существования функциональной связи между ними, соответствует фактическому уровню сейсмического воздействия массового взрыва.

11. В диапазоне избыточных давлений УВВ до 120 Па установлена прямая пропорциональная зависимость между пиковыми значениями радиальной компоненты колебательной скорости верхней части охраняемого объекта, имеющего свайный фундамент в многолетнемерзлых породах, и пиковым избыточным давлением на фронте УВВ.

12. Экспериментально показано, что эпюры УВВ от массовых взрывов, произведенных на добычных уступах, характеризуются явно выраженным одиночным импульсом УВВ, эпюры УВВ от массовых взрывов, произведенных на вскрышных уступах, - серией импульсов УВВ.

13. Разработан способ прогноза динамического воздействия массовых взрывов по фактору УВВ на охраняемый объект, позволяющий предсказать опасность совместного воздействия СВВ и УВВ на объект.

14. Определены параметры собственных колебательных мод охраняемого объекта от внутренних источников колебаний. Результаты сопоставлены с экспериментальными и расчетными параметрами, полученными при воздействии УВВ от взрывов наружных зарядов взрывчатого вещества. Отмечено небольшое расхождение частот колебательных мод в пределах 0,2-0,3 Гц.

15. Разработан и обоснован способ аппроксимации спектра компонент колебательной скорости с помощью функции плотности нормального распределения частот мод. Установлена связь между шириной временного окна, в интервале которого производится дискретное преобразование Фурье, и амплитудой колебательных мод.

16. Доказано, что с увеличением динамического воздействия взрывных работ на наземный объект происходит смещение спектра колебаний в

низкочастотную область и уменьшение средних квадратичных отклонений колебательных мод.

17. Показано, что при динамическом воздействии массового взрыва на наружный объект возможна его сильная раскачка (возрастание амплитуды колебательной скорости до 15 раз).

18. На основе анализа дополнительных колебательных мод установлен механизм совместного воздействия СВВ и УВВ от массовых взрывов, объясняющий сильную раскачку здания. Доказано влияние интервала времени замедления короткозамедленного взрывания на величину раскачки здания, начиная с момента воздействия на здание УВВ.

Основные материалы главы 5 опубликованы в работах [13, 101, 102, 116, 146, 148, 150, 152, 203].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации на основе выполненного комплекса исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых квалифицируется как решение научной проблемы по основам прогноза динамического воздействия взрывных работ на охраняемые объекты, включающее установленные закономерности пространственного и временного распределений сейсмозрывных и ударных воздушных волн, имеющее существенное значение для повышения безопасности ведения взрывных работ на предприятиях минерально-сырьевого комплекса Российской Федерации.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. При проведении анализа литературных источников не выявлены: количественная связь между коэффициентом сейсмичности и показателем затухания СВВ и классификация взрывных работ по сейсмическому воздействию на охраняемые объекты; способы прогноза резонансных явлений в массиве горных пород при подземных массовых взрывах и критерий безопасного ведения взрывных работ в этом случае; количественные критерии, позволяющих минимизировать воздействие на наземные охраняемые объекты как исключительно по фактору УВВ, так и при совместном воздействии УВВ и СВВ на основе актуальных динамических характеристик самих объектов.

2. Установлены пространственные и временные закономерности скорости смещения грунта при ведении взрывных работ на карьерах в зависимости от показателя затухания сейсмозрывных волн и коэффициента сейсмичности. Прогнозное значение скорости смещения грунта в основании охраняемых объектов по сейсмическому фактору безопасного ведения взрывных работ на карьерах определяется классификационным критерием уровня сейсмического воздействия взрыва на основе показателя затухания СВВ в диапазоне 1,56-2,04 и коэффициента сейсмичности в диапазоне от 100 до 800.

3. Впервые определена классификация взрывов как сейсмических источников по уровню опасности воздействия на охраняемые объекты. Установлены логарифмически нормальный закон распределения коэффициента сейсмичности и нормальный закон распределения показателя затухания СВВ.

4. Разработаны и обоснованы классификационные критерии опасности взрывов как сейсмических источников, характеризуемых колебательной скоростью, измеренной в см/с, по соотношению между показателем затухания - n в диапазоне 0,7-3,8 и коэффициентом сейсмичности K в интервале от 6 до $3 \cdot 10^3$: сейсмические источники повышенного воздействия - $n < 0,23 \ln K + 0,33$, нормального воздействия - $0,23 \ln K + 0,63 \geq n \geq 0,23 \ln K + 0,33$ и пониженного воздействия - $n > 0,23 \ln K + 0,63$.

5. Установлены уровни сейсмического воздействия на наземные сооружения в зависимости от относительного вклада поверхностных и объемных СВВ в модуль вектора скорости смещения грунта. При ведении взрывных работ уровень сейсмического воздействия на наземные сооружения определяется относительным вкладом поверхностных и объемных сейсмических волн в модуль вектора скорости смещения грунта, а предельное значение уровня сейсмического воздействия соответствует равенству пиковых значений скоростей смещения от дополнительного источника колебаний системы «грунт – охраняемый объект» и взрывного источника волн.

6. Разработан способ аппроксимации волновых форм велосиграмм с использованием эллиптических фильтров низкой частоты 2-го порядка для прогноза уровня сейсмического воздействия на наземные сооружения в зависимости от интервалов времени короткозамедленного взрывания, а также для оперативного обнаружения опасных колебаний в системе «грунт – охраняемый объект» при ведении взрывных работ в подземных условиях.

7. Разработан способ определения колебательных мод наземных охраняемых объектов при импульсном воздействии УВВ.

8. Установлены закономерности скорости колебаний наземных объектов относительно интервала короткозамедленного взрывания и разработан способ обнаружения опасного совместного воздействия СВВ и УВВ на объект, приводящего к усилению колебаний при переходе от нижней части объекта к его крыше до 15 раз, и снижением уровня колебаний при увеличении интервала времени короткозамедленного взрывания взрывчатого вещества от 20 до 45 мс.

9. Разработанные положения по прогнозу динамического воздействия взрывных работ на промышленные здания и сооружения использованы при отработке месторождений Нюрбинского ГОКа АК «АЛРОСА» (ПАО), ОАО «Ново-Широкинский рудник», АО «Каменногорское карьероуправление», АО «Каменногорский комбинат нерудных материалов» (ККНМ), на Шерегешской шахте АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

10. Результаты диссертационной работы рекомендуются к использованию: для практического применения на предприятиях, добывающих твердые полезные ископаемые открытым и подземными способами с использованием взрывных работ; в организациях, осуществляющих мониторинг сейсмозрывного и воздушного ударного воздействий; в проектных организациях горной промышленности для разработки дополнительных мероприятий по обеспечению безопасного ведения взрывных работ в условиях, аналогичных рассмотренным в диссертации; в учреждениях высшего образования при подготовке инженеров по специальности «Горное дело» и на курсах повышения квалификации и профессиональной переподготовки.

11. Перспективы дальнейшей разработки темы диссертационной работы целесообразны в следующих направлениях: развитие классификации взрывов как сейсмических источников по уровню опасности воздействия на охраняемые объекты по мере получения новых данных сейсмического мониторинга взрывных работ; создание теории резонансных явлений в системе «грунт – охраняемый объект» после окончания воздействия взрывного источника на основе методов квантово-механического формализма для прогнозирования риска разрушения

охраняемого объекта и районирования территории, примыкающей к зоне ведения взрывных работ, по уровню динамического воздействия на здания и сооружения.

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

Воздействие сейсмозрывные волн – процесс распространения колебаний в горных породах, возбуждаемый взрывом заглубленных зарядов взрывчатых веществ, в результате которого происходит воздействие колеблющегося грунта на фундамент охраняемого объекта, характеристикой этого воздействия является пиковое значение вибрационной (колебательной) скорости или максимальная векторная скорость смещения грунта.

Воздействие ударных воздушных волн – процесс распространения слоя сжатого воздуха, возникающего при взрыве на земной поверхности наружных, заглубленных зарядов взрывчатых веществ, в результате, которого происходит воздействие этого слоя на наземную часть охраняемых объектов, характеристикой этого воздействия является избыточное давление на фронте УВВ.

Динамическое воздействие взрывных работ на охраняемый объект – быстропротекающий процесс передачи энергии, переносимой СВВ и (или) УВВ, конструктивным элементам охраняемых объектов, в результате которого они вовлекается в колебательный процесс.

Здание – «...объемная строительная система, имеющая надземную и (или) подземную части, включающая в себя помещения, сети инженерно-технического обеспечения и системы инженерно-технического обеспечения и предназначенная для проживания и (или) деятельности людей, размещения производства, хранения продукции...» (в редакции №384 - ФЗ [129]);

Колебательная скорость – скорость колебательного движения конструктивных элементов охраняемого объекта при динамическом воздействии на него взрывных работ.

Массовые взрывы в подземных условиях – «взрывы, при осуществлении которых требуется большее время для проветривания и возобновления работ в руднике (шахте, участке), чем это предусмотрено в расчете при повседневной организации работ» (п. 306 Правила безопасности [127]).

Массовый взрыв на земной поверхности – «взрывные работы с применением взрывов смонтированных в общую взрывную сеть двух и более скважинных зарядов» (п. 406 Правила безопасности [127]).

Одновременно взрываемые заряды взрывчатых веществ – заряды взрывчатого вещества, взрываемые мгновенно или со временем замедления между взрывами каждого заряда менее 20 мс при условии, что «расстояния от охраняемого объекта до ближайшего заряда и до наиболее удаленного заряда различаются не более чем на 20%» (п. 793 – п. 794 Правила безопасности [127]).

Опасность аварии – «возможность причинения ущерба человеку, имуществу и (или) окружающей среде вследствие разрушения сооружений ... на опасном производственном объекте. Опасность аварии на опасном производственном объекте обусловлена ... ошибками проектирования, строительства и эксплуатации, отказами технических устройств и их систем, а также нерасчетными (запроектными) внешними природными, техногенными и антропогенными воздействиями на опасном производственном объекте.» [110].

Опасный производственный объект II класса опасности (в горнодобывающей промышленности) – объекты ведения горных работ открытым способом с применением взрывных работ и объемом разработки горной массы 1 миллион кубических метров в год и более; объекты ведения подземных горных работ, не опасные по взрывам газа и (или) пыли, внезапным выбросам породы, газа и (или) пыли, горным ударам и прорывам воды в подземные горные выработки (в редакции №116-ФЗ [128]).

Основание здания или сооружения – «массив грунта, воспринимающий нагрузки и воздействия от здания или сооружения и передающий на здание или сооружение воздействия от природных и техногенных процессов, происходящих в массиве грунта» (в редакции №384 - ФЗ [129]).

Охраняемый объект – здания, сооружения, для которых при ведении взрывных работ предполагается отсутствие повреждений или вероятность легких повреждений составляет около 0,1, здания, сооружения уникального характера, а

также здания с людьми, находящиеся в зоне динамического воздействия взрывных работ, по фактору комфортного пребывания в них.

Раскачка наземного охраняемого объекта – увеличение амплитуды колебательной скорости верхней части охраняемого объекта относительно его основания при динамическом воздействии взрывных работ.

Скорость смещения грунта – скорость колебательного движения частиц грунта при прохождении в его объеме или на его поверхности СВВ.

Сооружение – «... объемная, плоскостная или линейная строительная система, имеющая наземную, надземную и (или) подземную части, состоящая из несущих, а в отдельных случаях и ограждающих строительных конструкций и предназначенная для выполнения производственных процессов различного вида, хранения продукции, временного пребывания людей, перемещения людей и грузов ...» (в редакции №384-ФЗ [129]);

Технологический взрыв – массовый взрыв в подземных условиях «по отбойке основного массива, его отрезке, подсечке (подрезке), а также по обрушению потолочин и целиков в пределах подэтажа» (п. 306а Правила безопасности [127]).

Угроза аварии – «актуализированная опасность аварии, характеризующая непосредственно предаварийное состояние опасного производственного объекта. Угроза аварии наступает при необоснованных отступлениях от требований промышленной безопасности, а также в случаях приближения внешних техногенных, антропогенных и природных воздействий к предельным проектным нагрузкам». [110].

Экспериментальный взрыв - массовый взрыв в подземных условиях «для определения параметров буровзрывных работ при массовых взрывах» (п. 306в Правила безопасности [127]).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин, А.В. Геодинамический мониторинг при разработке угольного месторождения Воркуты / А.В. Адушкин, Л.И. Беляева, А.И. Гончаров, В.И. Куликов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – №10. – С.233-243.
2. Адушкин, А.В. Сейсмическое и акустическое действия буровзрывных работ при строительстве метро/ А.В. Адушкин, А.И. Гончаров, В.И. Куликов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – №12. – С.256-266.
3. Адушкин, В.В. Влияние трассы на затухание сейсмического сигнала от короткозамедленных карьерных взрывов / В.В. Адушкин, А.А. Спивак // Динамические процессы в геосферах. – 2013. – №4. – С.118-126.
4. Адушкин, В.В. Геомеханика крупномасштабных взрывов / В.В. Адушкин, А.А. Спивак. – М.: Недра, 1993. – 319 с.
5. Адушкин, В.В. Геоэкологические последствия проведения горных работ на карьерах с применением взрывных технологий / В.В. Адушкин, С.П. Соловьев, А.А. Спивак, В.М. Хазинс // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2020. - №2. – С.164-178.
6. Адушкин, В.В. Подземные взрывы / В.В. Адушкин, А.А. Спивак. – М.: Наука, 2007. – 579с.
7. Адушкин, В.В. Сейсмичность взрывных работ на территории европейской части России / В. В. Адушкин // Физика Земли. – 2013. – №2. – С.110–130.
8. Азаркович, А.Е. Взрывные работы вблизи охраняемых объектов / А.Е. Азаркович, М.И. Шуйфер, А.П. Тихомиров. – М.: Недра, 1984. – 213с.
9. Аленичев, И.А. К вопросу районирования карьерного поля по коэффициенту сейсмичности / И.А. Аленичев // Проблемы недропользования. – 2018. – №2. – С.6-11.
10. Артемов, В.А. Исследование и разработка эффективной технологии взрывной отбойки доломитов в карьерах на выработанное пространство, заполненное водой: автореф. дис. ...к-та техн. наук: 05.15.03. / Артемов Вадим Александрович. – Л., 1981. – 22с.
11. Артемов, В.А. Исследование сейсмотехнических условий производства массовых взрывов на руднике ОАО «Ново-Широкинский рудник» / В.А. Артемов, Ю.И. Виноградов, **А.Н. Холодилов**, С.В. Густов, Н.Я. Щербаков // Взрывное дело. – 2011. – №105/62.– С.239-252.
12. Артемов, В.А. Методические основы оценки сейсмического действия массовых взрывов по результатам анализа сейсмозврывных продольных и поверхностных волн / В.А. Артемов, Г.П. Парамонов, **А.Н. Холодилов** // Взрывное дело. – 2012. – №108/65. – С.287-296.
13. Артемов, В.А. Оценка влияния взрывных работ на людей, находящихся в наземных сооружениях / В.А. Артемов, Ю.И. Виноградов, Г.П. Парамонов, **А.Н. Холодилов** // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – №S5. – С.410-414.

14. Артемов, В.А. Проблемы обеспечения сейсмической безопасности надшахтных сооружений при проведении подземных массовых взрывов / В.А. Артемов, Ю.И. Виноградов, **А.Н. Холодилов** // Проблемы и тенденции рационального и безопасного освоения георесурсов: сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 50-летию Горного института КНЦ РАН (Апатиты, 12-15 октября 2010 г.). – Апатиты, СПб, 2011. – С.165-168.
15. Барон, В.Л. Техника и технология взрывных работ в США / В.Л. Барон, В.Х. Кантор. – М.: Недра, 1989. – 376 с.
16. Беляев, А.Г. Опыт работы ООО «Азот-Черниговец»: применение систем электронного взрывания «DAVEYTRONIC» на горнодобывающих предприятиях / А.Г. Беляев, М.Ф. Набиулин // Уголь. – 2013. – №10. – С.4-6.
17. Бибик, И.П. Сравнительный анализ применения неэлектрических и электрических систем инициирования взрывов скважинных зарядов на карьерах / И.П. Бибик, В.П. Ершов // Горный вестник Узбекистана. – 2006. – № 2 (25). – С.36-38.
18. Бирбраер, А.Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость / А.Н. Бирбраер. – СПб.: Наука. – 1998. – 255 с.
19. Богацкий, В.Ф. Прогноз и ограничение сейсмической опасности промышленных взрывов / В.Ф. Богацкий // Взрывное дело. – 1983. – №85/42. – С.201-213.
20. Богацкий, В.Ф. Сейсмическая безопасность при взрывных работах / В.Ф. Богацкий, В.Х. Пергамент. – М.: Недра, 1978. – 128с.
21. Борисов, Е.К. Безопасность зданий, расположенных в зоне сейсмического действия промышленных взрывов: автореферат дис. ... д-ра техн. наук: 05.26.02 / Борисов Евгений Константинович. – Владивосток, 2002. – 35с.
22. Бригадин, И.В. О закономерности изменения показателя степени затухания амплитуды массовой скорости при подземных взрывах в прочных скальных породах / И.В. Бригадин, Р.А. Возгрин, А.А. Кудрявцев, С.Ю. Николашин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 4. – С.77–83.
23. Булашев, С.В. Статистика для трейдеров. – М.: Компания Спутник+, 2003. – 245с.
24. Василец, В.Н. Обеспечение условий безопасной эксплуатации горнотранспортного комплекса при воздействии сейсмозрывных волн / В.Н. Василец, П.И. Афанасьев, А.А. Павлович // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 1. – С.26–35.
25. Вековшинин, В.В. Оценка параметров затухания сейсмических волн по данным технологических взрывов на горнодобывающих предприятиях / В.В. Вековшинин // Двенадцатая уральская молодежная научная школа по геофизике: сборник научных материалов. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2011. – С.45-48.

26. Верхованцев, А.В. Мониторинг сейсмического воздействия взрывов на карьере “Шахтау” / А.В. Верхованцев, Р.А. Дягилев, Д.Ю. Шулаков, А.В. Шкурко // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2019. – №2. – С.59-69.
27. Верхованцев, А.В. Оценка сейсмического влияния буровзрывных работ на здания и сооружения / А.В. Верхованцев, Д.Ю. Шулаков // Геофизика. – 2014. – №4. – С.40-45.
28. Викторов, С.Д. Снижение сейсмического воздействия массовых взрывов в карьере на устойчивость породного массива и подземных сооружений при комбинированной разработке угольных месторождений / С.Д. Викторов, В.Н. Захаров, В.М. Закалинский // Горный журнал. – 2016. – №12. – С.40-44.
29. ВСН 490-87. Проектирование и устройство свайных фундаментов и шпунтовых ограждений в условиях реконструкции промышленных предприятий и городской застройки. – М.: Минмонтажспецстрой СССР, 1988. – 29с.
30. Вознесенский, Е.А. Природа и закономерности затухания волн напряжений в грунтах [Электронный ресурс]: монография / Е.А. Вознесенский, Е.С. Кушнарева, В.В. Фуникова. – 2-е изд., стер. М.: ФЛИНТА, 2013. -104 с.
31. Ганопольский, М.И. Обеспечение промышленной безопасности ведения взрывных работ по действию ударных воздушных волн на земной поверхности: автореф. дис. ...д-ра техн. наук: 05.26.03. / Ганопольский Михаил Исаакович. – Москва, 2011. – 41с.
32. Ганопольский, М.И. Оценка величины допустимой скорости колебаний по воздействию на людей вибрации, вызванной взрывными работами / М.И. Ганопольский, В.А. Белин, В.И. Куликов // Взрывное дело. – 2015. – № 114/71. – С.273-294.
33. Ганопольский, М.И. Прогнозирование размеров зоны воздействия взрывного шума при взрывах на открытых горных работах / М.И. Ганопольский, В.И. Куликов // Взрывное дело. – 2017. – № 118-75. – С.260-182.
34. Ганопольский, М.И. Результаты экспериментальных исследований ударных воздушных волн при взрывах на земной поверхности / М.И. Ганопольский // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № S2-3 – С. 5-37.
35. Гоноровский, И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Радио и связь, 1986. – 512с.
36. Гончаров, А.И. Акустические волны при карьерных массовых взрывах / А.И. Гончаров, В.И. Куликов, А.И. Перепилицын // Физические проблемы разрушения горных пород: сборник трудов международной научной конференции (Абаза (Хакасия) 9-14 сентября 2002г.). – Новосибирск, 2003. – С.110-115.
37. Гончаров, А.И. Акустические волны при массовых взрывах в карьерах / А.И. Гончаров, В.И. Куликов // Физика горения и взрыва. – 2004. – Т.40. – №6. – С. 101-106.

38. Гончаров, А.И. О сейсмическом действии массовых взрывов на карьерах КМА / А.И. Гончаров, В.И. Куликов, Н.М. Мартинсон // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2002. – №1. – С.162-164.

39. Гончаров, А.И. Сейсмическое действие взрывов в рудниках и карьерах / А.И. Гончаров, В.И. Куликов, А.А. Еременко // Записки Горного института. – 2007. – Т.171. – С.175-180.

40. Господариков, А.П. Математическое моделирование воздействия сейсмозрывных волн на горный массив, включающий выработку / А.П. Господариков, Я.Н. Выходцев, М.А. Зацепин // Записки Горного института. – 2017. – Т. 226. – С. 405-411.

41. ГОСТ Р 52892-2007. Вибрация и удар. Вибрация зданий. Измерение вибрации и оценка ее воздействия на конструкцию. – М.: Стандартинформ, 2008 г. – 16с.

42. ГОСТ 31937-2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. М.: – Стандартинформ, 2014 г. – 60с.

43. Гриб, Г.В. Зависимость сейсмического действия взрыва в массиве горных пород от технологических условий ведения буровзрывных работ / Г.В. Гриб, А.Ю. Пазынич, Н.Н. Гриб, Е.Е. Петров // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т.14. – №1(8). – С.2112-2117.

44. Гриб, Н.Н. Изменение состояния массива горных пород от импульсных нагрузок промышленных взрывов / Н.Н. Гриб, Г.В. Гриб, В.С. Имаев, М.В. Терещенко // Горный журнал. – 2016. – №10. – С.31-33.

45. Гриб, Г.В. Оценка влияния природных факторов на сейсмический эффект от массовых взрывов / Г.В. Гриб, А.Ю. Пазынич, Н.Н. Гриб // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т.14. – №3(2). – С.626-630.

46. Гриб, Н.Н. Прогноз сейсмического воздействия взрывов на производственную инфраструктуру / Н.Н. Гриб, М.В. Терещенко, Г.В. Гриб // Горные науки и технологии. – 2017. – № 1. – С.12-22.

47. Гриб, Н.Н. Сейсмическое воздействие массовых взрывов на природно-технические объекты / Н.Н. Гриб, Г.В. Гриб, А.А. Сясько, А.В. Качаев // Безопасность в техносфере. – 2015. – №2. – С.33-39.

48. Динамический расчет зданий и сооружений: Справочник проектировщика / М.Ф. Барштейн, В.А. Ильичев, Б.Г. Коренев и др.; Под ред. Б.Г. Коренева, И.М. Рабиновича. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1984. – 303 с.

49. Дядечкин, Н.И. Обеспечение сейсмобезопасности при ведении взрывных работ в карьерах Криворожского бассейна / Н.И. Дядечкин, Г.В. Шиповский, П.В. Седнев, Е.Я. Бехлер // Горный журнал. – 2017. – №3. – С.90-91.

50. Еременко, А.А. Геодинамические и сейсмические явления при обрушении блоков на удароопасных месторождениях Горной Шории / А.А. Еременко, И.В. Машуков, В.А. Еременко // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. - №1. – С.70-76.

51. Заренков, В.А. Современные методы технической диагностики строительных конструкций, зданий и сооружений / В.А. Заренков, И.Д. Захаров, С.Н. Савин, А.Ф. Шнитковский. – СПб: «РДК-принт», 2000. – 128с.

52. Ипатов, Ю.П. Анализ воздействия промышленных взрывов на устойчивость ответственных сооружений и объектов в зонах повышенной сейсмической и геодинамической активности / Ю.П. Ипатов // Моделирование стратегии и процессов освоения георесурсов. Сборник докладов. – Пермь: Горный институт УрО РАН, 2003. – С.25-27.

53. Ипатов, Ю.П. Практические аспекты исследования сейсмического эффекта промышленных взрывов / Ю.П. Ипатов // Проблемы комплексного мониторинга на месторождениях полезных ископаемых: сборник докладов. – Пермь: Горный институт УрОРАН, 2002. – С.210-214.

54. Кадомцев, М.И. Исследование характеристик колебаний, возбуждаемых в просадочных грунтах при уплотнении их глубинными взрывами / М.И. Кадомцев, Д.М. Стешенко // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. – 2011. – Вып. 24 (43). – С.62-71.

55. Кайно, Г. Акустические волны: Устройства, визуализация и аналоговая обработка сигналов. – М.: Мир, 1990 – 656 с.

56. Картузов, М.И. Методика обеспечения сейсмобезопасной технологии ведения взрывных работ / М.И. Картузов, Н.В. Паздников, А.Б. Фадеев, Л.В. Сафонов, Г.В. Кузнецов. – Свердловск: ИГД МЧМ СССР, 1984. – 12 с.

57. Кендзера, А.В. Влияние резонансных и нелинейных свойств грунтов на сейсмическую опасность строительных площадок / А.В. Кендзера, Ю.В. Семенова // Геофизический журнал. – 2016. – Т. 38. – № 2. – С. 3-18.

58. Козырев, С.А. Обеспечение сейсмической безопасности зданий и сооружений промплощадки при производстве массовых взрывов / С.А. Козырев, В.А. Фокин // Горный журнал. – 2014. – №5. – С.48-55.

59. Козырев, С.А. Особенности и методы снижения сейсмического воздействия взрыва отрезной щели на законтурный массив карьера / С.А. Козырев, И.А. Аленичев, А.В. Соколов, Е.А. Усачев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 10 (специальный выпуск 23). – С. 307–315.

60. Козырев, С.А. Проявление техногенной сейсмичности при производстве массовых взрывов на подземных рудниках ОАО "Апатит" / С.А. Козырев, Е.А. Усачев // Вестник МГТУ. – 2014. – Т. 17. – № 2. – С. 238-245.

61. Козырев, С.А. Реакция массива горных пород на мощные динамические воздействия / С.А. Козырев, Е.А. Усачев // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2011. – №3. – С.22-30.
62. Козырев, С.А. Сейсмическое действие подземных массовых взрывов на поверхностные сооружения / С.А. Козырев // Вестник МГТУ. – 1998. – Т. 1. – № 3. – С. 123-126.
63. Коршунов, Г.И. Сравнительный анализ методик по сейсмической безопасности охраняемых объектов (опоры ЛЭП) / Г.И. Коршунов, И.А. Бульбашева, П.И. Афанасьев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 4(5-2). – С.80–88.
64. Курленя, М.В. Влияние взрывных работ на сейсмические и динамические явления при подземной разработке рудных удароопасных месторождений Сибири / М.В. Курленя, А.А. Еременко, В.И. Башков // Горный журнал. – 2015. – №8. – С.69-71.
65. Ковалевский, В.Н. Сравнительный анализ взрывных работ, проводимых на карьерах строительных материалов в Финляндии и России / В.Н. Ковалевский, **А.Н. Холодилов** // Записки Горного института. – 2007. – Т.171. – С.192-194.
66. Колесников, Ю.И. Прямое определение резонансных свойств верхней части разреза по микросейсам: натурный эксперимент / Ю.И. Колесников, К.В. Федин // Технологии сейсморазведки. – 2017. – № 3. – С.5–21.
67. Комир, В.М. Повышение сейсмической безопасности массовых взрывов в карьерах / В.М. Комир, А.М. Ромашко, В.А. Сокуренок, С.В. Назаренко // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. – 2008. – №5(52). – Ч.2. – С.140-143.
68. Корнилков, М.В. Факторы, влияющие на интенсивность ударной воздушной волны при изменяющихся метеорологических условиях / М.В. Корнилков, В.Г. Шеменев, П.В. Меньшиков, В.А. Синицын // Известия вузов. Горный журнал. – 2013. – № 7. – С.65-70.
69. Котляревский, В.А. Диагностика скрытых дефектов сейсмостойких сооружений по изменению частотного спектра / В.А. Котляревский // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2014. – №4. – С.36-42.
70. Кузнецов, Г.В. Параметры воздушных волн при взрыве в карьере / Г.В. Кузнецов, В.П. Улыбин // Известия вузов. Горный журнал. – 1973. – №5. – С. 46-48.
71. Кузьменко, А.А. Сейсмическое действие взрыва в горных породах / А.А. Кузьменко, В.Д. Воробьев, И.И. Денисюк, А.А. Дауетас. – М.: Недра, 1990. – 173с.
72. Куликов, В.И. Воздействие массовых взрывов при подземной разработке железорудных месторождений на застройку и население города Губкин / В.И. Куликов, М.И. Ганопольский // Взрывное дело. – 2018. – № 121-78. – С.135-153.
73. Куликов, В.И. Сейсмическое действие БВР с электронной системой инициирования / В.И. Куликов, А.Ю. Дмитриев, Ф.И. Галушко // Метро и тоннели. – 2015. – №3. – С.22-26.
74. Куликов, В.И. Сейсмическое действие Камбаратинского взрыва / В.И. Куликов, М.Б. Эткин, М.П. Камчыбеков // Динамические процессы в геосферах. – 2013. – №4. – С.126-138.

75. Кутузов, Б.Н. Безопасность сейсмического и воздушного воздействия массовых взрывов: Учебное пособие для вузов / Б.Н. Кутузов, В.К. Совмен, Б.В. Эквист, В.Г. Вартанов - М.: Изд-во «Московского государственного горного университета», 2004. – 180с.

76. Лысак Ю.А. Повышение сейсмической безопасности при взрывных работах / Ю.А. Лысак, А.Ю. Плотников, Е.Б. Шевкун, А.В. Лещинский // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 4. – С.283–292.

77. Ляшенко, В.И. Обоснование параметров массовых взрывов в подземных рудниках по условиям сейсмобезопасности для жилой застройки / В.И. Ляшенко, А.Х. Дудченко // Горный журнал. – 2012. – №8. – С.40-44.

78. Ляшенко, В.И. Обоснование сейсмобезопасных параметров при подземной разработке приповерхностных запасов месторождения под городской застройкой / В.И. Ляшенко, П.А. Кислый // Известия вузов. Горный журнал. – 2015. – №2. – С.84-93.

79. Макарьев, В.П. Измерение сейсмозрывных волн в массиве при взрыве заряда ВВ постоянной энергии и переменного диаметра / В.П. Макарьев, М.А. Нефедов, Ю.И. Виноградов, Е.А. Деев // Взрывное дело. – 1983 – № 85/42. – С.124-127.

80. Махмудов, Х.Ф. Диагностика потери устойчивости нагруженных конструкций и развитие очагов разрушения при воздействии сейсмозрывных и ударных воздушных волн / Х.Ф. Махмудов, М.Г. Менжулин, М.В. Захарян, У. Султонов, З.М. Абдурахманов // Журнал технической физики. – 2015. – Т.85. – С.79-85.

81. Машуков, И.В. Расчет сейсмобезопасных расстояний при массовых взрывах с учетом схем взрывания скважинных зарядов с применением неэлектрической системы инициирования / И.В. Машуков, В.В. Чаплыгин // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2015. – №2(12). – С.4-8.

82. МГСН 2.04-97. Допустимые уровни шума, вибрации и требования к звукоизоляции в жилых и общественных зданиях. – М.: ГУП «НИИЦ», 1997. – 38с.

83. Медведев, В.С. Нейронные сети. MATLAB 6 / В.С. Медведев, В.Г. Потемкин. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. – 496с.

84. Медведев, С.В. Сеймика горных взрывов / С.В. Медведев. – М.: Недра, 1964. – 188с.

85. Менжулин, М.Г. Развитие очагов разрушения в зданиях и сооружениях при воздействии сейсмозрывных ударных воздушных волн / М.Г. Менжулин, А.А. Ивановский // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № S8. – С.229–238.

86. Меньшиков, П.В. Исследование сейсмического воздействия на здания и сооружения города Сатки при ведении взрывных работ на Карагайском карьере в стесненных условиях / П.В. Меньшиков, С.С. Таранжин, А.С. Флягин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 3-1. – С.383–398.

87. Миронов, П.С. Взрывы и сейсмобезопасность сооружений / П.С. Миронов. – М.: Недра, 1973. – 167с.

88. Мосинец, В.Н. Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах / В.Н. Мосинец. – М.: Недра, 1976. – 271с.
89. Мусатова, И.Н. Методика обработки результатов сейсмометров при производстве массовых взрывов в карьерных условиях / И.Н. Мусатова, В.А. Фокин // Известия вузов. Горный журнал. – 2014. – №5. – С.70-74.
90. Мучник, С.В. О снижении сейсмического эффекта при массовых взрывах на карьерах / С.В. Мучник // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011. – №4. – С.68-75.
91. Никитин, Р.Я. Сейсмометрические исследования воздействия массовых взрывов на охраняемые объекты рудника «Интернациональный» / Р.Я. Никитин, А.В. Васильев, В.И. Хон, Е.Н. Черных // Горный журнал. – 2012. – №2. – С.14-16.
92. Никифоровский, В.С. Динамическое разрушение твердых тел / В.С. Никифоровский, Е.И. Шемякин. – Новосибирск: Наука, 1979. – 272с.
93. Новиньков А.Г. Оценка сейсмобезопасности массовых промышленных взрывов / А.Г. Новиньков, С.И. Протасов, А.С. Гукин // Безопасность труда в промышленности. – 2013. – №6. – С.40-46.
94. Новиньков, А.Г. Сейсмическая безопасность подземного газопровода при массовых промышленных взрывах на угольном карьере / А.Г. Новиньков, С.И. Протасов, П.А. Самусев, А.С. Гукин // Вестник КузГТУ. – 2013. – № 6. – С.51-55.
95. Новиньков, А.Г. Статистическая надежность прогнозирования пиковой скорости колебаний при массовых промышленных взрывах / А.Г. Новиньков, С.И. Протасов, П.А. Самусев, А.С. Гукин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2015. – №5. – С.50-57.
96. Новиньков, А.Г. Статистическое обоснование критерия повреждаемости зданий при сейсмических воздействиях от массовых промышленных взрывов / А.Г. Новиньков, С.И. Протасов, А.С. Гукин // Вестник КузГТУ. – 2012. – №5. – С.115-120.
97. Опарин, В.Н. О влиянии массового взрыва в карьере строительного камня на формирование спектра сейсмических волн / В.Н. Опарин, В.Ф. Юшкин, Н.Н. Пороховский, А.Н. Гришин, Н.А. Кулинич, Д.Е. Рублев, А.В. Юшкин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – №5. – С.74-89.
98. Оппенгейм, А. Цифровая обработка сигналов / А. Оппенгейм, Р. Шафер. – М.: Техносфера, 2006. – 856с.
99. Осовский, С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344с.
100. Очиров, В.С. Научное обоснование совершенствования технологии взрывных работ для снижения пылегазоакустического воздействия на карьерах и рудниках Забайкалья: автореф. дис. ...д-ра техн. наук: 25.00.22. / Очиров Вячеслав Санжиевич. – Чита, 2002. – 48с.

101. Парамонов, Г.П. К оценке влияния взрывных работ на здания и сооружения, расположенные вблизи промышленной зоны карьера / Г.П. Парамонов, В.А. Артемов, **А.Н. Холодилов** // Физические проблемы разрушения горных пород: труды IV-й Международной научной конференции (Москва, 18-22 октября 2004 г.). – М.: ИПКОН РАН, 2005.– С. 399-402.

102. Парамонов, Г.П. Новый метод оценки предельных значений раскачки зданий при воздействии на них сейсмических и воздушных ударных волн / Г.П. Парамонов, В.А. Артемов, **А.Н. Холодилов**, Е.Ю. Виноградова, // Записки Горного института. – 2005. – Т. 166. – С. 156-159.

103. Парамонов, Г.П. Разработка технологий и мер снижения воздействия сейсмических и ударных воздушных волн на окружающую среду, здания и сооружения при производстве взрывных работ на горных предприятиях / Г.П. Парамонов, В.А. Артемов, Ю.И. Виноградов, **А.Н. Холодилов** // Записки Горного института. – 2004. – Т. 158. – С.160-162.

104. Пергамент, В.Х. Автоматизированный расчет безопасных условий сеймики взрывов (АРБУС-В): учебное пособие / В.Х. Пергамент, А.Б. Атлас, И.Т. Мельников, В.С. Сураев. – МГМИ. Магнитогорск, 1993. – 64с.

105. Пергамент, В.Х. Интенсивность по сейсмической шкале, скорость колебаний и эквивалентные приведенные расстояния при взрывах / В.Х. Пергамент, Ю.Е. Овчаров, Е.В. Гончаров // Записки горного института. – 2001. – Т.148(2). – С.84-90.

106. Потапов, В.П. Оценка шумового воздействия массовых взрывов при ведении горных работ / В.П. Потапов, Е.Л. Счастливцев, И.Е. Харлампенков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 10 (S23) – С. 574-579.

107. Потресов, Д.К. Оптимизация временных задержек во взрывной сети на основе фреймовой организации знаний / Д.К. Потресов, Б.В. Эквист, Р.А. Колосов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – S11. – С.167-176.

108. Репина, Е.М. Техногенная сейсмичность при горнодобывающей деятельности, ее влияние на инженерные сооружения и здоровье человека / Е.М. Репина, И.И. Косинова // Вестник ВГУ, серия: География. Геоэкология. – 2010. – № 1. – С. 71-76.

109. Розбах, А.В. Физика горных пород (физико-механические свойства): учебное пособие / А.В. Розбах, А.Н. Холодилов, Г.И. Коршунов // – СПб: МАНЭБ, 2009. – 272 с.

110. Руководство по безопасности «Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах». Серия 27. Выпуск 16. – М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2016. – 56 с.

111. Ружич, В.В. Влияние виброимпульсных воздействий на активность смещений в трещинах горного массива / В.В. Ружич, С.Г. Псахье, Е.Н. Черных, О.В. Федеряев, А.В. Димаки, Д.С. Тирских // Физическая мезомеханика. – 2007. – Т.10. – №1. – С.19-24.

112. Садовский, М.А. Избранные труды: Геофизика и физика взрыва / М.А. Садовский. – М.: Наука. – 2004. – 440 с.

113. Санитарные нормы. СН 2.2.4/2.1.8.566-96. Производственная вибрация в помещениях жилых и общественных зданий. – Москва, 1997. – 16с.

114. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017660214 Российская Федерация. Расчет критической массы заряда для охраняемых объектов: № 2017617172; заявл. 21.07.2017; опублик. 19.09.2017. / Ишейский В.А., Звонарев И.Е., **Холодилов А.Н.**; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет». – 1 с.

115. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023614973 Российская Федерация. Программа для моделирования сейсмического воздействия вблизи оснований наземных охраняемых объектов с учетом структурных особенностей массива при подземных взрывах: № 2023613697; заявл. 02.03.2023; опублик. 09.03.2023. / **Холодилов А.Н.** Ковалевский В.Н., Рядинский Д.Э.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет». – 1 с.

116. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023616009 Российская Федерация. Программа для моделирования колебательного спектра зданий при воздействии на них воздушной ударной волны: № 2023613987; заявл. 03.03.2023; опублик. 21.03.2023. / **Холодилов А.Н.**, Ковалевский В.Н., Рядинский Д.Э.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет». – 1 с.

117. Сейсморазведка: Справочник геофизика. В двух книгах / Под ред. В.П. Номоконова. Книга первая. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1990. – 336с.

118. Смирнов, Н.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений / Н.В. Смирнов, И.В. Дунин-Барковский. – М.: Наука, 1965. – 512с.

119. Совмен, В.К. Сейсмическая безопасность при взрывных работах: Учебное пособие / В.К. Совмен, Б.Н. Кутузов, А.Л. Марьясов, Б.В. Эквист, А.В. Токаренко – М.: Изд-во «Горная книга», 2012. – 228с.

120. Справочник взрывника / Б.Н. Кутузов, В.М. Скоробогатов, И.Е. Ерофеев и др. – М.: Недра, 1988. – 511с.

121. Технические правила ведения взрывных работ в энергетическом строительстве. – М.: ООО «Гидроспецпроект» АФ «Гидроспецстрой», 1997. – 220 с.

122. Тюпин, В.Н. Длительность воздействия сейсмозрывных волн на охраняемые объекты при массовых взрывах на карьерах / В.Н. Тюпин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – №4. – С.124-133.

123. Тюпин, В.Н. Обоснование предельного интервала замедления для снижения сейсмического действия массовых взрывов на карьерах / В.Н. Тюпин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – №12. – С.67-76.

124. Тюпин, В.Н. Прогнозирование скорости колебаний грунтов при массовых взрывах в подземных условиях / В.Н. Тюпин // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – №6. – С.41-45.
125. Уайт, Дж. Э. Возбуждение и распространение сейсмических волн / Дж. Э. Уайт – М.: Недра, 1986. – 261с.
126. Уаров, В.Ф. Сейсмическая разведка. – М.: «Вузовская книга», 2007. – 195с.
127. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения». Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 3 декабря 2020 года № 494: вступ. в силу с 01.01.2021 г.
128. Российская Федерация. Законы. Федеральный закон от 21.07.1997 №116-ФЗ (ред. от 01.07.2021 г.) «О промышленной безопасности опасных производственных объектов». – 30с.
129. Российская Федерация. Законы. Федеральный закон от 30.12.2009 №384-ФЗ (ред. от 02.07.2013 г) «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений». – 28 с.
130. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. – Изд. 3-е, испр. – В 2 т. Т.1. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 832с.
131. Фокин, В.А. К вопросу обоснования интервалов замедления при производстве массовых взрывов на карьерах / В.А. Фокин, М.Б. Тогунов, С.В. Семкин, Ю.А. Шитов // Горный журнал. – 2012. – № 2. – С. 44–48.
132. Фокин, В.А. К вопросу оценки предельно допустимой скорости смещения при взрывных работах вблизи охраняемых зданий и сооружений / В.А. Фокин // Безопасность Труда в Промышленности. – 2015. – №12. – С.62-65.
133. Фокин, В.А. К вопросу повышения безопасности производства массовых взрывов в глубоких карьерах / В.А. Фокин, М.Б. Тогунов, С.В. Семкин, Ю.А. Шитов // Безопасность Труда в Промышленности. – 2013. – №1. – С.20-22.
134. Фокин, В.А. Методика анализа скорости смещения породного массива при производстве массовых взрывов в карьерных условиях / В.А. Фокин // Известия вузов. Горный журнал. – 2010. – №5. – С.70-74.
135. Фокин, В.А. О взаимосвязи энергетических параметров сейсмического действия массовых взрывов в карьерных условиях / В.А. Фокин // Известия вузов. Горный журнал. – 2011. – №1. – С.84-91.
136. Фокин, В.А. Оценка защитной эффективности отрезных щелей по результатам сейсмоизмерений при производстве массовых взрывов в карьерах / В.А. Фокин, М.Б. Тогунов, С.В. Семкин, Ю.А. Шитов // Взрывное дело. – 2011. – №106/63. – С.100-111.

137. Фокин, В.А. Совершенствование технологии буровзрывных работ на предельном контуре карьеров / В.А. Фокин, Г.Е. Тарасов, М.Б. Тогунов, А.А. Данилкин, Ю.А. Шитов. – Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2008. – 224с.

138. Фролов, А.А. Влияние скорости распространения продольных волн на объем разрушения скальных пород / А.А. Фролов // Известия ТулГУ. Науки о земле. – 2013. – Вып. 3. – С.136-142.

139. Ханукаев, А.Н. Физические процессы при отбойке горных пород взрывом / А.Н. Ханукаев. – М.: Недра, 1974. – 224 с.

140. Харламова, Е.В. Экологическая безопасность в регионе с интенсивным воздействием источников техногенных землетрясений / Е.В. Харламова, В.М. Шмандий, С.В. Гальчук // Гигиена и санитария. – 2012. – №5. – С.52-53.

141. Холодилов, А.Н. Инфракрасная фурье-спектроскопия полупроводниковых структур с тонкими слоями ($In_xGa_{1-x}As/GaAs$, $Pb_{1-x}Sn_xTe/BaF_2$, пористый кремний): автореф. дис. ...к-та физ.-мат. наук: 01.04.10. / Холодилов Андрей Николаевич. – СПб., 1995. 16с.

142. **Холодилов, А.Н.** Методические основы выбора линии наименьшего сопротивления при взрывной отбойке горных пород на основе данных акселерометрии / **А.Н. Холодилов**, В.А. Артемов, Ю.И. Виноградов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – №5. – С.314-318.

143. **Холодилов, А.Н.** Методология оценки сейсмической безопасности массовых взрывов, производимых на подземных рудниках вблизи надшахтных сооружений / **А.Н. Холодилов** // «Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование». Международная научно-практическая конференция, посвященная 110-летию горного факультета: тезисы докладов (Санкт-Петербург, 28-29 октября 2015 г.). – СПб: НМСУ, 2015. – С.74.

144. **Холодилов, А.Н.** Методология оперативного прогнозирования сейсмического действия массовых взрывов / **А.Н. Холодилов** // Инновационное развитие горнодобывающей отрасли - II-я Международная научно-техническая интернет-конференция: тезисы докладов (Кривой Рог, 14 декабря 2017 г.). – Кривой Рог: Криворожский национальный университет, 2017. – С.216.

145. **Холодилов, А.Н.** Методология оценки сейсмической безопасности массовых взрывов, производимых на подземных рудниках, вблизи надшахтных сооружений / **А.Н. Холодилов**, А.П. Господариков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – №.2. – С.320-328.

146. **Холодилов, А.Н.** Минимизация ущерба от далекодействующих факторов промышленных взрывов / **А.Н. Холодилов** // Освоение минеральных ресурсов Севера: проблемы и решения: Труды 10-й международной научно-практической конференции (Воркута, 11-13 апреля 2012 г.). – Воркута: Филиал НСМУ «Горный» «Воркутинский горный институт», 2012. – Т.2. – С.295-297.

147. **Холодилов, А.Н.** Повышение надежности прогноза сейсмического действия промышленных взрывов / **А.Н. Холодилов** // «Взрывная технология. Эмпирика и теория. Достижения. Проблемы. Перспективы» - Международная научно-практическая конференция: материалы конференции (27-28 октября 2011 г.). – Тула: ТулГУ, 2011. – С.69-74.

148. **Холодилов, А.Н.** Проблемы обеспечения безопасности по сейсмическому и воздушно-ударному факторам промышленных взрывов / **А.Н. Холодилов** // «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики» - 8-я Международная конференция по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики: материалы конференции (1-2 ноября 2012 г.). – Тула: ТулГУ, 2012. – Т.1. – С.284-288.

149. **Холодилов, А.Н.** Проблемы обеспечения сейсмической безопасности при строительстве транспортных тоннелей / **А.Н. Холодилов**, С.Г. Гендлер, Е.Ю. Виноградова, А.С. Шиляев // Записки Горного института. – 2007. – Т.171. – С.229-232.

150. **Холодилов, А.Н.** Современные методы прогнозирования динамического воздействия взрывных работ на охраняемые объекты / **А.Н. Холодилов** // Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование - IV Международная научно-практическая конференция: тезисы докладов (Санкт-Петербург, 26-28 октября 2021 г.). – СПб: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. – С.36.

151. **Холодилов, А.Н.** Способ оценки параметров сейсмического действия массового взрыва на карьере по результатам измерений в одной точке / **А.Н. Холодилов**, А.С. Шиляев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – №88. – С.245-248.

152. **Холодилов, А.Н.** Технические средства мониторинга параметров воздушных ударных волн / **А.Н. Холодилов**, В.А. Артемов, Ю.И. Виноградов // Освоение минеральных ресурсов Севера: проблемы и решения: Труды 9-й международной научно-практической конференции (Воркута, 6-8 апреля 2011 г.). – Воркута: Филиал СПГГИ(ТУ) «Воркутинский горный институт», 2011. – С.209-210.

153. Худсон, Д. Статистика для физиков / Д. Худсон. – М.: Изд-во «Мир», 1967. – 242с.

154. Хусаинова, Р.З. Проблемы экологической безопасности и безопасности персонала и населения при утилизации непригодных к использованию боеприпасов / Р.З. Хусаинова, Ю.С. Чуйков // Астраханский вестник экологического образования. – 2013. – № 2 (24). – С. 156-169.

155. Цейтлин, Я.И. Расчет радиуса зоны действия взрывного шума / Я.И. Цейтлин, В.А. Громов // Монтаж. и спец. строительные работы. Серия Спец. строит. работы. Экспресс-информ. – 1984. – Вып.1. – С. 22-26.

156. Цейтлин, Я.И. Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов / Я.И. Цейтлин, Н.И. Смолий. – М.: Недра, 1981. – 192с.

157. Черных, Е.Н. Экспериментальная оценка сейсмического действия массовых взрывов в разрезе «Нерюнгринский» на охраняемые объекты / Е.Н. Черных // Геолого-геофизическая среда и разнообразные проявления сейсмичности - Международная конференция: сборник материалов. – Нерюнгри: Изд-во Технического института (ф) СВФУ, 2015. – С.200-207.

158. Шемякин, Е.И. Сейсмозрывные волны в процессе горного производства. – М.: ННЦ ГП – ИГД им. А.А. Скочинского, 2004. – 76с.

159. Шер, Е.Н. Сейсмические колебания при массовых взрывах на карьерах с использованием высокоточной электронной и неэлектрической систем взрывания / Е.Н. Шер, А.Г. Черников // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2009. – №6. – С.54-60.

160. Шулаков, Д.Ю. Изучение сейсмического воздействия буровзрывных работ на здания, подрабатываемые шахтой ОАО «КНАУФ ГИПС НОВОМОСКОВСК» / Д.Ю. Шулаков // Стратегия и процессы освоения георесурсов: материалы ежегод. науч. сес. ГИ УрО РАН по результатам НИР в 2009 (Пермь, 19-23 апреля 2010 г.). – Пермь: ГИ УрО РАН, 2010. – С.177-179.

161. Шуйфер, М.И. Исследование сейсмического эффекта взрывов на строительстве гидросооружений / М.И. Шуйфер // Взрывное дело – 1983. – №85/42. – С.127-132.

162. Эквист, Б.В. Обоснование и разработка методов повышения безопасности сейсмического проявления короткозамедленного взрывания на горных предприятиях: автореф. дис. ...д-ра техн. наук: 05.26.03. / Эквист Борис Владимирович. – М., 2009. – 44с.

163. Эквист, Б.В. Повышение безопасности короткозамедленного взрывания / Б.В. Эквист // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – №5. – С.389-394.

164. Эквист, Б.В. Повышение безопасности сейсмического проявления короткозамедленного взрывания на горных предприятиях / Б.В. Эквист, М.Г. Горбонос // Горный журнал. – 2016. – №10. – С.34-36.

165. Эткин, М.Б. Взрывные работы в энергетическом и промышленном строительстве: Научно-практическое руководство / М.Б. Эткин, А.Е. Азаркович. – М.: Изд-во МГГУ, 2004. – 317с.

166. Юшкин, В.Ф. О переходе сейсмозрывной волны от скальных пород в осадочный чехол / В.Ф. Юшкин // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2014. – Т.2. – №4. – С.174-179.

167. Якубович, В.А. Линейные дифференциальные уравнения с периодическими коэффициентами и их приложения / В.А. Якубович, В.М. Старжинский. – М.: Наука, 1972. – 720с.

168. Alipour, A. Artificial neural network or empirical criteria? A comparative approach in evaluating maximum charge per delay in surface mining – Sungun copper mine / A. Alipour, M. Mokhtarian, J. Abdollahei Sharif // Journal of the Geological Society of India. – 2012. – Vol.79. – Iss.6. – P.652-658.

169. Aloui, M. Ground Vibrations and Air Blast Effects Induced by Blasting in Open Pit Mines: Case of Metlaoui Mining Basin, Southwestern Tunisia / M. Aloui, Y. Bleuzen, E. Essefi, C. Abbes // *Journal of Geology & Geophysics*. – 2016. – Vol. 5. – Iss. 3. – 8 p.
170. Amnieh, H.B. Safe vibrations of spilling basin explosions at «Gotvand Olya dam» using artificial neural network / H.B. Amnieh, M. Bahadori // *Archives of Mining Sciences*. – 2014. – Vol. 59. – № 4. – P.1087-1096.
171. Armaghani, D.J. Feasibility of ANFIS model for prediction of ground vibrations resulting from quarry blasting / D.J. Armaghani, E. Momeni, S.V.A.N.K. Abad, M. Khandelwal // *Environmental Earth Sciences*. – 2015. – Vol. 74. – Iss. 4. – P.2845-2860.
172. Arora, S. Estimation of near-field peak particle velocity: A mathematical model / S. Arora, K. Dey // *Journal of Geology and Mining Research*. – 2010. – Vol.2(4). – P. 68-73.
173. Ataei, M. Evaluation of blast-induced damage effects on underground / M. Ataei, M. Zare // 7th International Scientific Conference – SGEM2007. [Электронный ресурс] – URL: <https://www.sgem.org/sgemlib/spip.php?article1339> (Дата обращения 17.04.2023).
174. Ataei, M. Improved prediction of blast-induced vibrations in limestone mines using Genetic Algorithm / M. Ataei, F. Sereshki // *Journal of Mining & Environment*. – 2017. – Vol. 8. – №2. – P.291-304.
175. Belin, V.A. Methodical principles of prediction of seismic effect due to large-scale blasting / V.A. Belin, A.N. Kholodilov, A.P. Gospodarikov // *Gornyi Zhurnal*. – 2017. – No 2. – P.66-69.
176. Bhagwat, V.P. Comparison of Some Blast Vibration Predictors for Blasting in Underground Drifts and Some Observations / V.P. Bhagwat, K.J. Dey // *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*. – 2016. – Vol.97. – Iss. 1. – P.33-38.
177. Blastmate III Operator Manual: 714u0101, rev. 13. [Электронный ресурс] – URL: https://www.instantel.com/file/127/download?token=oDRiD_NS (Дата обращения 17.04.2023).
178. BS 5228-2:2009+A1:2014. Code of practice for noise and vibration control on construction and open sites. Vibration. UK National Standards Body, 2014. – 96p.
179. Chen, C. The Improvement and Comparison of Blast Vibration Velocity Prediction Method / C. Chen, L. Wu, X. Chen, B. Li, Y. Peng // *Geotechnical and Geological Engineering*. – 2018. – Vol.36. – Iss. 3. – P.1673–1681.
180. Choi, B.-H. Study on the Blast Vibration Produced by Mining Activity and Safety Criteria / B.-H. Choi, C.-H. Ryu, J.-H. Jeong // *Proceedings of the 7th International Conference on Physical Problems of Rock Destruction (Xiamen, August 10-13, 2011)*. – China: Metallurgical Industry Press, 2011. – P.413-416.
181. Dehghani, H. Development of a model to predict peak particle velocity in a blasting operation / H. Dehghani, M. Ataee-pour // *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. – 2011. – Vol. 48. – Iss. 1. – P.51-58.

182. DIN 4150-3:1999-02. Structural vibration. Part 3: Effects of vibration on structures. – 1999. – 11p.

183. Erten, O. Analysis of quarry-blast-induced ground vibrations to mitigate their adverse effects on nearby structures / O. Erten, G. Konak, M.S. Kizil, A.H. Onur, D. Karakus // *International Journal of Mining and Mineral Engineering*. – 2009. – V.1. – №4. – P.313-326.

184. Faramarzi, F. Simultaneous investigation of blast induced ground vibration and airblast effects on safety level of structures and human in surface blasting / F. Faramarzi, M.A. Ebrahimi Farsangi, H. Mansouri // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2014. – Vol.24. – Iss.5. – P.663-669.

185. Fouladgar, N. Application of cuckoo search algorithm to estimate peak particle velocity in mine blasting / N. Fouladgar, M. Hasanipناه, H. Bakhshandeh Amnieh // *Engineering with Computers*. – 2017. – Vol.33. – Iss. 2. – P.181-189.

186. Ghosh, A. A simple new blast vibration predictor (based on wave propagation laws) / A. Ghosh, J.J.K. Daemen // *Proceeding of the 24th US Symposium on Rock Mechanics*, June 20-23, 1983, Texas A and M University and Association of Engineering Geologists, College Station, Tex., USA., 1983. – P.151-161.

187. Giraudi, A. An Assessment of Blasting Vibrations: A Case Study on Quarry Operation / A. Giraudi, M. Cardu, V. Kecojevic // *American Journal of Environmental Sciences*. – 2009. – Vol.5. – Iss. 4. – P.468-474.

188. González-Nicieza, C. Influence of depth and geological structure on the transmission of blast vibrations / C. González-Nicieza, M. I. Álvarez-Fernandez, A.E. Alvarez-Vigil, D. Arias-Prieto, F. López-Gayarre, F.L. Ramos-Lopez // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. – 2014. – Vol.73. – Iss. 4. – P.1211-1223.

189. Gou, Y. Attenuation assessment of blast-induced vibrations derived from an underground mine / Y. Gou, X. Shi, J. Zhou, X. Qiu, X. Chen, X. Huo // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2020. – Vol. 127. – Article 104220.

190. Han, L. Probability analysis for influence of time-delay error of detonators on superposed seismic wave vibration reduction / L. Han, H. Li, D. Liu, T. Ling, C. Li, S. Liang, // *Journal of vibration and shock*. – 2019. – Vol. 38. – No. 3. – P.96-101, 124.

191. Holub, K. Regularity of particle velocity decrease with scaled distance for rockbursts and shot holes / K. Holub, J. Rušajová // *Acta Montanistica Slovaca*. – 2015. – Vol.20. – №2. – P.80-85.

192. Hosseini, M. Analysing the Ground Vibration Due to Blasting at AlvandQoly Limestone Mine / M. Hosseini, M.S. Baghikhani // *International Journal of Mining Engineering and Mineral Processing*. – 2013. – Vol.2. – № 2. – P.17-23.

193. Jahed Armaghani, D. Prediction of blast-induced air overpressure: a hybrid AI-based predictive model / D. Jahed Armaghani, M. Hajihassani, A. Marto, R Shirani Faradonbeh,

E. Tonnizam Mohamad // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2015. – Vol.187. – Article number:666. – 13p.

194. Jahed Armaghani, D. Airblast prediction through a hybrid genetic algorithm-ANN model / D. Jahed Armaghani, M. Hasanipanah, A. Mahdiyar, M.Z. Abd Majid, H. Bakhshandeh Amnieh, M.M.D. Tahir // *Neural Computing and Applications*. – 2018. – Vol. 29. – P.619–629.

195. Kadiri, I. Measurement and 2D Axisymmetric Modeling of Mining Blast-Induced Ground Vibrations / I. Kadiri, Y. Tahir, S. Fertahi, O. Iken, M. Dlimi, R. Agounoun, K. Sbai // *Indian Geotechnical Journal*. – 2020. – Vol. 50. – Iss. 1. – P. 96-116.

196. Kaláb, Z. Examples of law of seismic wave attenuation / Z. Kaláb, B. Pandula, M. Stolárik, J. Kondela // *Metalurgija*. – 2013. – Vol.52. – №3. – P.387-390.

197. Khaled, M. Experimental techniques to reduce blasting vibration level, Tourah, Cairo, Egypt / M. Khaled, K. Abdel Rahman, A. Abo Makarem // *Proceedings of the 33rd Annual Conference of Explosives and Blasting Technique, Nashville, USA, 2007*. – Vol.1. – P.136-152.

198. Khandelwal, M. Assessment of Maximum Explosive Charge Used Per Delay in Surface Mines / M. Khandelwal, N. Mastorakis // *Advances in Neural Networks, Fuzzy Systems and Artificial Intelligence: Proceedings of the 13th International Conference on Artificial Intelligence, Knowledge Engineering and Data Bases (AIKED '4) (Gdansk, Poland, May 15-17)*. – Poland, 2014 – P.100-105.

199. Khandelwal, M. Classification and regression tree technique in estimating peak particle velocity caused by blasting / M. Khandelwal, D.J. Armaghani, R.S. Faradonbeh, M. Yellishetty, M. Majid, M. Monjezi // *Engineering with Computers*. – 2017. – Vol.33. – Iss. 1. – P.45-53.

200. Khandelwal, M. Prediction of blast-induced ground vibration using artificial neural network / M. Khandelwal, T.N. Singh // *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. – 2009. – Vol.46. – Iss. 7. – P.1214-1222.

201. **Kholodilov, A.** A new approach in seismic safety evaluation for blasting operations performed by Russian mining companies / **A. Kholodilov**, A. Gospodarikov, A. Miasnikov // *14th SGEM GeoConference on Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining. Conference Proceedings (Albena, 17-26 June 2014)*. – Bulgaria: STEF92 Technology Ltd, 2014. – Vol.3. – P.3-9.

202. **Kholodilov, A.N.** Increase of Reliability of the Estimation of Seismic Safety of Ground Constructions of the Mountain Enterprises, Leaders Explosive Works / **A.N. Kholodilov** // *Proceedings of the 7th International Conference on Physical Problems of Rock Destruction (Xiamen, August 10-13, 2011)*. – China: Metallurgical Industry Press, 2011. – P.445-447.

203. **Kholodilov, A.N.** Method for forecasting of surface facilities vibrations reasoned by impulse action of air shock waves / **A.N. Kholodilov**, Yu.I. Vinogradov // *Mining Informational and Analytical Bulletin*. – 2021. – No 2. – P.55-63.

204. **Kholodilov, A.N.** Modeling Seismic Vibrations under Massive Blasting in Underground Mines / **A.N. Kholodilov**, A.P. Gospodarikov // *Journal of Mining Science*. – 2020. – V.56. – P.29-35.

205. **Kholodilov, A.N.** Procedural framework for explosion classification by the seismic load criterion / **A.N. Kholodilov**, A.P. Gospodarikov, A.A. Eremenko // *Gornyi Zhurnal*. – 2021. – No 5. – P.98-102.

206. Klæboe, R. Human reaction to vibrations from blasting activity – Norwegian exposure–effect relationships / R. Klæboe, A.H. Amundsen, C. Madshus, K.M. Norén-Cosgriff, I. Turunen-Rindel // *Applied Acoustics*. – 2016. – Vol. 116. – P.49-57.

207. Kostic', S. Predictions of Experimentally Observed Stochastic Ground Vibrations Induced by Blasting / S. Kostic', M. Perc, N. Vasovic', S. Trajkovic' // *PLoS ONE* 8(12): e82056. – 2013. – Vol.8. – Iss. 12. – 13p.

208. Kumar, R. Determination of blast-induced ground vibration equations for rocks using mechanical and geological properties / R. Kumar, D. Choudhury, K. Bhargava // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. – 2016. – Vol.8.– Iss. 3. – P.341-349.

209. Li, C. A study on the blasting vibration control of creep mass high slope / C. Li, J. Cangru // *The 14th World Conference on Earthquake Engineering (Beijing, October 12-17, 2008)*. – China, 2008. – 5p.

210. Li, Q. Blasting Vibration Safety Criterion Analysis with Equivalent Elastic Boundary: Based on Accurate Loading Model / Q. Li, L. Qiao, G. Dasgupta, S. Ma, L. Wang, J. Dong // *Shock and Vibration*. – 2015. – Article ID 604683. – 10p.

211. Lizarazo-Marriaga, J. A new approach to predict local site effects related to blast-induced ground vibrations / J. Lizarazo-Marriaga, C.A. Vargas, L. Tiria // *Journal of Geophysics and Engineering*. – 2018. – Vol. 15. – No 5. – P.1843-1850.

212. Lubej, S. Ground vibration response due to blast induced vibration: simple prediction model based on fuzzy logic / S. Lubej, A. Ivanic, S. Toplak, I. Ivanovski, P. Jelušić // *The 22nd International Congress on Sound and Vibration (Florence, 12-16 July 2015)*. – Italy, 2015. – V.2. – P.1744-1751.

213. Lubej, S. Monitoring and vibration modeling as possible the protection of people and buildings / S. Lubej, A. Ivanic, P. Jelusic, M. Lep, S. Toplak, I. Ivanovski // *23rd International Congress on Sound and Vibration. Proceedings of a meeting held 10-14 July 2016, Athens, Greece: International Institute of Acoustics and Vibration (IIAV), 2016*. – Vol. 4. – P.2608-2615.

214. Malbašić, V. Determination of Seismic Safety Zones during the Surface Mining Operation Development in the Case of the “Buvač” Open Pit / V. Malbašić, L. Stojanović // *Minerals*. – 2018. – Vol.8. – Iss. 2. –13p.

215. Minimate Plus Operator Manual: 716u0101, rev. 15. [Электронный ресурс] – URL: <https://www.instantel.com/file/125/download?token=8FFROQPG> (Дата обращения 17.04.2023).

216. Mohamad, E.T. Simulation of Blasting Induced Ground Vibration by Using Artificial Neural Network / E.T. Mohamad, S.A. Noorani, D.J. Armaghani, R. Saad // *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. – 2012. – Vol.17/R. – P.2571-2584.

217. Mohamed, A.M.E. Quarry blasts assessment and their environmental impacts on the nearby oil pipelines, southeast of Helwan City, Egypt / A.M.E. Mohamed, Abuo El-Ela A. Mohamed // NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics. – 2013. – №2. – P.102-115.

218. Nakamura, Y. Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications / Y. Nakamura // Proc. of 12th World Conf. on Earthquake Engineering, 2000. – Paper 2656. – 8 p.

219. Nateghi, R. Evaluation of blast induced ground vibration for minimizing negative effects on surrounding structures / R. Nateghi // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2012. – Vol.43. – P.133-138.

220. Nguyen, H. Predicting Blast-Induced Air Overpressure: A Robust Artificial Intelligence System Based on Artificial Neural Networks and Random Forest / H. Nguyen, X. Bui // Natural Resources Research. – 2019. – Vol. 28. – P.893-907.

221. Nianhua, Y. Monitoring and Analyses on Blasting Vibration of Thousand-ton Charge Level Long-hole Casting Blasting Project / Y. Nianhua, W. Pingliang, Z. Le // Proceedings of the 7th International Conference on Physical Problems of Rock Destruction (Xiamen, August 10-13, 2011). – China: Metallurgical Industry Press, 2011. – P.408-412.

222. Olofsson, S. Applied Explosives Technology for Construction and Mining // Applex AB, Sweden, 2002. – 342p.

223. Ozer, U. The analysis of ground vibrations induced by bench blasting at Akyol quarry and practical blasting charts / U. Ozer, A. Kahriman, M. Aksoy, D. Adiguzel, A. Karadogan // Environmental Geology. – 2008. – Vol.54. – Iss. 4. – P.737-743.

224. Ozer, U. The investigation of ground vibration measurements at an aggregate quarry in Istanbul Turkey // U. Ozer, A. Kahriman, A. Karadogan, E. Kaya, G. Acikel, S. Bicer / 8th International Scientific Conference: Mining and Geology, SGEM-2008. Varna, Bulgaria, 2008. – P.253-265.

225. Pandula, B. New criterion for estimate of ground vibrations during blasting operations in quarries / B. Pandula, K. Jelšovská // Acta Geodynamica et Geomaterialia. – 2008. – Vol. 5. – Iss. 2(150). – P.147-152.

226. Parida, A. Blast vibration analysis by different predictor approaches – a comparison / A. Parida, M.K. Mishra // Procedia Engineering. – 2015. – Vol.11. – P.337-345.

227. Playle, R. BLASTING &THE ENVIRONMENT Ground Vibrations / R. Playle. – 2009. – 23p. [Электронный ресурс] – URL: <https://pdfslide.net/download/link/by-richard-playle-rpceu-blasting-the-environment-ground-vibrations-revised> (Дата обращения 17.04.2023).

228. Prashanth, R. Estimation of peak particle velocity using soft computing technique approaches: a review / R. Prashanth, D.S. Nimaje // Noise and Vibration Worldwide. – 2018. – Vol. 49. – Iss. 9-10. – P.302-310.

229. Qiu, D. Regression Analysis of the Blasting Vibration Test Parameters Based on Wavelet De-Noising and Quantum Genetic Algorithm / D. Qiu, Sh. Li, H. Sun, I. Zhang // *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. – 2014. – V.19/X. – P.7203-7212.
230. Rai, R. A new predictor for ground vibration prediction and its comparison with other predictors / R. Rai, T.N. Singh // *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*. – 2004. – Vol.11. – №3. – P.178-184.
231. Saadat, M. An ANN-based approach to predict blast-induced ground vibration of Gol-E-Gohar iron ore mine, Iran / M. Saadat, M. Khandelwal, M. Monjezi // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. – 2014. – Vol.6. – Iss. 1. – P. 67-76.
232. Sambuelli, L. Theoretical Derivation of a Peak Particle Velocity–Distance Law for the Prediction of Vibrations from Blasting / L. Sambuelli // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2009. – Vol.42. – Iss. 3 – P.547-556.
233. Sawmliana, C. Impact of deep-hole opencast blasting on the stability of water dams of a close-by underground coal mine / C. Sawmliana, R.K. Singh, P. Pal Roy, P. Basu // *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. – 2009. – Vol. 109. – P.401-410.
234. Seetharama Rao, Y. Prediction of ground vibrations and frequency in opencast mine using neuro-fuzzy technique / Y. Seetharama Rao, K. Mallikarjuna Rao // *Journal of Scientific & Industrial Research*. – 2009. – Vol.68. – №4. – P.292-295.
235. Shuran, Lv. Applying BP Neural Network Model to Forecast Peak Velocity of Blasting Ground Vibration / Lv. Shuran, Lv. Shujin // *Procedia Engineering*. – 2011. – V.26. – P.257-263.
236. Soltani-Mohammadi, S. Investigating ground vibration to calculate the permissible charge weight for blasting operations of Gotvand-olya dam underground structures / S. Soltani-Mohammadi, H.B. Amnieh, M. Bahadori // *Archives of Mining Sciences*. – 2012. – Vol.57. – No 3. – P.687-697.
237. SS 460 48 66. Vibration and shock. – Guidance levels for blasting induced vibrations in buildings, 1991. – 15p.
238. TDS3000B Series User Manual: 071095704. [Электронный ресурс] – URL: <https://download.tek.com/manual/071095704.pdf> (дата обращения 17.04.2021).
239. Tripathy, G.R. Safety of engineered structures against blast vibrations: A case study / G.R. Tripathy, R.R. Shirke, M.D. Kudale // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. – 2016. – Vol.8. – Iss.2. – P.248-255.
240. Tuncer, G. The damage risk evaluation of ground vibration induced by blasting in Naipli quarry / G. Tuncer, A. Kahriman, K. Ozdemir, S. Guven, A. Ferhatoglu, T. Gezbul // 3rd international conference: modern management of mine producing, geology and environmental protection, SGEM-2003. Varna, Bulgaria, 2003. – P.67–75.
241. Uyar, G.G. Comparative review and interpretation of the conventional and new methods in blast vibration analyses / G.G. Uyar, C.O. Aksoy // *Geomechanics and Engineering*. – 2019. – Vol. 18. – No 5. – P.545-554.

242. Yan, W.M. Reliability of empirical relation on the attenuation of blast-induced vibrations / W.M. Yan, L.G. Tham, Ka-Veng Yuen // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. – 2013. – Vol.59. – P.160–165.

243. Yao, Q. Survey on the influencing factors of human comfort in a long-period frequent blast vibration environment / Q. Yao, X. Yang, H. Li // Journal of Vibroengineering. – 2017. – Vol. 19. – Iss. 7. – P.5498-5519.

244. Yuan, Q. Peak Particle Velocity and Principal Frequency Prediction Based on RS-FNN Comprehension Method for Blasting Vibration / Q. Yuan, L. Wu, Q. Zuo, B. Li // The Electronic Journal of Geotechnical Engineering. – 2014. – Vol.19/Z2. – P.10043-10056.

245. Zdravković, S. The stability aspect of seismic safety of structures during open pit mining blasting // S. Zdravković, D. Zlatkov, D. Turnić / 11th International Multidisciplinary Scientific GeoConference: Exploration and Mining, SGEM-2011. Varna, Bulgaria. – 2011. – P.1019-1025.

246. Zhao, M. An Energy-Based Safety Evaluation Index of Blast Vibration / M. Zhao, D. Huang, M. Cao, En-an Chi, J. Liu, Q. Kang // Shock and Vibration. – 2015. – Vol.2015. – Article ID698193. –P.9.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Иллюстративный материал к главе 2

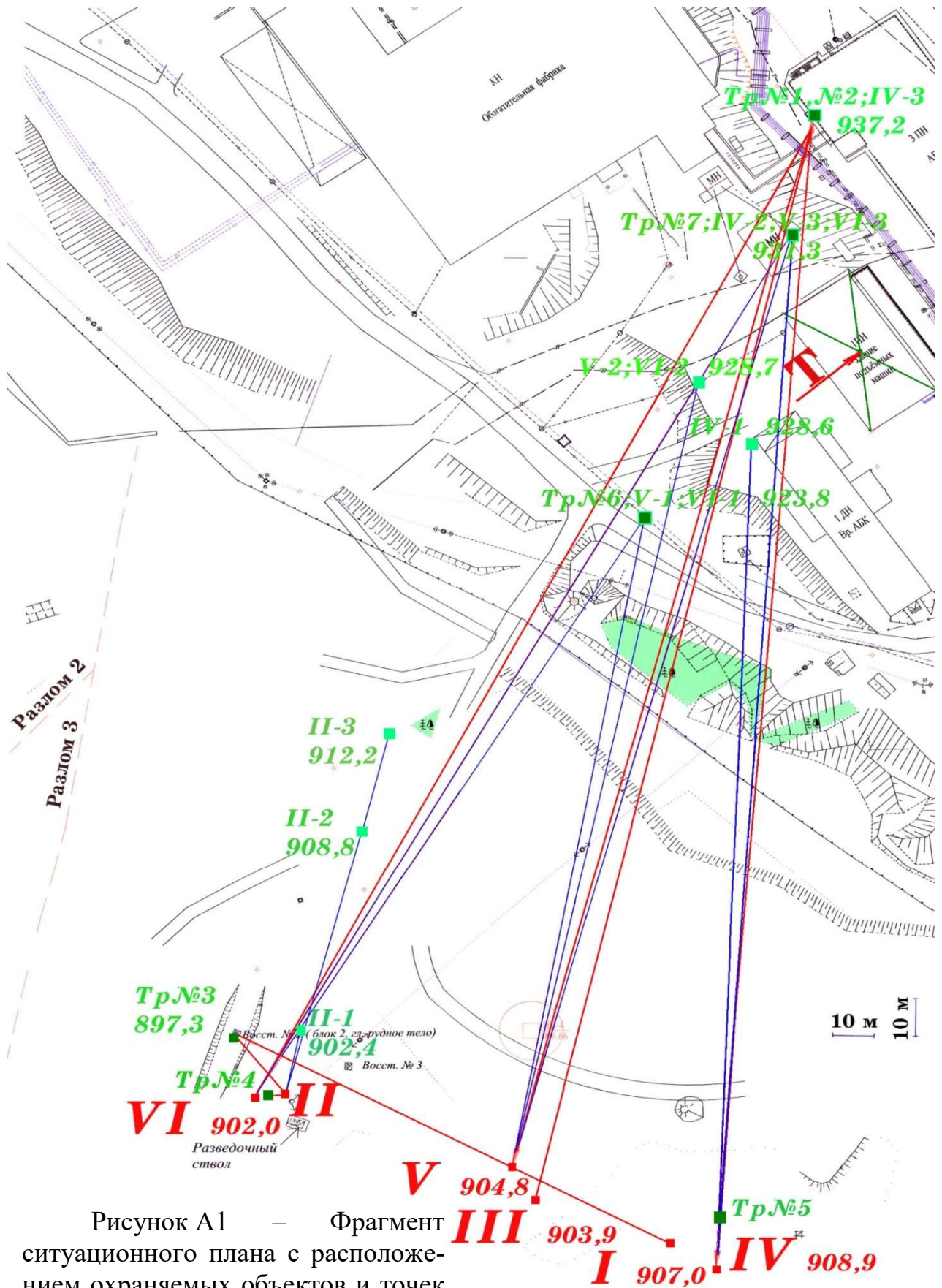


Рисунок А1 – Фрагмент ситуационного плана с расположением охраняемых объектов и точек регистрации СВВ



Рисунок А2 – Точка регистрации № 1. Стрелкой показан датчик сейсмической станции «Minimax», рядом установлены датчики СВ-30



Рисунок А3 – Точка регистрации № 2 (использовались датчики СВ5)



Рисунок А4 – Точка регистрации № 3. Стрелкой показан датчик СВ-30



Рисунок А5 – Точка регистрации № 4. Стрелками показаны датчик СВ-30 и датчик сейсмической станции «Minimax»



Рисунок А6 – Точка регистрации № 5. Стрелкой показано направление на технологический взрыв



Рисунок А7 – Точка регистрации № 6



Рисунок А8 – Точка регистрации №7. Стрелкой показано место установки датчика СВ-5 и направление на взрыв



Рисунок А9 – Осциллографическая регистрация по сейсмической трассе от II-го технологического взрыва. Цифрами обозначены точки регистрации в порядке удаления от эпицентра взрыва. Стрелкой показано направление на эпицентр взрыва

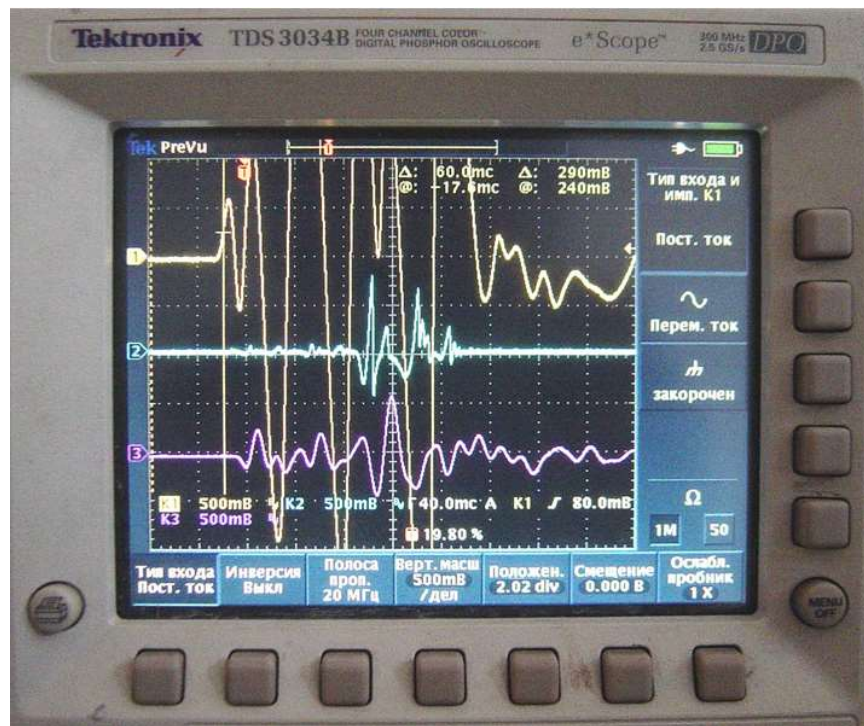


Рисунок А10 – Пример копии экрана осциллографа с осциллограммами сейсмических сигналов от II – го технологического взрыва

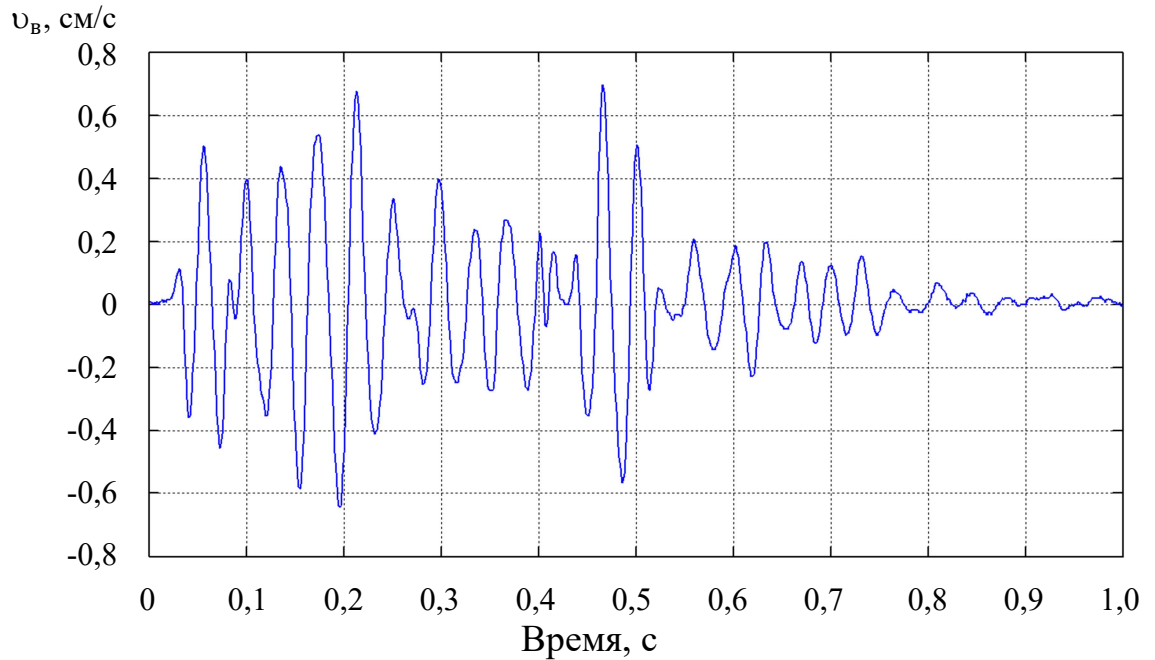


Рисунок А11 – Велосиграмма вертикальной компоненты скорости смещения от 6-го экспериментального взрыва в точке регистрации №1

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт внедрения в АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

УТВЕРЖДАЮ:

Заместитель главного инженера
по горным ударам филиала-сегмента
Горнорудные активы в
АО «ЕВРАЗ ЗСМК», к.т.н.

 В. А. Штриц

«14» 04 2023 г.



АКТ

внедрения диссертационной работы Холодилова А.Н. по теме:
«Научные основы прогноза динамического воздействия взрывных работ на охраняемые объекты»

№ п/п	Наименование разработки	Новизна технического решения	Место внедрения	Период реализации	Годовой экономический эффект, млн руб.	Экономический эффект за период реализации, млн руб.
1	Методические рекомендации по определению пространственного и временного распределения сейсмозрывных волн при производстве массовых взрывов в подземных условиях	Диаграмма выделения энергии, велосигграмма, сейсмограмма, акселерограмма в условиях взрывов в районе п. Шерегеш	Шерегешская шахта	Январь 2012 - май 2016 г.	0,5	2,5/4,5
2	Схемы рассредоточения зарядов ВВ по интервалам замедления	Оптимальные параметры зарядов ВВ в интервале замедлений 0-750 мс	Шерегешская шахта	Январь 2017 - декабрь 2022 г.	1,0	6,0/6,0

Таким образом, суммарный экономический эффект от внедрения указанных теоретических и разработанных технологических решений составляет 8,5 млн руб.

Начальник технического отдела Шерегешской шахты АО "ЕВРАЗ ЗСМК"

Экономист Шерегешской шахты АО "Евраз ЗСМК"

П. В. Бондарев

Н. Л. Шахова

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017660214

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017660214

РАСЧЕТ КРИТИЧЕСКОЙ МАССЫ ЗАРЯДА ДЛЯ
ОХРАНЯЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (RU)*

Авторы: *Ишейский Валентин Александрович (RU), Звонарев Иван Евгеньевич (RU), Холодилов Андрей Николаевич (RU)*

Заявка № 2017617172

Дата поступления 21 июля 2017 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 19 сентября 2017 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023614973

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2023614973

**Программа для моделирования сейсмического
воздействия вблизи оснований наземных охраняемых
объектов с учетом структурных особенностей массива
при подземных взрывах**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования «Санкт-
Петербургский горный университет» (RU)*

Авторы: *Холодилов Андрей Николаевич (RU), Рядинский
Даниил Эдуардович (RU), Ковалевский Владимир Николаевич
(RU)*

Заявка № **2023613697**
Дата поступления **02 марта 2023 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **09 марта 2023 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023616009

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023616009

**Программа для моделирования колебательного спектра
зданий при воздействии на них воздушной ударной
волны**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет» (RU)*

Авторы: *Холодилов Андрей Николаевич (RU), Рядинский
Даниил Эдуардович (RU), Ковалевский Владимир
Николаевич (RU)*

Заявка № 2023613987

Дата поступления 03 марта 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 21 марта 2023 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов