

**«ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»**

филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Пермского федерального исследовательского центра  
Уральского отделения Российской академии наук

---

*На правах рукописи*



**ВЕРХОЛАНЦЕВ Александр Викторович**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ  
ВЕЛИЧИНЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ  
ВЗРЫВНЫХ РАБОТ НА ПОВЕРХНОСТНЫЕ  
ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ**

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

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
к.ф.-м.н. Р.А. Дягилев

**Пермь – 2023**

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ</b> .....	4
<b>ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ</b> .....	10
1.1. Исторические аспекты развития исследований сейсмике взрыва .....	10
1.1.1. <i>Короткозамедленное взрывание. Системы инициирования</i> .....	17
1.1.2. <i>Управление действием взрыва при распространении сейсмических волн</i> .....	17
1.1.3. <i>Грунтовые условия. Резонансные (спектральные) характеристики грунтов</i> .....	19
1.1.4. <i>Резонансные характеристики инженерных сооружений</i> .....	20
1.2. Критерии сейсмической опасности взрывных работ .....	21
1.2.1. <i>Определение максимального модуля вектора массовой скорости смещения</i> .....	23
1.3. Нормативные документы в области сейсмической безопасности.....	24
1.3.1. <i>Стандартизация измерений вибрации и оценки ее воздействия на строительные конструкции</i> .....	24
1.3.2. <i>Нормативное регулирование в области безопасного проведения взрывных работ</i> .....	26
1.4. Нормативные способы учета влияния грунтовых условий .....	30
1.5. Выводы и постановка задач исследований.....	32
<b>ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКА И ХАРАКТЕРИСТИК СРЕДЫ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВОВ</b> .....	35
2.1. Влияние физико-механических свойств взрывающей породы и направления инициирования зарядов .....	37
2.2. Влияние условий и способов взрывания.....	42
2.2.1. <i>Тип ВВ</i> .....	44
2.2.2. <i>Форма, конструкция и глубина заложения заряда</i> .....	49
2.2.3. <i>Интервал замедлений и количество ступеней замедления (корректность работы системы инициирования)</i> .....	50
2.3. Влияние грунтовых условий.....	59
2.4. Влияние рельефа местности .....	60
2.5. Расстояние от источника до точки измерения и максимальный заряд, приходящийся на одну ступень замедления.....	62
2.6. Затухание сейсмических волн на пути их распространения от места взрыва к охраняемому объекту .....	65
2.7. Определение параметра затухания сейсмических волн и коэффициента сейсмичности на основе инструментальных измерений серии взрывов .....	67
2.8. Выводы .....	71

<b>ГЛАВА 3. ОЦЕНКА И УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ГРУНТОВЫХ УСЛОВИЙ (РЕЗОНАНСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТА) НА ИНТЕНСИВНОСТЬ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ.....</b>	<b>72</b>
3.1. Анализ влияния мощностей слоев и физических свойств слагающих пород на резонансные характеристики грунта.....	75
3.1.1. Влияние вариаций гидрогеологических и сезонных условий .....	78
3.2. Способы оценки и учета влияния грунтовых условий.....	84
3.2.1. Инструментальные методы сейсмического микрорайонирования....	84
3.2.2. Сравнение результатов, полученных инструментальными методами сейсмического микрорайонирования.....	88
3.2.3. Аналитический расчет спектральных (резонансных) характеристик грунтов, основанный на данных о скоростном строении толщи пород .....	95
3.2.4. Сравнение результатов, полученных способом Накамуры и аналитически .....	109
3.2.5. Статистический способ оценки усилений .....	112
3.3. Выводы .....	115
<b>ГЛАВА 4. МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЕЛИЧИНЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ НА ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ.....</b>	<b>117</b>
4.1. Комплекс инструментальных измерений .....	119
4.2. Обработка данных инструментальных измерений и интерпретация результатов.....	123
4.2.1. Получение максимального модуля вектора массовой скорости смещения .....	123
4.2.2. Определение величины предельно допустимой скорости колебаний грунта для конкретного охраняемого инженерного сооружения.....	124
4.2.3. Определение зависимости амплитуды сейсмической волны от расстояния .....	125
4.2.4. Анализ работы СИ.....	127
4.2.5. Определение изменения амплитуды колебаний за счет резонансных эффектов для сооружений.....	128
4.2.6. Изучение латеральной изменчивости грунтовых условий .....	128
4.2.7. Оценка влияния параметров БВР на амплитуду сейсмической волны.....	130
4.2.8. Прогнозирование амплитуды сейсмической волны в произвольной точке местности .....	130
4.3. Апробация метода прогнозирования величины сейсмического воздействия взрывных работ на поверхностные здания и сооружения.....	131
4.4. Выводы .....	139
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>140</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>142</b>

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы диссертации.

Широкое применение буровзрывных работ (БВР) в народном хозяйстве тесно связано с требованием по обеспечению целостности и сохранности различных инженерных сооружений, располагающихся в зоне сейсмического воздействия. Расширение заселенных территорий, увеличение объемов извлечения полезных ископаемых, приближение фронтов горных работ к охраняемым зданиям и сооружениям приводят к росту негативного воздействия БВР, что обуславливает актуальность проблемы обеспечения безопасности сейсмических воздействий взрывов на здания и сооружения на многих горнодобывающих предприятиях. От корректности и своевременности решения данной проблемы во многом зависит эффективность проводимых горных работ, что, безусловно, отражается на себестоимости выпускаемой предприятием продукции.

Традиционно рассматриваемая проблема решается двумя способами. Один из них подразумевает повышение эффективности взрыва за счет увеличения его дробящего эффекта и снижения доли энергии сейсмических волн. Такими исследованиями занимались Барон К.А., Богацкий В.Ф., Гендлер С.Г., Корнилков С.В., Кутузов Б.Н., Маляров И.П., Мухаметшин А.М., Мучник С.В., Мосинец В.Н., Петров Н.Г., Совмен В.К., Фридман А.Г., Цирель С.В., Эквист Б.В. При исчерпании ресурсов снижение сейсмического эффекта взрыва за счет управления параметрами источника прибегают к методическим разработкам, позволяющим более точно и надежно (в отличие от нормативных методик) оценивать уровень сейсмического воздействия, и за счет этого в конкретных горно-геологических условиях обоснованно увеличивать массу зарядов. Наибольший вклад в этом направлении исследований внесли Аптикаев Ф.Ф., Гриб Н.Н., Господариков А.П., Джурик В.И., Козырев С.А., Мельников Н.В., Спивак А.А., Холодилов А.Н.

Учитывая многообразие факторов, влияющих на сейсмический эффект, прогнозирование его величины с необходимой точностью является нетривиальной задачей. Предлагаемые в нормативных документах способы

оценки сейсмически безопасного расстояния лишь частично учитывают все многообразие условий ведения БВР, за счет чего дают различия от реальных значений в 2-3 раза и более. В условиях близкого расположения сооружений от места взрыва, когда вопрос их сохранности и комфортного проживания населения становится особенно актуальным, наиболее надежным способом определения сейсмически безопасного расстояния и получения зависимости уровня сейсмического воздействия от параметров БВР является проведение прямых натурных инструментальных измерений в конкретных геологических и горнотехнических условиях. Выявление и анализ истинных, а не предполагаемых особенностей распределения уровня сейсмического воздействия на исследуемой территории позволяет добиться оптимальности используемой технологии БВР по фактору уровня сейсмического эффекта.

**Целью работы** является разработка комплекса инструментальных измерений (регистрация взрывов, изучение грунтовых условий), методов обработки полученных данных и интерпретации результатов для прогнозирования величины сейсмического воздействия взрывных работ на поверхностные здания и сооружения.

**Идея работы** заключается в детальном анализе влияния на сейсмический эффект взрывов геологических и горнотехнических факторов, а также в использовании выявленных закономерностей для прогнозирования величины сейсмического воздействия взрывов на здания и сооружения и оптимизации параметров БВР.

**Основные задачи работы:**

- получить на современном технологическом уровне кондиционные исходные данные о промышленных взрывах (трехкомпонентные сейсмические записи, детальные сведения об источнике, физико-механические свойства среды и др.), позволяющие анализировать все аспекты сейсмического воздействия в спектральной области;

- изучить геологические и горнотехнические условия на исследуемых территориях, т.е. факторы, влияющие на величину и спектральный состав сейсмического воздействия;

-разработать комплекс исследований (проведение полевых измерений и обработка сейсмических данных), позволяющий минимизировать случайные факторы и максимально точно и достоверно определить зависимость сейсмического воздействия от расстояния до места проведения БВР и массы заряда;

-разработать быстрые и надежные способы изучения и учета неравномерности пространственного распределения уровня сейсмического воздействия взрывов;

-разработать алгоритмы обработки сейсмических данных для обеспечения надежной оценки и корректного прогноза сейсмического воздействия взрывов.

**Методы исследований**, использованные в работе, предусматривают комплексный подход к решению поставленных задач и включают: анализ и обобщение отечественного и зарубежного опыта в области изучения сейсмичности взрывов и грунтовых условий; натурные измерения сейсмического эффекта взрывов с различными параметрами источников и среды; анализ горнотехнических и геологических факторов; анализ волновых форм взрывов во временной и спектральных областях; статистический анализ экспериментальных данных; верификацию полученных зависимостей и разработанных подходов.

**Научные положения**, выносимые на защиту:

1. Использование опорной сейсмической станции при инструментальных измерениях сейсмического эффекта взрывов позволяет компенсировать влияние случайных факторов, связанных с условиями взрывания (степень трещиноватости взрываемого блока, качество забойки и т.д.), и повысить надежность определения величины затухания сейсмических волн в среде.

2. Комплексный способ учета влияния грунтов на сейсмический эффект взрывов, включающий анализ их спектральных (резонансных) характеристик и количественную оценку приращения величины сейсмического воздействия с использованием опорной станции, и позволяющий выполнить корректную интерпретацию неравномерности пространственного распределения сейсмического эффекта взрывов за счет различия грунтовых условий.

3. Метод прогнозирования величины сейсмического воздействия взрывных работ на поверхностные здания и сооружения, основанный на комплексной

модели, учитывающей влияние параметров источника (масса и тип ВВ, интервал замедления и др.), среды распространения волн (расстояние, скорость затухания), пункта приема волн (грунтовые условия, рельеф местности) и обеспечивающий достоверный прогноз величины сейсмического эффекта.

### **Обоснованность и достоверность научных положений и выводов**

обеспечивается анализом большого объема экспериментальных данных (около 2.8 тыс. физических наблюдений при более чем 650 взрывах), полученных с использованием современной цифровой аппаратуры. Влияние на сейсмический эффект многообразия горнотехнических и геологических условий изучено в ходе натурных измерений на большом количестве объектов (11 предприятий). Эмпирические закономерности и особенности распространения сейсмических волн выявлены посредством применения проверенных и научно обоснованных методов анализа и обработки данных. Достоверность полученных результатов подтверждается соответствием прогнозных и фактически измеренных значений сейсмического эффекта взрывов.

### **Научная новизна:**

- впервые определены частотнозависимые оценки влияния грунтовых условий для прогнозирования сейсмического эффекта взрывов;

- разработан способ компенсации случайных факторов, связанных с условиями взрывания, посредством использования опорной сейсмической станции, позволяющий повысить достоверность прогноза уровня воздействия за счет более надежного определения параметров затухания и возможности прямой оценки усиления колебаний грунтами;

- предложенные инструментальные измерения (регистрация взрывов, изучение грунтовых условий), методы обработки полученных данных и интерпретации результатов, позволяющие выявить, оценить и учесть влияние наиболее значимых факторов, определяющих сейсмический эффект.

**Практическая ценность** работы состоит в разработке нового комплекса инструментальных измерений, обработки полученных данных и интерпретации полученных результатов, позволяющего корректно оценить и спрогнозировать величину сейсмического воздействия взрывных работ на охраняемые здания и сооружения.

**Реализация результатов работы.** Результаты данной работы активно применяются для изучения сейсмического воздействия взрывов на различных горнодобывающих предприятиях РФ:

- ОАО «Ергач», карьер «Саркаевский»;
- ОАО «Сарановская шахта "Рудная"»;
- АО «Сырьевая компания», карьер известняка;
- ОАО «Горнозаводскцемент», карьер глинистых сланцев;
- ОАО «Гипсополимер», карьер гипсового камня Чумкаского месторождения;
- ОАО «Вольскцемент», карьер цементного сырья и добавок «Большевик»;
- АО «Филипповский карьер», карьер известняка;
- ООО «Кнауф Гипс Новомосковск», гипсовая шахта;
- ООО «Биянковский щебеночный завод», карьер известняка;
- АО «Томинский ГОК», карьер медно-порфировых руд;
- ООО «Миньярский карьер», карьер известняка.

В полном объеме метод внедрен и реализуется в виде периодических наблюдений в гипсовой шахте ООО «Кнауф Гипс Новомосковск» и в виде постоянных мониторинговых наблюдений на карьере «Шахтау» в Республике Башкортостан и карьере «Томинского ГОКа» Челябинской области.

**Личный вклад автора:**

- проведение полевых наблюдений, первичная обработка и анализ данных, полученных в ходе работ, связанных с изучением сейсмического воздействия взрывных работ на различных горнодобывающих предприятиях;

- апробация метода проведения измерений и обработки результатов с использованием опорной сейсмической станции;

- организация и проведение экспериментальных работ по изучению факторов, влияющих на интенсивность сейсмического воздействия на различных горнодобывающих объектах;

- выполнение сравнительного анализа устоявшихся способов изучения грунтовых условий, а также формулировка и опробование комплекса инструментальных измерений (регистрация взрывов, изучение влияния грунтовых условий на сейсмический эффект взрывов).



**Публикации и апробация работы.** По результатам проведенных исследований опубликовано 22 печатных работы, из них 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России.

Основные результаты работ докладывались на Уральской молодежной научной школе по геофизике с 2011 по 2017 гг.; на Международной сейсмологической школе «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных» с 2015 по 2018 гг.; на VII Международной научно-практической конференции «ГЕОФИЗИКА-2009» в г. Санкт-Петербург; на конференции «Проблемы и тенденции рационального и безопасного освоения георесурсов» в г. Апатиты, 2010 г.; на I Всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с элементами молодежной научной школы «Геология в развивающемся мире» в г. Пермь, 2010 г.; на Международном научном симпозиуме «Неделя горняка-2018» в г. Москва; сессиях «ГИ УрО РАН» (2009-2019 гг.).

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав и заключения. Работа изложена на 159 страницах текста, включает 48 рисунков, 19 таблиц. Список литературы содержит 171 наименование.

Автор благодарен за поддержку и помощь в работе сотрудникам лаборатории природной и техногенной сейсмичности «ГИ УрО РАН» и сотрудникам сектора сейсмического мониторинга Уральского региона ФИЦ ЕГС РАН.

# ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

## 1.1. Исторические аспекты развития исследований сейсмоки взрыва

Исследования колебаний грунтов при взрывах различной природы занимают особое место в сейсмологии, как науке. Возможное сейсмическое воздействие необходимо учитывать при обеспечении безопасности буровзрывных работ (БВР) и крупных взрывах в строительстве. Так, именно сейсмический эффект взрыва во многих случаях ограничивает массу максимального заряда, что существенно отражается на конечном результате. Из всего объема взрывных работ наибольшим масштабом и объемами потребляемых взрывчатых веществ (ВВ) выделяется горнодобывающая промышленность.

Объем взрывных работ в технологическом цикле горного производства может достигать 90% [113]. Общий объем добычи минерального сырья в России оценивается в 101 млрд долларов, уступая только США, где добывается минеральное сырье на 140 млрд долларов [102]. В монографии [3] отмечается, что во всем мире происходит увеличение добычи полезных ископаемых, в частности, твердых полезных ископаемых, технология добычи которых связана с ведением буровзрывных работ. Выполненный в этой же монографии анализ позволяет сделать вывод о том, что с 1998 г. в нашей стране наблюдается увеличение ежегодного потребления химических ВВ.

Взрыв как источник упругих волн широко используется для изучения глубинного строения Земли, для разведки полезных ископаемых, для отработки приемов сейсмостойкого строительства. Изучение сейсмических колебаний грунта от взрывных источников способствует обеспечению контроля над проведением подземных ядерных испытаний. В результате развития исследований по этим направлениям сейсмология взрывов сформировалась как научное направление.

Первые работы, связанные с исследованиями сейсмического действия взрывов на территории Российской Империи, были выполнены старейшиной

русской сейсмологии Б.Б. Голицыным (1862-1916 гг.). Первые измерения колебаний грунта при промышленных взрывах в Советском Союзе были осуществлены в 1929 г. во время массового взрыва в Жигулях и в 1930 г. под г. Подольском. В числе первых исследования проводились на разрезе Коркинского угольного месторождения (Челябинская область) при взрыве на выброс заряда массой 1860 т ВВ [17].

Для исследования колебаний грунта при взрывах и разработки метода прогнозирования параметров этих колебаний академиком М.А. Садовским было продолжено изучение сейсмических проявлений взрывов. С целью увеличения эффективности и производительности буровзрывных работ для нужд производства были выполнены эксперименты по изучению рассредоточенных зарядов. Тестовые взрывы с различной ориентацией и распределением зарядов являлись прообразом техники каскадного взрывания, получившей широкое распространение в настоящее время. В то же время выполнялись работы по изучению эффективности взрывов в зависимости от влияния линии наименьшего сопротивления (л.н.с.), результаты которых натолкнули исследователей на фундаментальную идею характеризовать интенсивность взрыва через приведенную массу заряда или через приведенное расстояние, комплексно учитывающих массу ВВ и расстояние до места взрыва. Причем расчет приведенного расстояния ( $R_{ПР}$ ) возможен как от суммарной массы заряда ( $Q_{\Sigma}$ ), так и от максимальной массы на одну ступень замедления ( $Q_{max}$ ):

$$R_{ПР}(Q_{\Sigma}) = R \cdot n^{1/4} \cdot Q_{\Sigma}^{-1/3}, \quad (1.1)$$

$$R_{ПР}(Q_{max}) = R \cdot Q_{max}^{-1/3}, \quad (1.2)$$

где  $R$  – расстояние до места взрыва, м;  $n$  – количество ступеней замедления. Из сформулированного М.А. Садовским *принципа геометрического подобия*, применение которого актуально по сей день, следует, что при двух взрывах регистрируется один и тот же уровень сейсмического воздействия, если расстояние от заряда до точки наблюдения при втором взрыве во столько раз больше, чем при первом, во сколько радиус (физический размер) второго заряда больше первого [110]. Зарубежные специалисты в этой области также пришли к необходимости оценки сейсмического воздействия через приведенное расстояние [130, 137]. Однако при расчете приведенного расстояния,

регламентируемого нормативными документами Великобритании и США и некоторых других стран, используется не кубический корень из массы ВВ, а квадратный. Таким образом, предполагается наличие взрывного источника не сферической, а линейной формы [136, 160].

Расширение исследований в области сейсмоки промышленных взрывов объясняется, прежде всего, увеличением объема взрывных работ в горной промышленности и в строительстве, приближением взрывов к сооружениям (увеличением плотности застройки), освоением новых областей применения взрывов в народном хозяйстве (гидротехническое и городское строительство, обработка металла взрывом и пр.). Развитию сейсмических исследований способствовали также разработка и применение высококачественной сейсмической аппаратуры, основным разработчиком которой в советское время являлся Институт физики Земли АН СССР. Динамичное развитие цифровой сейсмической аппаратуры, начавшееся во второй половине 90-х годов XX века, принципиальным образом изменили возможности по решению различных задач, в том числе и связанных с оценкой сейсмического воздействия взрывов.

На основе инструментальных измерений сейсмоки взрывов были выполнены исследования по изучению и анализу различных природных и техногенных факторов, оказывающих влияние на уровень сейсмического эффекта [5, 19, 46, 91, 93, 125, 142, 166, 170 и др.]. Найденные пороговые (критические) значения скорости смещения в основании охраняемых сооружений, при которых возникают легкие повреждения, нашли затем подтверждение в многочисленных исследованиях отечественных и зарубежных ученых и инженеров (таблица 1.1). Следует отметить, что даже для зданий одного типа и ранга существенную роль могут играть различия в качестве и прочностных свойствах строительных конструкций и элементов зданий. Эти различия, имеющие случайный характер, будут приводить к тому [111], что всегда из общего числа зданий данного типа некоторая часть будет иметь повышенную (или пониженную), по сравнению со средней, сейсмическую устойчивость. Поэтому выводы, базирующиеся на инструментальных исследованиях сейсмоки эффекта взрывов, должны обязательно носить статистический характер и учитывать влияние всех действующих факторов.

Таблица 1.1

Степень воздействия сейсмических волн от взрывов на здания и сооружения по литературным данным

NN пп	Авторы или организации	Скорость колебаний, см/с	Степень сейсмического воздействия на здания и сооружения
1	Медведев (1964) [82]	1.5-3 <sup>1)</sup> 3-6 <sup>2)</sup>	1) Допустимая величина для зданий, имеющих деформации. 2) Допустимая величина для зданий, имеющих удовлетворительное состояние.
2	Кутузов (1988) [75]	1-3 <sup>1)</sup> 3-6 <sup>2)</sup>	1) Для жилых и общественных зданий всех типов. 2) Для административно-бытовых и промышленных зданий.
3	Миронов (1973) [90]	1.5-3	Осыпание побелки, легкие повреждение отдельных зданий.
4	Садовский (1946) [112]	12-14	Появление трещин в стенах
5	ПЗУ «Союзвзрывпром»	2-3	Допустимая величина для удаленных взрывов
6	Баркан (1946) [15]	5	Допустимые величины
7	Горное бюро США (Барон, 1989) [16]	5	Максимально допустимая скорость смещения для жилых зданий
8	Тинслен, Инд (1962) [119]	7	Нет заметных трещин

Для характеристики сейсмических воздействий взрывов можно также применить подходы, разработанные в сейсмологии при изучении землетрясений и базирующиеся на 12-балльной шкале интенсивности сотрясений MSK-64 или более позднем варианте шкалы – ШСИ-2017. Обобщая приведенные в работах [11, 45, 82] данные, можно составить следующую таблицу для оценки интенсивности сейсмических воздействий (таблица 1.2).

## Шкала интенсивности сейсмических воздействий (ШСИ-17)

Баллы	Скорость колебаний почвы $V$ , см/с	Ускорение колебаний почвы $A$ , см/с <sup>2</sup>	Характеристика колебаний и последствий
1	0.017	0.44	Колебания почвы фиксируются только высокочувствительными приборами
2	0.050	1.1	Колебания ощущаются отдельными людьми, находящимися в спокойном состоянии
3	0.15	2.8	Колебания отмечают немногими людьми
4	0.44	7.0	Колебание отмечается многими людьми, возможно колебание дверей, дребезжание стекол
5	0.75	11	Качение висячих предметов, спящие просыпаются, осыпание побелки
6	3.8	44	Легкие повреждения в зданиях, тонкие трещины в штукатурке, в печках
7	11	110	Повреждения в зданиях, тонкие трещины в штукатурке и откалывание отдельных кусков
8	33	280	Разрушение в зданиях: большие трещины в стенах, падение карнизов, дымовых труб
9	98	700	Значительные разрушения, в некоторых зданиях обвалы: обрушение стен, перекрытий, кровли
9.5 и больше	>170	>1100	Обвалы во многих зданиях

Приведенные в таблице значения скоростей и ускорений можно рассматривать в качестве наиболее жестких нормативов для оценки сейсмического воздействия взрывов. Это связано с тем, что воздействия колебаний грунта от взрыва на здания и сооружения кратковременны и исчисляются десятими долями и первыми секундами, тогда как при землетрясениях колебания грунтов с высокой интенсивностью могут продолжаться 10-15 секунд и более. Максимальная интенсивность колебаний грунта при взрывах приходится обычно на 2-4 цикла колебаний [90]. При таких

условиях сооружения, вовлеченные в колебательное движение, даже при совпадении частот вынужденных колебаний грунта и своих собственных колебаний, не успевают получить полного эффекта условий резонанса. Тем самым, при воздействии колебаний грунта от взрывов здания раскачиваются (и, соответственно, повреждаются) в значительно меньшей степени, чем от действия землетрясений [82, 90]. Таким образом, сейсмический эффект взрыва будет вызывать значительно меньшее воздействие на конструкцию (и соответственно повреждения), чем схожий по амплитуде сейсмический эффект землетрясения.

Внедренный в пятидесятых годах способ короткозамедленного взрывания (КЗВ) позволил весьма эффективно снизить интенсивность сейсмического «излучения» до безопасного уровня [124] и осуществить переход к многорядному взрыванию [76]. Короткозамедленным называется последовательное взрывание серий или отдельных зарядов с интервалами в десятые и сотые доли секунды [75]. Использование КЗВ в горнодобывающей промышленности позволило существенно увеличить размеры обрабатываемых за раз блоков, а также значительно улучшить степень дробления пород.

Исследования 50-80-х годов XX века были посвящены изучению следующих вопросов:

- эффективность короткозамедленного взрывания [43, 83, 148];
- влияние сейсмического воздействия взрывов на здания и другие охраняемые объекты (откосы карьеров, подземные выработки, гидротехнические сооружения) [65, 90, 91, 145];
- уточнение критериев сейсмической опасности [82, 124, 154];
- исследования в ближней зоне взрыва, в том числе изучение влияния геометрии поля зарядов [12, 124];
- использование методов математической статистики при интерпретации сейсмических данных [18, 56, 139, 150];
- исследованию физики взрыва [74, 88, 90];
- изучение действия сейсмических волн на окружающую среду [17, 124];
- разработка средств защиты [17, 71];
- совершенствованию сейсмической аппаратуры и методики наблюдений [114, 124].

Большой объем экспериментальных и теоретических работ [11, 144, 91, 93] был посвящен определению доли энергии взрыва, которая трансформируется в энергию излучаемых сейсмических волн (сейсмический КПД взрыва), при этом получена средняя величина сейсмического КПД - около 1-2%. Несколько иные оценки приведены в работах [51, 80], где отмечается, что на дробление расходуется не более 15% энергии взрыва, остальная часть энергии расходуется на сейсмические колебания, образование ударных воздушных волн и прочее.

Масштабные систематические исследования были связаны с изучением механизма разрушения горных пород взрывом [91, 101, 122 и др.], а также с разработкой методов регулирования степени дробления горных пород в зависимости от диаметра заряда, расхода и типа ВВ, сетки инициирования [67, 89, 108 и др.]. Важным в историческом плане этапом развития сейсмологии взрывов относят период с 60-х годов, когда возникла необходимость обеспечения сейсмической безопасности при проведении подземных *ядерных взрывов*, в том числе и при использовании их в мирных целях. Для решения этой проблемы в нашей стране и за рубежом был проведен большой объем инструментальных наблюдений, особенно в ближней области взрыва, где сейсмические колебания носят разрушительный характер. В результате работ [5, 14, 111] были установлены основные закономерности распространения сейсмических волн на различных расстояниях от места взрыва. Необходимость контроля проведения ядерных испытаний, возникшая в конце 70-х годов после принятия Договора о запрещении испытаний ядерного оружия в атмосфере, космическом пространстве и под водой, поставила перед сейсмологами новые задачи: обнаружение сигналов от взрыва и их идентификация по отношению к землетрясениям. С целью решения этих задач были размещены многочисленные сейсмические станции, которые со временем образовали межнациональные сейсмологические сети. Оснащение сейсмологических сетей новой цифровой аппаратурой и их автоматизация интенсивно продолжаются. Решение проблемы обнаружения ядерных испытаний также потребовало разработки единого подхода к изучению сейсмического действия взрывов и землетрясений, что привело к тождественности методологий изучения этих сейсмических событий и существенно сблизило сейсмологию и сейсмику взрывов.



### *1.1.1. Короткозамедленное взрывание. Системы инициирования*

Интервал замедления при короткозамедленных взрывах является одним из важнейших факторов, влияющих на сейсмический эффект. Собственно, идея короткозамедленного взрывания вытекает, в том числе, и из необходимости снизить сейсмический эффект за счет исключения синфазного наложения волн от разных зарядов. Существенное снижение сейсмического эффекта происходит при замедлениях более 20 мс. При меньших интервалах замедления подрыв зарядов можно считать одновременным, что на практике означает рост массы инициируемого ВВ и увеличение сейсмического эффекта. Для управления временем замедления в последние десятилетия стали применять системы инициирования (СИ) без использования электрического тока. Это отечественные СИ ИСКРА (СИНВ), КОРШУН, ЭДИЛИН, иностранные – Nonel, Primadet, Orica [127, 169]. Принципиальное отличие этих систем в том, что через поверхностную сеть посредством взрывного импульса (а не электрического тока) передается сигнал скважинному детонатору. Это позволяет посредством изменения параметров поверхностной сети и скважинных детонаторов регулировать интервалы замедлений в широком диапазоне. По отношению к сейсмическому действию взрыва использование неэлектрических СИ имеет существенный недостаток – отклонение фактического времени замедления от номинального (паспортного). Этот аспект сильно затрудняет реализацию прогноза уровня сейсмического воздействия и отмечается многими современными исследователями в этой области [53, 85, 127, 171].

### *1.1.2. Управление действием взрыва при распространении сейсмических волн*

Существенное внимание исследователей уделяется снижению уровня сейсмического воздействия за счет применения специальных экранов. Как следует из работ В.Н. Мосинца и ряда других исследователей [40, 164], применение волногасящих экранов разнообразной формы является эффективным средством защиты охраняемых зданий и сооружений. В труде [91] указано, что ослабление интенсивности сейсмических колебаний при экранировании волн происходит как вследствие их отражения от внутренней

границы экрана, так и вследствие интенсивного затухания колебаний в самой экранирующей полости. Эти экраны могут быть заполнены менее плотной породой или быть полыми. В работе [71] отмечается, что интересным с точки зрения практичности является применение простейших экранов - траншей и/или подземных выработок, при этом волногасящие свойства экрана зависят от геометрии и размеров самого экрана, а также от природы и характеристик падающих на него волн. Также интересным с точки зрения исследования уровня сейсмического воздействия является изучение экранирующей способности природных нарушений (трещин и пр.). Исследовательская работа коллектива авторов [19] посвящена изучению влияния ширины трещин и материала заполнителя на характер распространения и параметры волн напряжений в трещиноватой среде.

Однако данные, полученные в основном экспериментальным путем в конкретных горно-геологических условиях и при принятой технологии буровзрывных работ, имеют сугубо частное применение и не всегда могут быть использованы в других условиях.

Использование экранов для реализации сейсмобезопасных условий выполнения взрывных работ возможно при отсутствии в геологическом разрезе слоя горных пород, служащего волноводом сейсмических волн, распространяющихся по такому каналу практически без потерь. При производстве взрыва на одном конце такого волновода, расположенного, например, в карьере, на другом его конце, выходящем в жилой район города или под промышленные объекты, возможно более существенное сейсмическое действие взрыва, чем в породах, вмещающих волновод. В работе [48] приведен пример, когда при работах по регистрации сейсмических колебаний от массовых взрывов на угольном разрезе Томусинский наблюдалось превышение предельных нагрузок за счет локальных аномалий, которые могли быть обусловлены наличием волновода. Увеличение сейсмического действия взрыва зависит также и от самих условий взрывания: при длине сейсмической волны, не соизмеримой с параметрами волновода, его влияние может и не проявиться. В то же время для случайной реализации взрыва конкретного заряда ВВ при длине волны, соизмеримой с мощностью волновода, сейсмическое действие взрыва

может привести к серьезным нарушениям зданий, сооружений и других объектов, попадающих в сферу его воздействия [91].

### *1.1.3. Грунтовые условия. Резонансные (спектральные) характеристики грунтов*

В поисках и анализе факторов, влияющих на уровень сейсмического воздействия у основания охраняемых сооружений, многие авторы [56, 90, 128 и др.] большое внимание уделяют *грунтовым условиям*. Влияние данного фактора обусловлено различием в физическо-механических характеристик среды в основании охраняемых зданий и сооружений, проявляющихся в избирательности к ослаблению или усилению сейсмических волн на определенных частотах. В мировой практике сейсмологических исследований это явление известно как «site effect» [64, 131, 135, 140, 149].

В работе [43] описывается землетрясение Лома-Приета в Калифорнии (1989 г.) с  $M=7.1$ , когда больше всего пострадала часть г. Сан-Франциско, расположенная на глинистых отложениях. При этом сейсмограммы землетрясения показали, что по сравнению с другими участками, амплитуды сейсмических колебаний на этих грунтах были увеличены в 6-10 раз на частоте около 1 Гц, и в 2-3 раза на частотах 3-5 Гц.

Необходимо отметить, что исследования грунтовых условий (или резонансных характеристик грунтов) в том или ином виде выполняются не только в рамках работ по оценке сейсмического эффекта взрывов и определению сейсмически безопасного расстояния буровзрывных работ. Грунтовые условия (или резонансные характеристики грунтов) являются объектом изучения такого раздела инженерной сейсмологии, как сейсмическое микрорайонирование (СМР). Результаты СМР позволяют скорректировать необходимый фрагмент карты общего сейсмического районирования за счет введения поправочных коэффициентов (приращение интенсивности). При этом сейсмические инструментальные наблюдения базируются на регистрации региональных и локальных землетрясений малых энергий и взрывов. При микрорайонировании участков, для которых сложно получить кондиционные записи землетрясений и взрывов, обычно привлекают методы, использующие микросейсмические шумы

различной природы. В настоящее время, помимо исследования грунтовых условий стандартными способами сейсмического микрорайонирования [105], возможно применение современных и более продуктивных способов, таких как способ Накамуры [155] или современные способы аналитического расчета спектральных характеристик грунтов [10, 143, 152]. Необходимо отметить, что в основе “традиционной” сейсмологии лежит ряд понятий и предположений, связанных с линейной зависимостью напряжений (и деформаций) от времени. В работе [7] отмечается, что понятия, лежащие в основе методики сейсмического микрорайонирования, характеризуют свойства сейсмических воздействий с достаточно большой погрешностью. В действительности нелинейные эффекты очень значительны и разнообразны. В работе [64] обоснована важность учета нелинейных сейсмических свойств грунтов, а также описаны передовые способы определения частотных характеристик грунтовых комплексов. Многими авторами также отмечена перспективность развития неразрушающих методов по изучению физико-механических характеристик верхней части разреза.

#### *1.1.4. Резонансные характеристики инженерных сооружений*

Важным аспектом в области охраны инженерных сооружений, является совместное изучение частотного состава проходящих сейсмических волн от взрыва и *собственных частот охраняемых объектов*. Необходимость изучения динамических характеристик и конструктивных особенностей зданий и сооружений была вызвана тем, что нарушения происходили и продолжают происходить при относительно небольших скоростях колебаний грунта. Например, в труде [17] приведен пример, когда от многократного воздействия взрывов в кирпичных жилых домах возникали нарушения, дымовые трубы обрушались при скорости колебаний грунта 3-4 см/с.

Это происходило вследствие совпадения периодов собственных колебаний домов (0.18 с) и образования при взрывах вынуждающих сейсмических колебаний (0.15-0.25 с), что позволило сделать вывод об опасности резонансных эффектов (дополнительная "раскачка" инженерных сооружений). Другим, более печальным, примером является разрушительное действие землетрясения в Мехико в 1985 г., сила которого была увеличена совпадением частоты

пришедшей сейсмической волны с собственными частотами 15-25-этажных зданий, имеющими частоту около 0.5 Гц. Необходимость учета влияния резонансных явлений в охраняемых зданиях подчеркнута также многими другими исследователями [47, 52, 70, 171].

## 1.2. Критерии сейсмической опасности взрывных работ

Еще в 40-х годах XX века академиком М.А. Садовским выполнен поиск подходящего *критерия сейсмической опасности взрывов*. Выполненное им сопоставление сейсмических разрушений при взрывах с величинами амплитуд, скоростей и ускорений колебаний грунтов, показало наличие прямой связи между величиной скорости колебаний и разрушениями. Таким образом, в отличие от амплитуд смещений и ускорений, степень повреждения зданий наилучшим образом коррелирует с максимальной скоростью смещения дневной поверхности грунта [110]. Дальнейшие работы [72, 98] показывают, что амплитуда и ускорение в значительной мере зависят от частотного состава сейсмических волн и откликаются даже на небольшие изменения в среде на пути распространения сейсмических волн: трещины и другие нарушения, изменения плотности и т.п. Анализ частотного состава регистрируемого волнового поля на разных расстояниях от места проведения взрыва позволил выделить предварительную (объемные волны) и главную (в основном поверхностные волны релеевского типа) фазы. Позднее, при глубоком анализе регистрируемой волновой картины на различных расстояниях от промышленных взрывов, многими исследователями [17, 51, 124] выделены ближняя (зона упруго-пластичных деформаций) и дальняя (упругих колебаний) зоны, причем отдельные исследователи дополнительно выделяют среднюю (переходную) зону [90]. В работе [124] подчеркивают, что интерес к сейсмике ближней зоны возникает, прежде всего, при взрывах в стесненных условиях, когда охраняемые объекты примыкают к местам проведения взрывов. В работе [90] продемонстрировано, что поверхностная волна, имеющая большое значение в дальней зоне, имеет самое маленькое геометрическое расхождение по сравнению с объемными волнами, поэтому на средних и далеких расстояниях она

значительно интенсивнее других волн.

Способы расчета радиусов зон действия взрыва и источников сейсмических колебаний относительно массы заряда ВВ ( $Q$ ) и упругих параметров среды ( $C_p$ ,  $C_s$  – скорости распространения продольных и поперечных волн, м/с) предложены В.М. Мосинцем. Радиус зоны дробления описывается выражением:

$$R_{др} = \sqrt{\frac{C_s}{C_p}} \sqrt[3]{Q}, \text{ м.} \quad (1.3)$$

Радиус зоны трещинообразования:

$$R_{тр} = \sqrt{\frac{C_p}{C_s}} \sqrt[3]{Q}, \text{ м.} \quad (1.4)$$

Радиус зоны наибольших сдвиговых деформаций:

$$R_{сд} = \frac{\sqrt{C_s}}{10} \sqrt[3]{Q}, \text{ м.} \quad (1.5)$$

Радиус упругой зоны, за пределами которой исключено формирование остаточных деформаций среды:

$$R_{уп} = \frac{\sqrt{C_p}}{10} \sqrt[3]{Q}, \text{ м.} \quad (1.6)$$

Также Садовским М.А. обнаружено, что закон затухания амплитуды скорости смещения с расстоянием слабо зависит от условий взрыва и свойств среды. Этот вывод способствовал распространению разработанной им же методики прогноза сейсмического действия взрыва. Методика прогноза опиралась на опыт проведения промышленных взрывов по технологии того времени (середина XX века), поэтому диапазон изменения энергии взрывов был невелик. Позднее проведенные экспериментальные исследования выявили сложный характер формирования сейсмических волн, зависящий от условий взрывания. Исследования сейсмичности взрывов, начатые М.А. Садовским и С.В. Медведевым, получили развитие в работах В.В. Адушкина, Я.И. Цейтлина, Н.И. Смолия и др. Полученное и используемое многими исследователями уравнение, характеризующие убывание амплитуды сейсмической волны с расстоянием от источника возбуждения, имеет вид:

$$V = a \cdot R_{пв}^{-b}, \quad (1.7)$$

где  $a$  и  $b$  – эмпирические коэффициенты. Коэффициент  $a$  обычно называют коэффициентом пропорциональности (или коэффициентом сейсмичности), а

коэффициент  $b$  определяет затухание (скорость убывания амплитуды с расстоянием). В разных работах [90, 91, 120] различные значения величин этих коэффициентов связывают с изменчивостью свойств пород, но в работе [95] демонстрируется связь интенсивности сейсмического воздействия с характером поглощения и распространения сейсмических волн в ближней зоне (упруго-пластичных деформаций). Анализ, проведенный Горным бюро США, показал, что значения величины сейсмического воздействия при одинаковых расстояниях в разных породах могут изменяться в несколько раз. Также отметим, что некоторыми исследователями используются выражения, отличные от (1.7) [134].

Сейсмические волны при распространении могут образовывать довольно сложную интерференционную картину, что приводит к значительным колебаниям их амплитуды с расстоянием. В работе [17] также отмечается существенная связь коэффициента пропорциональности  $a$  с объемной концентрацией энергии в заряде, а показателя затухания  $b$  – со степенью и качеством дробления. Несмотря на это, до сих пор в некоторых работах [2, 73, 109, 116, 124] используются фиксированные значения того или иного коэффициента. Более того, многочисленные результаты замеров скорости колебаний от взрывов анализируются из предположения, что показатель затухания  $b$  постоянен, т.е. изменение скорости смещений происходит монотонно и непрерывно. Однако, как показывают результаты долгосрочных измерений, выполненные при участии автора на одних и тех же объектах, многообразие факторов обуславливает существенную вариацию величины коэффициента  $b$  даже в схожих, на первый взгляд, условиях. В ходе этих же работ было показано, что корректный прогноз интенсивности сейсмического воздействия невозможен без точного определения величины коэффициентов  $a$  и  $b$  в конкретных геологических и горнотехнических условиях.

### *1.2.1. Определение максимального модуля вектора массовой скорости смещения*

В одной из последних крупных работ советского периода [124] отмечается, что векторная скорость характеризует поверхностную плотность сейсмической энергии, которая в меньшей степени изменяется в зависимости от свойств среды,

чем другие параметры (ускорения, смещения).

Таким образом, энергия представляется интегральным и в то же время консервативным параметром движения. В практике инженерной сейсмологии для оценки модуля векторной скорости (а точнее – максимального модуля вектора массовой скорости смещения) традиционно используется следующая формула:

$$V_{\Sigma} = \sqrt{V_X^2 + V_Y^2 + V_Z^2}, \quad (1.8)$$

где  $V_X$ ,  $V_Y$  и  $V_Z$  – максимальные скорости колебания грунта по трем ортогональным направлениям. Определенным недостатком данного расчета является то, что максимальные значения скоростей достигаются у разных компонент не одновременно, и полученные значения  $V_{\Sigma}$  будут несколько завышены. Причина этого кроется в том, что рассматриваемый подход был разработан достаточно давно и отражает сложности, связанные с обработкой аналоговых сейсмических записей. Использование современных цифровых сейсмических станций и компьютерной обработки сейсмограмм позволяет избавиться от этого недостатка. При обработке цифровых сейсмограмм формула 1.8 приобретает другой смысл:  $V_{\Sigma}$  является модулем максимальной мгновенной векторной скорости колебаний, а  $V_X$ ,  $V_Y$  и  $V_Z$  – скорости колебаний грунта по трем ортогональным направлениям, измеренные в один и тот же момент времени. Максимальное значение определяется после расчета всех мгновенных значений на заданном интервале сейсмограммы.

### **1.3. Нормативные документы в области сейсмической безопасности**

#### *1.3.1. Стандартизация измерений вибрации и оценки ее воздействия на строительные конструкции*

Вопрос выбора критерия повреждаемости охраняемых зданий и сооружений вновь возник с введением в действие ГОСТа Р 52892-2007 (Вибрация и удар. Измерение вибрации и оценка ее воздействия на конструкцию), который носит рекомендательный характер и устанавливает методы измерения вибраций (в том числе и от сейсмических воздействий) и



оценки ее воздействия на конструкцию зданий. В приложении к данному стандарту приведены безопасные уровни вибраций, наиболее часто используемые в международной практике, но нет четкого критерия определения допустимых скоростей для разных типов сооружений. Более того, в разных зарубежных нормативных документах предельно допустимые уровни сейсмических воздействий существенно отличаются. Предельно допустимой скоростью смещения грунта ( $V_{доп}$ ) в основании охраняемых зданий и сооружений принято называть скорость, при которой их сохранение полностью гарантировано, а локальные деформации не повлияют на сохранение прочностных свойств несущих конструкций. Согласно приведенному в ГОСТ Р 52892-2007 комплексному критерию оценки, предельно допустимое значение скорости  $V_{доп}$  при кратковременной вибрации определяют для вертикальной составляющей пикового значения скорости по формуле:

$$V_{доп} = V_0 F_g F_b F_d F_k, \text{ мм/с}, \quad (1.9)$$

где  $V_0$  – опорное значение скорости равное 20 мм/с;  $F_g$  – поправка на вид грунта в месте, где установлено сооружение;  $F_b$  – поправка на вид сооружения;  $F_d$  – поправка на расстояние между источником вибрации и местом ее измерения;  $F_k$  – поправка на вид источника вибрации (имеет значение от 0.8 до 1). Значения коэффициентов выбираются в соответствии с представленными в ГОСТ таблицами. Величина поправки на вид грунта  $F_g$  изменяется от 0.5 (очень мягкий грунт, мягкая глина) до 3.5 (плотные ненарушенные породы). Поправка на вид сооружения  $F_b$  принимает значение от 0.2625 до 2.04 и зависит от типа и конструкции сооружения, от материала, из которого оно возведено, и типа фундамента. Величина поправки на расстояние  $F_d$  является функцией наименьшего расстояния от источника вибрации до сооружения.

В указанном ГОСТе описаны два основных подхода к выбору места измерения сейсмического эффекта взрывов. Несмотря на то, что в России принято измерять уровень вибрации вблизи основания охраняемого инженерного сооружения, ГОСТ предписывает выбирать точки измерения непосредственно на конструкции. Часть рекомендуемых параметров колебаний являются частотно-зависимыми, т.е. предельно допустимая скорость колебаний земной поверхности (или фундамента на уровне земной поверхности) зависит от

доминирующей частоты колебаний [98]. Также необходимо подчеркнуть, что оценка сейсмических воздействий на здания и сооружения в соответствии с указанным документом базируется на риске появления поврежденных конструкций, способных снизить их эксплуатационную надежность, и предназначена для зданий, рассчитанных на статические нагрузки без предъявления специальных требований в отношении сопротивления к действию динамических сил. Работа группы авторов [98] позволила получить новое статистическое подтверждение о предпочтительности использования максимальной скорости колебаний в качестве критерия сейсмической опасности при промышленных взрывах в сравнении с максимальными ускорениями и смещениями земной поверхности.

### *1.3.2. Нормативное регулирование в области безопасного проведения взрывных работ*

Предложения М.А. Садовского были учтены в соответствующих параграфах Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения», зарегистрированными в Минюсте России 25 декабря 2020 г. № 61824 – основного нормативного документа, который используется при проектировании и выполнении БВР непосредственно в горнодобывающей промышленности. Согласно этому документу, во избежание повреждений зданий и сооружений, расстояния от них до места взрыва не должны быть меньше сейсмически безопасных расстояний  $r_c$  (радиусов сейсмически опасных зон). Стоит отметить, что пункты данных правил, относящиеся к расчету сейсмически безопасных расстояний, за последние годы не претерпели принципиальных изменений, и включают расчет безопасных расстояний для:

- однократного взрыва сосредоточенного заряда;
- одновременного (без замедления) взрывания группы зарядов;
- неодновременного (время замедления между взрывами каждого заряда не менее 20 мс) взрывания группы зарядов.

Расстояния, на которых колебания грунта, вызываемые однократным

взрывом сосредоточенного заряда взрывчатых веществ, становятся безопасными для зданий и сооружений, определяются по формуле:

$$r_c = K_r K_c \alpha Q^{1/3}, \quad (1.10)$$

где  $K_r$  – коэффициент, зависящий от свойств грунта в основании охраняемого здания (сооружения);  $K_c$  – коэффициент, зависящий от типа здания (сооружения) и характера застройки;  $\alpha$  – коэффициент, зависящий от условий взрывания,  $Q$  – масса заряда (кг).

При одновременном (без замедления) взрывании группы из  $N$  зарядов взрывчатых веществ общей массой  $Q_\Sigma$  в тех случаях, когда расстояние от охраняемого объекта до ближайшего заряда и до наиболее удаленного заряда различаются не более чем на 20%,  $r_c$  может быть рассчитывается по формуле:

$$r_c = K_r K_c \alpha N^{1/6} Q_\Sigma^{1/3}. \quad (1.11)$$

В большинстве случаев практическое значение имеет оценка сейсмического эффекта от короткозамедленного взрыва и неодновременного взрывания группы зарядов. При неодновременном взрывании  $N$  зарядов взрывчатых веществ общей массой  $Q_\Sigma$  со временем замедления между взрывами каждого заряда не менее 20 мс сейсмически безопасное расстояние  $r_c$  может быть рассчитано по формуле:

$$r_c = K_r K_c \alpha N^{-1/4} Q_\Sigma^{1/3}. \quad (1.12)$$

Здесь и ранее в (1.10) и (1.11) коэффициент  $K_r$ , зависящий от свойств грунта в основании охраняемого здания (сооружения), может принимать значения от 5 для скальных до 20 для водонасыщенных грунтов; коэффициент  $K_c$ , зависящий от типа здания (сооружения) и характера застройки, изменяется в диапазоне от 1 для железобетонных промышленных сооружений до 2 для зданий небольших поселков; коэффициент  $\alpha$ , зависящий от условий взрывания, принимает значения от 0.5 для полуглубленных зарядов до 1 для камуфлетного взрыва, при этом при размещении заряда в воде или водонасыщенных грунтах значения коэффициента  $\alpha$  следует увеличивать в 1.5 - 2 раза. Как и в ГОСТ Р 52892-2007, значения коэффициентов выбираются в соответствии с приведенными в ФНП таблицами. Многообразие сооружений на охраняемой территории не всегда позволяет правильно отнести их к какой-либо категории, предложенной в ФНП и корректно установить величину сейсмически безопасного расстояния.

Результаты многолетних экспериментальных исследований взрывов, позволившие получить величины допустимых скоростей в основании различных типов сооружений (в зависимости от их классов и рангов), легли в основу «Руководства по анализу опасности аварийных взрывов и определению параметров их механического действия» (РБ Г-05-039-96). Величина предельно допустимой скорости колебания грунта в основании сооружения, согласно данному документу, определяется с учетом разделения объектов по их классу и суммарному рангу. Методика расчета этих параметров приведена далее.

Класс сооружения определяется степенью его важности, определяемой в соответствии с таблицей 1.3.

Таблица 1.3

Класс	Характеристика объекта
1	Все здания и сооружения объектов использования атомной энергии, важные для безопасности, при оценке воздействия сейсмозврывных волн от аварийных взрывов
2	Объекты промышленного назначения большой важности, а также гражданские здания с большим скоплением людей
3	Объекты, аналогичные объектам второго класса, но меньших размеров в плане и меньшей этажности
4	Здания гражданского и промышленного строительства, нарушения в которых не угрожают жизни и здоровью людей или повреждению установленного оборудования

Суммарный ранг объекта ( $P$ ) определяется суммой четырёх частных рангов:

$$P = P_C + P_M + P_T + P_Y, \quad (1.13)$$

Значения ранга объекта, характеризующего состояние сооружения -  $P_C$ , определяется в соответствии с таблицей 1.4. Материал стен или заполнителя дает значение ранга  $P_M$  (таблица 1.5).

Ранг  $P_T$ , характеризующий тип зданий, имеет два значения: для зданий каркасного типа  $P_T = 0$ , для зданий с несущими стенами  $P_T = 1$ . Величина  $P_Y$  – ранг, зависящий от наличия антисейсмических усилений. Для зданий, не имеющих антисейсмических усилений,  $P_Y = 1$ . Для зданий с антисейсмическими усиленими, рассчитанными на колебания от семибалльного землетрясения,  $P_Y = 0$ . При антисейсмических усиленими, рассчитанных на более высокую

балльность, для каждого последующего балла вычитается единица. В таблице 1.6 приведены значения (в см/с) величины предельно допустимой скорости смещений сооружений различных классов и суммарных рангов.

Таблица 1.4

Характеристика состояния сооружения	$P_c$
Качество строительных работ хорошее. Отсутствуют каких-либо нарушений и остаточные деформации	0
В стенах или заполнителе имеются небольшие трещины	1
Имеются значительные трещины в стенах, заполнителе или каркасе	2
Имеются трещины в стенах и в каркасе	3

Таблица 1.5

Материал стен и заполнителя	$P_M$
Дерево	0
Камень, кирпич, легкие панели	1
Крупные панели	2
Крупные блоки	3

Таблица 1.6

Предельно допустимые скорости смещений для зданий и сооружений

Класс сооружения	Допустимые скорости смещений (см/с) при суммарном ранге $P$										
	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	12.2	7.39	4.48	2.72	1.65	1.00	0.61	0.37	0.22	0.14	0.01
2	20.1	12.2	7.39	4.48	2.72	1.65	1.00	0.61	0.37	0.22	0.14
3	33.1	20.1	12.2	7.39	4.48	2.72	1.65	1.00	0.61	0.37	0.22
4	54.6	33.1	20.1	12.2	7.39	4.48	2.72	1.65	1.00	0.61	0.37

Хотя данное руководство и предназначено для выполнения инженерных оценок опасности аварийных взрывов на потенциально опасных объектах, но это единственный в РФ действующий нормативный документ на данный момент, в котором имеются величины допустимых скоростей для различных сооружений.

#### 1.4. Нормативные способы учета влияния грунтовых условий

В нормативной литературе стоит выделить три документа, которые позволяют установить характер влияния грунтов на сейсмический эффект:

- Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения» [121];
- ГОСТ Р 52892-2007 (Вибрация и удар. Измерение вибрации и оценка ее воздействия на конструкцию) [44];
- СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах» [117].

Влияние физико-механических характеристик грунтов на величину сейсмического воздействия в ФНП выражено посредством безопасного расстояния. Здесь учет грунтов реализован в виде поправочного коэффициента  $K_r$  (формулы 1.10-1.12), зависящего от свойств грунта в основании охраняемого здания (сооружения). Грунты условно разделены на 5 групп, при этом величина коэффициента варьируется от 5 (скальные породы плотные, ненарушенные) до 20 (водонасыщенные грунты) (таблица 1.7).

Таблица 1.7

Поправка на вид грунта  $K_r$  (ФНП)

	<b>Значение коэффициента <math>K_r</math></b>
Скальные породы плотные, ненарушенные	5
Скальные породы, нарушенные, неглубокий слой мягких грунтов на скальном основании	8
Необводненные песчаные и глинистые грунты глубиной более 10 м	12
Почвенные обводненные грунты и грунты с высоким уровнем грунтовых вод	15
Водонасыщенные грунты	20
Примечание: в тех случаях, когда характеристика грунта не в полной мере соответствует приведенной выше или известна ориентировочно, следует принимать для расчета ближайшее большее значение коэффициента $K_r$	

С увеличением коэффициента  $K_r$ , величина сейсмически безопасного расстояния  $r_c$  увеличивается. Таким образом, согласно ФНП, в зависимости от типа грунта, расчетные сейсмически безопасные расстояния, а, следовательно, и связанные с ними уровни сейсмического воздействия, могут изменяться до 4 раз. Однако, как показывает опыт практических наблюдений, несмотря на схожий литологический состав в разных точках охраняемой территории, реакция грунтов может значительно изменяться. Это, в конечном счете, приводит к усилению/ослаблению колебаний при оказываемом сейсмическом воздействии. Более того, резонансные особенности грунтов (изменение амплитуды колебаний на определенной частоте) в ФНП не учитываются.

Учет влияния грунтовых условий в ГОСТ Р 52892-2007 выполнен в виде интегрального поправочного коэффициента в формуле (1.9). Величина поправки на вид грунта в месте, где установлено сооружение  $F_g$  изменяется от 0.5 до 3.5 (таблица 1.8). С увеличением коэффициента  $F_g$ , величина предельно допустимой скорости  $V_{дон}$  также возрастает. Таким образом, предельно допустимые вибрации для разных типов грунтов при постоянных прочих условиях могут меняться до 7 раз. В отличие от ФНП «Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения», в ГОСТ Р 52892-2007 приведены также параметры колебаний, зависящие от доминирующей частоты колебаний. То есть, в ГОСТе имеются упрощенные частотно-зависимые оценки, не учитывающие резонансы на второстепенных гармониках.

Согласно СП 14.13330.2018, породы по своим сейсмическим свойствам строго классифицированы на три категории. Первая категория пород объединяет грунты с самыми лучшими сейсмическими характеристиками, оказывающими минимальное влияние на сейсмический эффект. Грунты II категории занимают промежуточное положение в принятой классификации и относятся к средним и самым распространенным грунтам. Самые худшие в сейсмическом отношении грунты отнесены к III и IV категориям, на них приходящие сейсмические колебания испытывают максимальные искажения и усиления. Таким образом, в зависимости от местных локальных грунтовых условий уровень сейсмического воздействия возможных сотрясений может быть скорректирован на  $\pm 1-2$  балла

по шкале MSK-64, что соответствует диапазону изменения скоростей колебаний грунта примерно до 8 раз.

Таблица 1.8

Поправка на вид грунта  $F_g$  (ГОСТ Р 52892-2007)

Общая классификация	Вид грунта	$F_g$
Обычный грунт	Очень мягкий грунт, мягкая глина	0.5*
	Глина, илистый грунт с высоким содержанием влаги	0.8
	Песок, гравий, илистый грунт	1.0
	Твердая валунная глина, уплотненная закладка из щебня	1.8
Скальная порода	Тонкая выровненная стяжка	2.5
	Сланец, мягкий известняк, щелеватая порода (скорость распространения сейсмических волн от 2 до 4 км/с)	2.5
	Гранит, гнейс, твердый известняк, кварцит, диабаз (скорость распространения сейсмических волн более 4 км/с)	3.5
* Коэффициент 0.5 – усредненное значение, требующее уточнения в каждом конкретном случае		

### 1.5. Выводы и постановка задач исследований

Обзор отечественной и зарубежной литературы показал актуальность проблем, связанных с обеспечением сейсмической безопасности промышленных взрывов, и позволил сделать следующие выводы:

1. Расширение фронтов горных работ, увеличение мощности промышленных взрывов и усложнение технологии их выполнения привели к возникновению потребности детализации общей картины действия взрывов, более четкого определения степени влияния отдельных факторов в конкретных условиях взрывных работ.

2. Информация о качестве работы СИ, полученная в ходе инструментальных наблюдений, позволяет дать оценку точности работы СИ и учесть эту информацию при построении модели влияния параметров БВР на сейсмический эффект.



3. Эффективность и целесообразность использования специальных экранов, ограничена динамично меняющейся горнотехнической обстановкой, а также тем фактом, что длина распространяющихся от взрывов волн может быть существенно больше линейных размеров самих экранов.

4. Для защиты инженерных сооружений при сейсмическом воздействии взрывных работ необходимо комплексное изучение частотных особенностей приходящей сейсмической волны, грунтов и самих сооружений. Этот аспект связан с тем, что в случае совпадения частот резонансов сооружения с отдельными резонансами грунтов и/или самой сейсмической волны от взрыва, возможен эффект дополнительного усиления сейсмического воздействия, что может спровоцировать ускоренный износ здания.

Также необходимо отметить, что современный уровень сейсмологических наблюдений позволяет получать из данных большой объем информации высокого качества. При этом основным статистически устойчивым критерием сейсмической опасности промышленных взрывов является максимальная мгновенная скорость смещения (максимальный модуль вектора) грунта в основании охраняемого объекта. Расширение фронтов горных работ в сторону охраняемых зданий и сооружений, рост мощности промышленных взрывов и другие обстоятельства приводят к росту негативного воздействия взрывных работ. Таким образом, для обеспечения сейсмической безопасности при сохранении максимальных темпов разработки месторождений необходима достоверная оценка и корректный прогноз уровня сейсмического воздействия проводимых взрывов. Это, в свою очередь, возможно только на основе прямых инструментальных измерений сейсмического воздействия взрывов на конкретном горнодобывающем объекте с детальным анализом совокупности геологических и горнотехнических условий (факторов), влияющих на сейсмический эффект.

В связи с этим, для обоснования и разработки метода прогнозирования величины сейсмического воздействия взрывных работ на поверхностные здания и сооружения необходимо решить следующие **задачи**:

- получить на современном технологическом уровне кондиционные исходные данные о промышленных взрывах (трехкомпонентные

сейсмические записи, детальные сведения об источнике, физико-механические свойства среды и др.), позволяющие анализировать все аспекты сейсмического воздействия в спектральной области;

- изучить геологические и горнотехнические условия на исследуемых территориях, т.е. факторы, влияющие на величину и спектральный состав сейсмического воздействия;
- разработать комплекс исследований (проведение полевых измерений и обработка сейсмических данных), позволяющий минимизировать случайные факторы и максимально точно и достоверно определить зависимость сейсмического воздействия от расстояния до места проведения БВР и массы заряда;
- разработать быстрые и надежные способы изучения и учета неравномерности пространственного распределения уровня сейсмического воздействия взрывов;
- разработать алгоритмы обработки сейсмических данных для обеспечения надежной оценки и корректного прогноза сейсмического воздействия взрывов.

## ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКА И ХАРАКТЕРИСТИК СРЕДЫ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВОВ

Вполне очевидным является то, что фактическая интенсивность сейсмического воздействия каждого конкретного произведенного взрыва зависит от множества различных факторов. Вес каждого из них зависит от большого разнообразия горнотехнических и геологических условий, а влияние некоторых факторов может накладываться друг на друга. Эти обстоятельства делают выделение значения каждого фактора в отдельности крайне затруднительным. Для более четкого определения степени влияния отдельных факторов в конкретных условиях проведен анализ литературных источников и обобщение накопленных данных, полученных в ходе регистрации более 650 взрывов на 11 горнодобывающих объектах. Такой анализ необходим не только для решения задач по управлению сейсмическим действием взрыва, но и для выполнения корректного прогноза амплитуды колебаний.

Основными факторами, влияющими на величину сейсмического воздействия взрыва, являются:

### 1) параметры источника волн:

- максимальный заряд, приходящийся на одну ступень замедления или группу одновременно инициируемых зарядов;
- физико-механические свойства взрываемой породы;
- направление инициирования зарядов взрываемого блока;
- условия и способы взрывания (тип ВВ; форма, конструкция и глубина заложения заряда; качество забойки и величина перебура; интервал замедления, количество ступеней замедления и корректность работы системы инициирования);

### 2) параметры среды распространения волн:

- расстояние от источника взрыва до охраняемого объекта;
- скорость затухания сейсмических волн на пути их распространения от места взрыва к охраняемому объекту;

### 3) параметры пункта приема волн:

- грунтовые условия в основании охраняемого объекта;
- рельеф местности.

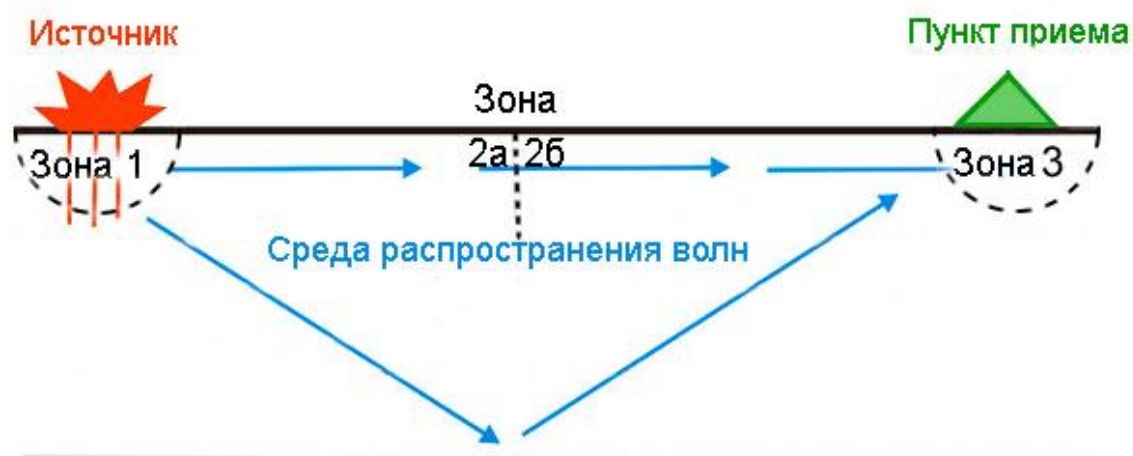


Рис. 2.1. Схематическое зонирование по факторам, влияющим на величину сейсмического воздействия взрыва

Деление влияющих факторов на три группы предполагает наличие пространственных границ между участками среды, где они имеют значение. Рассматривая дистанции, на которых сейсмическое воздействие БВР может представлять опасность для охраняемых зданий и сооружений (как правило, это десятки и первые сотни метров), можно отметить, что в литературе часто используется условное деление пространства, в котором распространяются сейсмические волны, на 3 зоны (рис. 2.1). Согласно [124], первая зона (зона 1 на рис. 2.1), непосредственно примыкающая к источнику, характеризуется нелинейно упругим поведением пород и большим рассеиванием энергии. Радиус этой зоны обычно принимается равным нескольким радиусам заряда. Таким образом, первая область, по сути, и является излучателем сейсмических волн [88]. Поэтому, изучая вопросы безопасности охраняемых зданий и сооружений, которые, как правило, не располагаются настолько близко, первая (ближняя) зона рассматривается как источник сигнала. Анализируя первую группу факторов (параметры источника волн) стоит подчеркнуть, что область их использования для управления уровнем сейсмического воздействия ограничена горнотехническими показателями взрыва и экономическими факторами.

Исследование ближней зоны (зона 1) интересно с точки зрения ее влияния на дальнейшее распространение сейсмических волн. С другой стороны, интерес к дальней зоне (зона 2 на рис. 2.1) связан с влиянием поверхностной волны, амплитуда которой снижается очень медленно. Условная граница между зонами 2а и 2б (рис. 2.1) разделяет участки с разными законами затухания. Это может быть связано со сменой преобладающего типа волн (объемные или поверхностные). Убывание интенсивности вынужденных колебаний в этих подзонах определяется, главным образом, геометрическим расхождением волны.

Третья группа параметров по своей сути также является группой параметров среды, однако ее выделение связано с несколько иными законами изменения сейсмических волн. Пространственная граница третьей группы параметров (зона 3 на рис. 2.1) зависит от расположения охраняемого объекта на местности, а сами параметры играют роль, как правило, только в его окрестности, где приходящие сейсмические волны претерпевают последние существенные искажения. Если объект расположен на земной поверхности, то радиус зоны, где приходящие сейсмические волны приобретают свои окончательные характеристики (как правило, волны усиливаются), оценивается первыми десятками метров. Внутри массива пород, напротив, эта зона может сокращаться до минимума, так что порой в ее учете нет практического смысла. Но поскольку последний случай является скорее исключением, учет третьей группы параметров бывает весьма важен.

Для понимания, какой вклад вносят перечисленные выше факторы в сейсмический эффект, рассмотрим каждый из них подробнее на результатах экспериментальных работ, реализованных в ходе выполнения инструментальных измерений сейсмического эффекта взрывов.

## **2.1. Влияние физико-механических свойств взрывающей породы и направления инициирования зарядов**

Техника и способы ведения БВР в конкретных условиях зависят от физико-механических свойств пород взрывающего массива, которые определяются

деформационными свойствами. Деформационные свойства, в свою очередь, определяются способностью породы изменять размеры и форму под действием механических нагрузок, а затем полностью или частично восстанавливать первоначальную форму и размеры после снятия нагрузок. Разрушение горных пород взрывом происходит в результате сложного деформационного процесса. Поэтому на практике выполнение количественного анализа влияния различных факторов на характер деформирования весьма затруднительно. Данная проблема заключается в сложном влиянии упругих характеристик взрывааемых пород на переход энергии взрыва в энергию сейсмических волн. Вся история генезиса пород, их минеральный состав, изменения его при вторичных процессах, увеличение или снижение пористости, влажности, давления – все эти параметры находят отражение в скорости распространения упругих колебаний, которая является, своего рода, эталоном информации о состоянии пород [17]. При постоянных условиях в месте регистрации отмечаются следующие особенности: взрывы в скальных породах вызывают колебания большей интенсивности, чем взрывы в рыхлых наносах; при взрывах в обводненных породах наблюдается возрастание амплитуды колебаний по сравнению с аналогичными сухими грунтами.

Инициирование зарядов в блоке может происходить в разных направлениях, и создаваемый при этом сейсмический эффект также может зависеть от того, насколько это направление совпадает с направлением распространения волн. Суть действия фактора направленности сейсмического излучения в определенном направлении можно объяснить как фокусировкой сигнала за счет используемой схемы взрывания, так и условиями распространения сейсмических волн (ориентировка открытой поверхности или факт прохождения/не прохождения волны через массив, разрушенный этим же взрывом).

Выявить и оценить влияние этих факторов позволили эксперименты по оценке сейсмического воздействия взрывов, производимых на одном из гипсовых карьеров Пермского края, на близлежащие жилые поселки. В ходе выполнения работ выполнена регистрация 5 массовых взрывов, параметры которых приведены в таблице 2.1. При этом регистрация сейсмических волн велась в одних и тех же пунктах.

Анализ амплитуды сейсмической волны выполнялся в зависимости от приведенного расстояния через суммарную массу заряда  $Q_{\Sigma}$  (формула 1.1).

Таблица 2.1.

Параметры взрывов, зарегистрированных в ходе проведения работ

№ пп	Дата	Горизонт	Кол-во скважин	Кол-во ступеней замедления	Суммарный заряд $Q_{\Sigma}$ , кг	Макс. заряд на ступень $Q_{\max}$ , кг
1	2011.08.23	+137	149	17	11 980	804
2	2011.08.24	+125	31	9	12 437	1203
3	2011.08.29	+150	65	14	9 920	1720
4	2011.11.16	+125	30	10	12 018	1202
5	2011.11.16	+150	47	12	5 880	875

Зарегистрированные взрывы делятся на 3 группы (рис. 2.2), причем на равных приведенных расстояниях величина сейсмического воздействия отличалась в разных группах на порядок. Изучение паспортов (проектов) буровзрывных работ показало, что к увеличению сейсмического эффекта приводит взрыв блоков, сложенных более плотным ангидритом (24 августа и 16 ноября 2011 года). Приведенная на рис. 2.3 карта расположения взрываемых блоков и направления инициирования зарядов демонстрирует, что минимальный сейсмический эффект имел взрыв блока 29 августа 2011 года, инициирование зарядов в котором выполнялось в направлении от охраняемого объекта (то есть в порядке от ближнего края к дальнему). Вместе с этим, "средний" сейсмический эффект наблюдался 23 августа и 16 ноября 2011 года при взрывах блоков, сложенных гипсом, и имевших направление инициирования зарядов близкое к направлению к охраняемым сооружениям.

Более детальный анализ влияния фактора направленности был проведен для другого горнодобывающего объекта. Статистически характер влияния на сейсмический эффект направления инициирования зарядов взрываемого блока удалось оценить в результате обработки около 100 взрывов, зарегистрированных стационарными станциями, установленными в непосредственной близости от горнодобывающего объекта. Из всех данных для анализа были отобраны записи взрывов, для которых направление инициирования можно установить более-

менее однозначно. На рис. 2.4 приведены примеры трех типичных вариантов инициирования для данного горнодобывающего объекта, которые условно были названы «малое кольцо», «длинное кольцо» и «змейка».

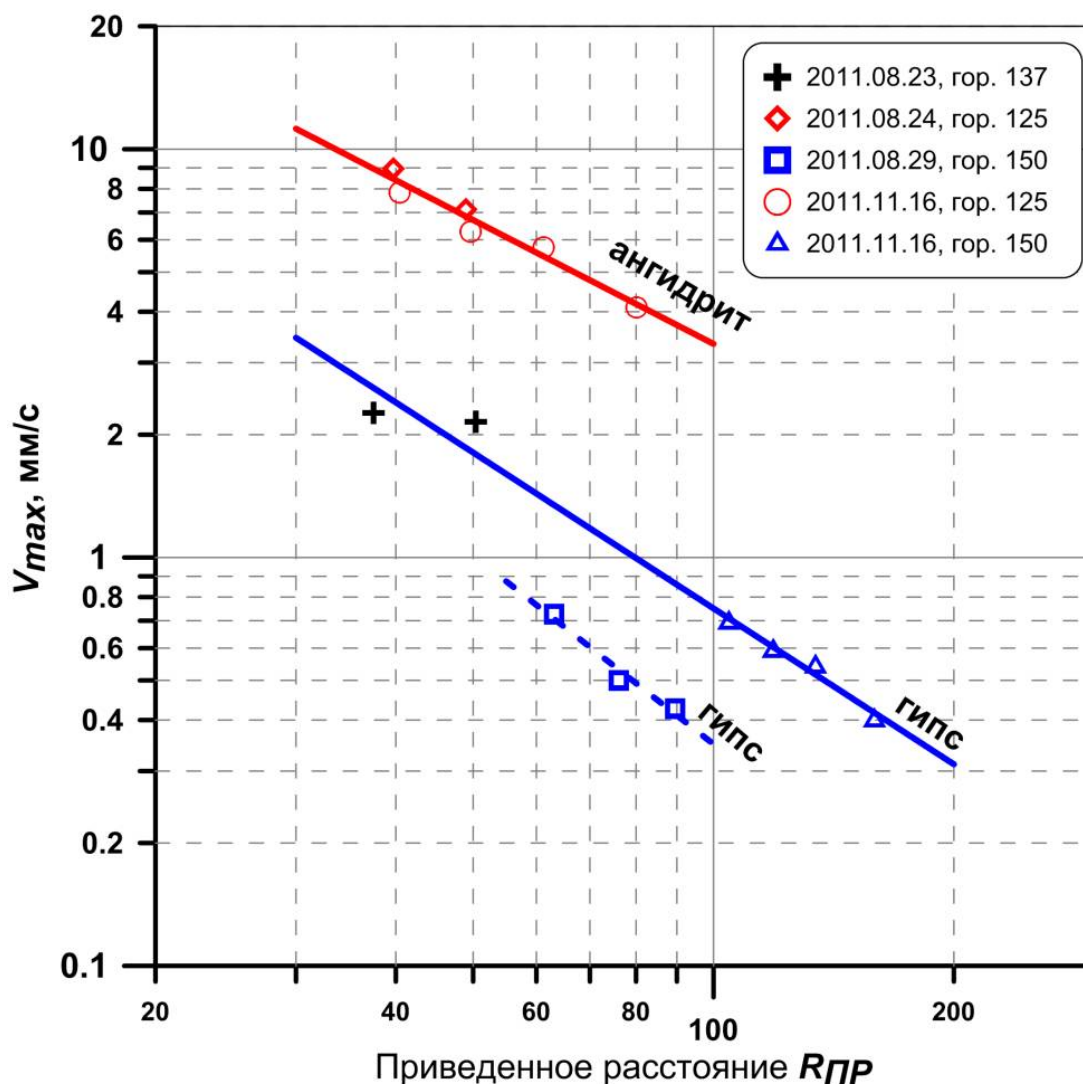


Рис. 2.2. Зависимость скорости смещения грунта от приведенного расстояния для всех зарегистрированных взрывов

Как можно заметить из схем, вариант взрыва «малым кольцом» дает три равнозначных направления инициирования, что затрудняет выбор одного из них как наиболее предпочтительного для учета. В варианте «длинным кольцом» формируется два преобладающих направления инициирования, но эта ситуация также не позволяет выбрать одно из них, поскольку оба направления примерно равнозначны. Вариант инициирования «змейкой» с этих позиций выглядит наиболее подходящим для учета. В нем также присутствуют три направления



инициирования, как в «малом кольце», но два из них компенсируют друг друга, оставляя преобладающим лишь одно.

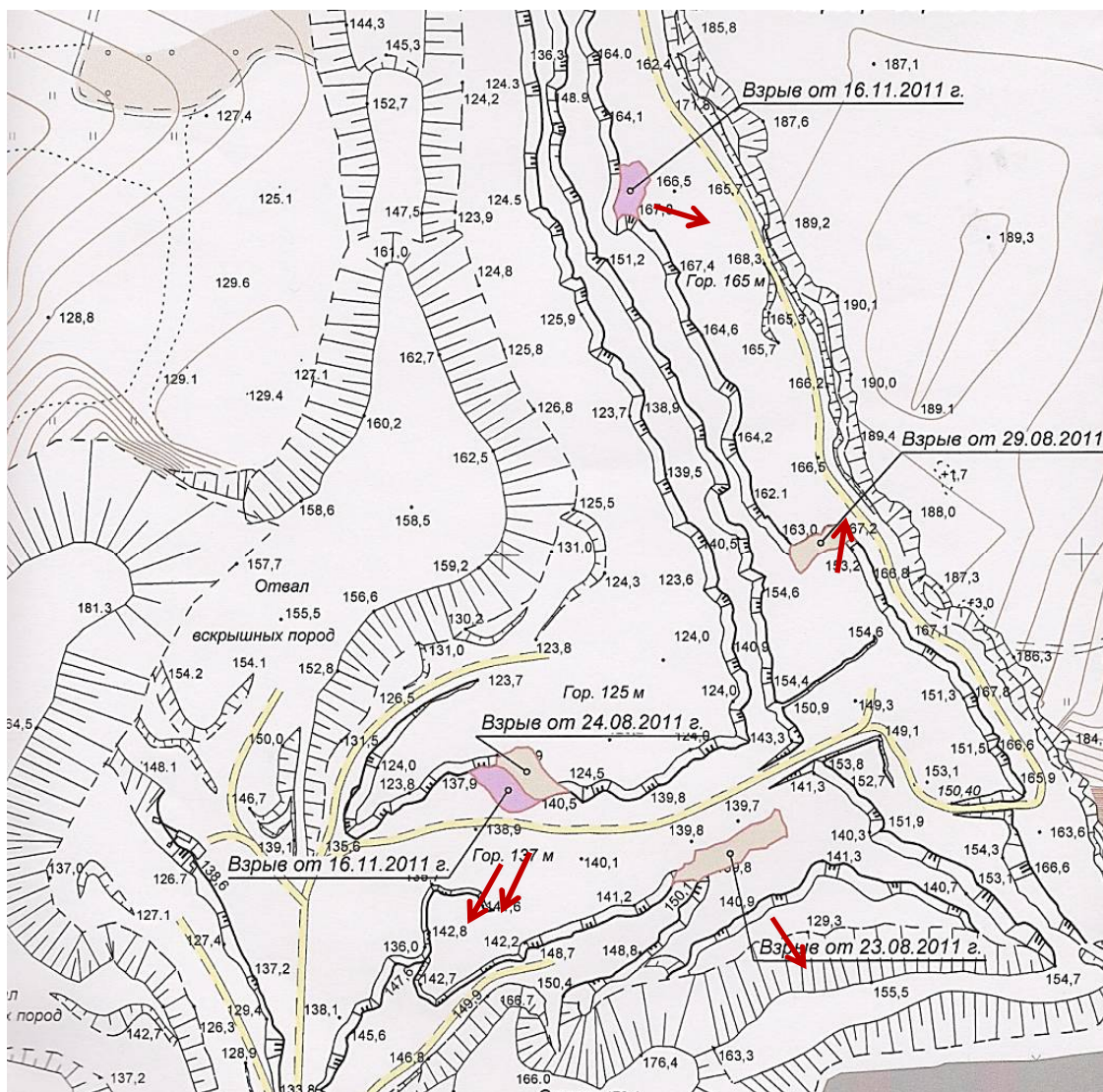


Рис. 2.3. Карта расположения взрываемых блоков (красными стрелками показаны направления инициирования зарядов)

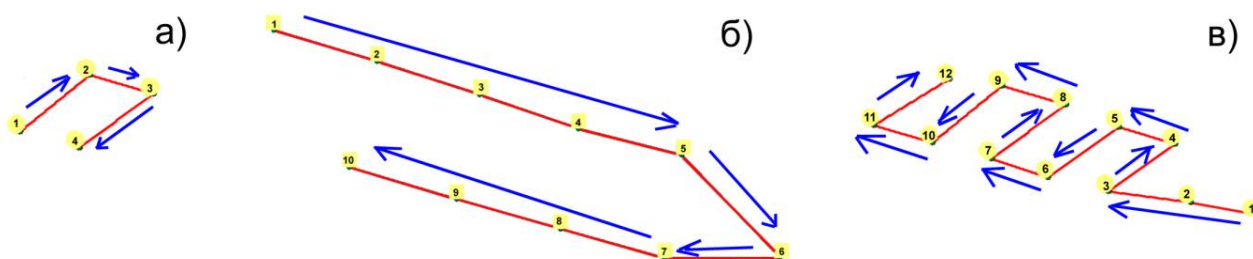


Рис. 2.4. Варианты инициирования зарядов в блоке:

а) «малым кольцом», б) «длинным кольцом», в) «змейкой»

Таким образом, для анализа подходят только блоки с достаточно большим количеством скважин (более 6), в пределах которых инициирование происходило «змейкой». Азимут инициирования определялся по преобладающим направлениям. Оценка производилась по величине отношения  $V_{факт}/V_{ож}$ , характеризующей отклонение фактически измеренных скоростей смещения  $V_{факт}$  от ожидаемых (прогнозных) значений  $V_{ож}$ .

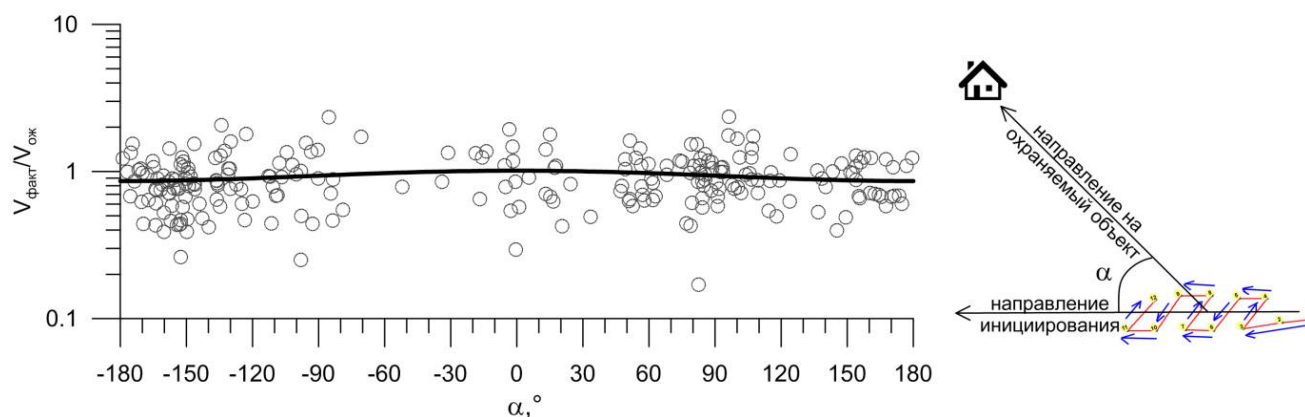


Рис. 2.5. Влияние направления инициирования зарядов на сейсмический эффект

Распределение этого отношения построено относительно аргумента  $\alpha$ , характеризующего разницу азимута инициирования (рис. 2.5) и азимута на охраняемый объект. Общая тенденция усиления сейсмического эффекта, выявленная по результатам аппроксимации отношения  $V_{факт}/V_{ож}$  косинусной функцией (сплошная линия на графике), как и ожидалось, наблюдается при  $\alpha = 0$ , когда направление инициирования совпадает с направлением на охраняемый объект. Амплитуда косинусоиды свидетельствует о наличии влияния исследуемого фактора на уровне  $\sim 7\%$ . В тоже время стоит заметить, что случайные отклонения от этой линии имеют намного бóльшие значения. Таким образом, фактор направления инициирования зарядов взрываемого блока является малозначимым в условиях представленного в качестве примера объекта.

## 2.2. Влияние условий и способов взрывания

Данная группа факторов, в основном, определяется:

- типом ВВ;

- формой, конструкцией и глубиной заложения заряда;
- качеством забойки и величиной перебура;
- интервалом замедления и количеством ступеней замедления;
- корректностью работы системы инициирования.

Источником сейсмических колебаний при БВР является удар сжатых и горячих газов по стенкам камеры, в которую помещен заряд взрывчатого вещества. Этот удар вызывает перемещение частиц грунта стенки, частицы воздействуют на соседние частицы, дальше отстоящие от заряда, заставляя их также перемещаться и т.д. Внедренный в пятидесятых годах XX века и широко используемый в настоящее время короткозамедленный способ взрывания позволяет:

- снизить уровень сейсмического воздействия взрыва;
- повысить качество дробления взрываемого массива;
- уменьшить выход негабарита;
- увеличить выход горной массы.

Эффективность применения способа короткозамедленного взрывания (КЗВ) при БВР достигается применением соответствующих схем КЗВ и интервалов замедления, которые выбираются для конкретных горно-геологических и экономических условий. Собственно, сама концепция КЗВ идет из идеи снижения сейсмического эффекта за счет недопущения синфазного наложения волн от разных зарядов. При этом существенное снижение сейсмического эффекта происходит при замедлениях более 20 мс, что отмечается в ФНП "Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения".

Рассматривая влияние условий и способов взрывания как фактор, определяющий уровень сейсмического воздействия, нужно подчеркнуть главное обстоятельство: чем больше энергии задействовано в зоне дробления, тем меньше уровень сейсмического воздействия. Более того, как показано в работе [17], связь сейсмического воздействия с дробящим действием взрыва не всегда бывает однозначной.

### 2.2.1. Тип ВВ

Тип используемого ВВ напрямую зависит от горнотехнических условий, определяет параметры буровзрывных работ в целом, а также существенным образом влияет на себестоимость работ.

Сейсмическое действие взрыва представляет собой результат необратимых разрушающих деформаций, которые возникают под действием резкого скачка давления взрывных газов. Вследствие этого, изменение характера разрушения горных пород влечет за собой изменение уровня сейсмического воздействия. Эффективность взрыва на дробление напрямую зависит от соответствия параметров БВР геологическим и горнотехническим условиям.

Промышленные ВВ описываются рядом характеристик: теплотой взрыва, объемом образующих газов, скоростью детонации ВВ и рядом других. При этом степень проявления вредного действия взрыва определяется в основном такими характеристиками, как теплота взрыва, объем образующихся взрывных газов и скорость детонации заряда.

Энергия взрыва зависит от объемной концентрации энергии заряда ВВ и скорости ее выделения [91]. Это означает, что в случае увеличения плотности ВВ рациональная скорость детонации снижается, а полезное использование энергии взрыва увеличивается. Маломощные ВВ, характеризующиеся низкой скоростью детонации, низкой теплотой взрыва и большим объемом взрывных газов, при корректном проектировании взрывных работ используют, в основном, для дробления слабых трещиноватых пород и малосвязных грунтов. В плотных, крепких и монолитных породах целесообразно применение ВВ с высокой скоростью детонации, позволяющих формировать большое количество трещин. Вместе с этим, не всегда прослеживается прямолинейная связь энергии заряда с уровнем сейсмического воздействия, который, в конечном счете, определяется характером деформирования и разрушения пород. Таким образом, для обеспечения минимального сейсмического действия БВР необходимо, чтобы свойства ВВ соответствовали свойствам разрушаемых пород и техническим условиям по обеспечению безопасности взрыва.

Основными характеристиками ВВ, которые непосредственно оказывают влияние на сейсмический эффект, принято считать скорость детонации и теплоту

взрыва (удельная энергия). В конкретных горно-геологических условиях эти характеристики ВВ могут изменяться лишь в относительно небольших диапазонах, обеспечивая заданную степень дробления. Поэтому регулировать уровень оказываемого сейсмического воздействия переходом на другой ВВ не всегда представляется возможным.

Также необходимо отметить, что на сейсмический эффект влияют не только параметры источника (в данном случае тип ВВ), но и параметры среды распространения волн, а также много других случайных трудноучитываемых факторов, за которыми ожидаемые эффекты могут быть просто не видны. Поэтому единственным способом выявить действительный характер влияния такого параметра источника, как тип ВВ, является эксперимент.

Такой эксперимент был организован в ходе режимного сейсмического мониторинга на одном горнодобывающем предприятии, ведущем разработку месторождения открытым способом. Суть его заключалась в измерении сейсмического эффекта от нескольких одиночных взрывов с близкими параметрами в одних и тех же породах, но разными типами ВВ. Всего выполнено 4 одиночных взрыва с использованием ярита и 4 взрыва с использованием гранулолола, основные характеристики которых приведены в таблице 2.2. Параметры произведенных взрывов приведены в таблице 2.3. В пространстве взрывы производились в противоположных частях карьера и образовывали пары. В каждой паре в одной скважине закладывался ярит, а в другой – гранулолол. Получившиеся таким образом 4 группы зарядов (1с-1г, 2с-2г, 3с-3г, 4с-4г) были рассредоточены в разных частях карьера. В то же время было произведено 2 короткозамедленных взрыва соседних блоков с разным типом ВВ (блоки 1 и 2), в которых прочие параметры тоже были близкими (таблица 2.4). Серия экспериментов была поставлена таким образом, чтобы максимально исключить возможность влияния других факторов (расстояние, латеральная неоднородность грунтовых условий). Для этого измерения сейсмического эффекта проводились в одних и тех же пунктах. Всего было задействовано 10 сейсмостанций, оборудованных трехкомпонентными велосиметрами (4 стационарных и 6 временных сейсмических станций). Различия в параметрах источника, которые в ходе эксперимента все же несколько отличались

(максимальная масса ВВ в скважине), учитывались посредством ввода соответствующих поправок через приведенное расстояние  $R_{пр}$ .

Таблица 2.2.

Основные характеристики используемых в эксперименте ВВ

Характеристика	Ярит	Гранулотол
Удельная энергия (теплота взрыва), ккал/кг	715-800	870
Скорость детонации в стальной трубе, км/с	4.6-4.8	5.0-5.2
Бризантность в стальном кольце (по ГОСТ 5984), мм	22-28	24-26

Таблица 2.3.

Проектные параметры одиночных взрывов

Взрыв	Тип ВВ	Масса ВВ, кг
1с	Ярит	1000
2с	Ярит	400
3с	Ярит	1000
4с	Ярит	1000
1г	Гранулотол	240
2г	Гранулотол	240
3г	Гранулотол	560
4г	Гранулотол	720

Таблица 2.4.

Проектные параметры короткозамедленных взрывов

Параметр взрыва	Блок 1	Блок 2
Количество скважин	10	4
Система инициирования	ИСКРА-С	ИСКРА-С
Интервал замедления между зарядами, мс	67	67
Общая продолжительность взрыва, мс	603	201
Максимальная масса ВВ в скважине, кг	1250	720
Общая масса ВВ, кг	11950	2880
Тип ВВ	Ярит	Гранулотол

После проведения такого эксперимента сравнение сейсмического эффекта от разных типов ВВ выполнено двумя способами: интегрально (через величины измеренных скоростей смещения) и отдельно по разным частотам (через спектры колебаний).

Сравнение проводилось с помощью величины  $dV$ , представляющей собой разницу фактических (измеренных) от ожидаемых (расчетных) скоростей смещения грунта:

$$dV = V_{\text{факт}} - V_{\text{ож}} \quad (2.1).$$

В результате сравнения интегрального сейсмического эффекта во всех пунктах наблюдения не выявлено каких-либо статистически значимых отклонений  $dV$  относительно нуля.

Для повышения статистической достоверности сделанных выводов были привлечены материалы режимного мониторинга сейсмического воздействия БВР на данном объекте, содержащие записи взрывов с разным типом ВВ (более 220 взрывов), произведенных за более чем двухгодичный период наблюдений. Результаты анализа, представленные на гистограммах для каждой из 4 стационарных сейсмических станций (рис. 2.6), также свидетельствуют об отсутствии значимого влияния типа ВВ на сейсмический эффект. Все отклонения  $dV$  для разных типов ВВ, выявленные в долговременных пунктах наблюдения, имеют незначительные величины (в среднем около 0.1 см/с), что соответствует ошибке определения ожидаемого сейсмического эффекта. При этом максимумы распределения самих отклонений  $dV$  практически совпадают для разных типов ВВ.

Анализ различий сейсмического эффекта взрывов с разным типом ВВ, выполненный в спектральной области, показал аналогичный результат. На относительных спектрах (ярит/гранулотол), рассчитанных для парных взрывов 1с-1г, 2с-2г и т.д. (рис. 2.7), сейсмический эффект имеет близкий уровень (отношение около 1) в полосе частот до 10 Гц, наиболее вредной для охраняемых объектов. Существенно отличается картина для пары 3с-3г, где отмечается десятикратное превышение спектральных амплитуд на частотах 4-5 Гц для взрыва ярита. Однако данное десятикратное превышение спектральных амплитуд интегрально никак не проявилось – общий сейсмический эффект от

обоих взрывов был схожим. Это говорит об очень низкой амплитуде сейсмической волны в данном частотном диапазоне, т.е. фактически вся ее энергия сосредоточена в области низких частот.

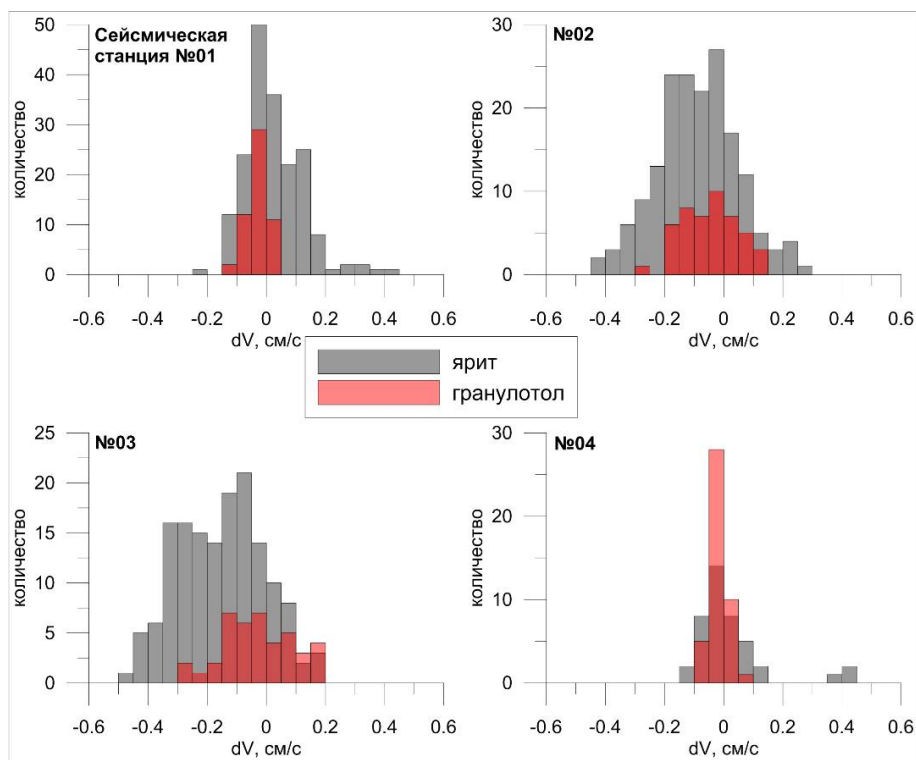


Рис. 2.6. Гистограммы распределения отклонений сейсмического эффекта от ожидаемых значений для разных типов ВВ

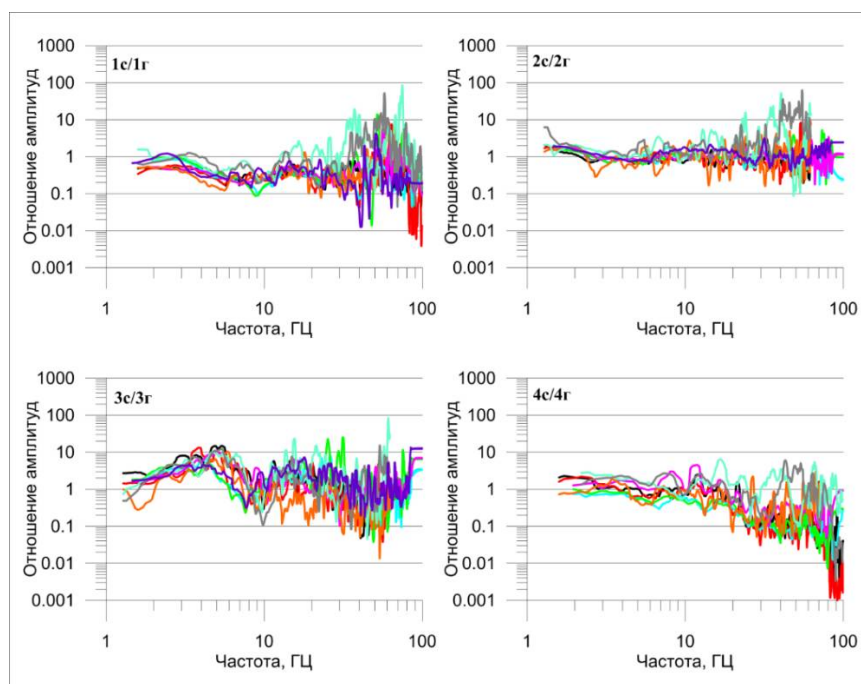


Рис. 2.7. Спектральные отношения для пар одиночных взрывов, выполненных с использованием разных типов ВВ (ярит/гранулотол)



Таким образом, результаты сравнения интегрального сейсмического эффекта (по отклонения  $dV$ ) и эффекта в спектральной области для взрывов с разным типом ВВ, имеющих близкие характеристики (таблица 2.2), свидетельствуют об отсутствии статистически значимого влияния типа ВВ на уровень сейсмического воздействия в исследуемых условиях.

### *2.2.2. Форма, конструкция и глубина заложения заряда*

Экспериментальное исследование характера влияния формы, конструкции и глубины заложения заряда автором не проводилось, однако для полноты картины приведем результаты, полученные другими исследователями.

Для реализации разнообразных по назначению технологий БВР применяют различные по своей форме и конструкции заряды. Используемые заряды различают по форме (сосредоточенный, удлинённый или колонковый), по конструкции (сплошной, рассредоточенный - разделённый на части забоечным материалом, водой или воздухом). При использовании рассредоточенных зарядов действие продуктов взрыва на стенки зарядной полости более длительное. Таким образом, массиву передается много больше энергии, чем при взрыве сплошных зарядов. Такие заряды обуславливают своеобразный характер изменения скорости сейсмических колебаний. Взрывы рассредоточенных зарядов сопровождаются увеличенными показателями затухания, а также увеличенными периодами колебаний [17].

Виды зарядов ВВ по характеру действия напрямую связаны с глубиной их заложения и делятся на камуфлетные (действие взрыва ограничивается образованием подземной полости), заряды рыхления (проявляется в дроблении и вспучивании горной породы и ее некотором перемещении) и заряды выброса (сопровождается дроблением и выбросом породы за пределы воронки взрыва). Влияние данного фактора учтено в ФНП при расчете сейсмически безопасных расстояний в виде коэффициента  $\alpha$ , зависящего от условий взрывания, и принимающего значение от 0.5 для полууглубленных зарядов до 1 для камуфлетного взрыва.

Среди этой группы факторов существенное влияние на уровень сейсмического воздействия и на особенности волновой картины каждого

конкретного взрыва оказывает глубина заложения зарядов. Некоторые исследователи рассматривают влияние данного фактора через понятия линии наименьшего сопротивления (л.н.с) и сопротивления по подошве уступа. В общем случае, при снижении удельного расхода ВВ вследствие заглибления зарядов интенсивность сейсмических колебаний закономерно увеличивается. Таким образом, при шпуровых и мелкоскважинных взрывах (малая глубина заложения зарядов на карьерах) скорости смещения заметно ниже, чем при взрывах в глубоких скважинах (10 м и более), так как верхний слой разрушен сильнее и характеризуется более низкими скоростями упругих волн [17]. Это обстоятельство учтено при расчете сейсмически безопасных расстояний  $r_c$  в ФНП "Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения" в виде коэффициента  $\alpha$ , зависящего от условий взрывания. В работе [91] рассматривается вопрос управления уровнем сейсмического воздействия взрыва, при этом минимальный эффект наблюдается в том случае, когда глубина заложения заряда полностью совпадает с радиусом зоны регулируемого дробления или близкой ей зоны трещинообразования. В случае изменения глубины заложения заряда относительно этих зон, значительная часть энергии может трансформироваться в сейсмические волны, вызывая существенное увеличение сейсмического эффекта.

Необходимо отметить, что область использования фактора глубины заряда для управления уровнем сейсмического воздействия, как показал опыт работы на разных горнодобывающих предприятиях, ограничена горнотехническими и экономическими показателями взрыва. Более того, при слишком малой л.н.с. есть опасность чрезмерного или аварийного разлета взорванной массы, а при больших показателях л.н.с. качество дробления породы заметно ухудшается.

### *2.2.3. Интервал замедлений и количество ступеней замедления*

*(корректность работы системы инициирования)*

Как говорилось ранее, благодаря высокой эффективности и относительной безопасности, способ КЗВ в течение последних 50 лет получил весьма широкое распространения в горнорудной промышленности. Несмотря на общее снижение

уровня сейсмического воздействия БВР на охраняемые здания и сооружения за счет применения способа КЗВ, существенную роль в управлении сейсмическим эффектом (как и технологией БВР) оказывают такие факторы, как интервал замедлений, количество ступеней замедления и корректность работы системы инициирования (СИ). Как отмечается в [100], величина интервала замедлений и количество ступеней замедлений являются основными параметрами КЗВ, оптимальный выбор которых позволяет управлять дробящим и сейсмическим действием взрыва. Результаты экспериментов, выполненные коллективом авторов [17] позволили установить, что изменение сейсмического воздействия взрывов при различных интервалах замедлений происходит вследствие:

- 1) уменьшения одновременно взорванной массы и, следовательно, вовлечения меньшего объема породы в формирование преобладающих поверхностных волн, общий запас упругой энергии которых, естественно, меньше;
- 2) ускорения разрушения объема породы в области первого заряда под воздействием распространяющейся в массиве энергии от второго заряда;
- 3) интерференции колебаний, распространяющихся от различных зарядов, взорванных с короткими замедлениями.

Таким образом, если исключить синфазное наложение волн от разных зарядов, возможно существенным образом снизить величину сейсмического воздействия для конкретного охраняемого объекта (при условии обеспечения стабильной и корректной работы применяемой СИ).

Влияние интервала замедления промоделировано автором посредством использования результатов регистрации одиночных взрывов, сигналы от которых были просуммированы с различной задержкой (замедлением). Данные о взрывах, включающие параметры зарядов (масса ВВ) и сейсмические записи, получены непосредственно вблизи объекта. Знание массы ВВ дает возможность вносить в численный эксперимент соответствующие поправки и влиять на интенсивность источника. Наличие сейсмических записей одиночных взрывов избавляет от необходимости знания строения и свойств среды на пути распространения волн и в пункте их приема, поскольку позволяет учесть все их разом, так как вся необходимая информация об этом уже в них содержится. Для

реализации такого моделирования также необходимо иметь следующую информацию: координаты скважин, координаты пункта приема, скорость распространения сейсмических волн.

Координаты скважин и местоположение пункта приема, как правило, известны заранее. Скорость распространения волн в конкретных условиях может быть получена из годографа, построенного по результатам измерения времен вступления волн от взрывов на разных расстояниях. Результат моделирования наложения сейсмических волн от виртуального короткозамедленного взрыва в блоке с 6 скважинными зарядами при разных замедлениях, выполненного для конкретной точки местности, представлен на рис. 2.8. Можно видеть, что самые низкие величины усиления колебаний за счет наложения волн получаются для диапазона замедлений 25-45 мс. Приемлемым является диапазон 65-100 мс, где усиления также минимальны. Для диапазонов замедлений 45-65 мс и 100-120 мс на графике видны вторичные максимумы, которые отражают наложение отдельных цугов волн, преобладающих в спектре. В частности, для некоторых из них (вероятно, высокочастотных объемных волн) наложение наблюдается при замедлениях в диапазоне 45-65 мс. Для других (низкочастотных поверхностных) волн наложение смещается в область замедлений от 100 до 120 мс, где амплитуда воздействий также несколько выше фоновых значений.

Отметим, что при анализе оценок, полученных в ходе моделирования замедлений, необходимо учитывать, что в частотный состав колебаний большой вклад вносит фактор резонансных особенностей грунтов. Поэтому для разных точек местности записи одиночных взрывов могут отличаться и, соответственно, вид модельной зависимости (рис. 2.8) для них будет другим.

Число ступеней замедления ( $n$ ) влияет, прежде всего, на продолжительность короткозамедленного взрыва. Если не принимать во внимание меняющуюся величину замедлений, то, чем больше  $n$ , тем длиннее взрыв и тем более низкочастотные волны он возбуждает. Низкочастотные волны, как показывают наблюдения, менее всего комфортны для населения, а их частотный диапазон зачастую совпадает с собственными (резонансными) частотами охраняемых сооружений. С этой точки зрения в отдельных ситуациях количество ступеней необходимо ограничить каким-то конечным числом  $n$

(порогом). Моделирование сейсмического эффекта наложения волн от разных ступеней замедления позволяет получить в первом приближении данный порог. Результаты моделирования эффектов наложения для различных  $n$  (рис. 2.9) демонстрируют возможное увеличение сейсмического эффекта при «неудачном» выборе величины замедления. Эффект короткозамедленного взрыва в данных условиях, сопоставимый с эффектом взрыва одиночной скважины, получается только при  $n < 12$ . При этом на диаграммах имеются достаточно широкие области с минимальным уровнем усиления, а количество неблагоприятных интервалов невелико, как и сама величина усиления. С увеличением количества ступеней замедления количество неблагоприятных интервалов возрастает, а величина усилений в некоторых из них увеличивается до 2-3 раз. Если ограничить величину возможных усилений за счет наложения волн неким коэффициентом (например, 2.5 в интервале замедлений 50-60 мс), то можно определить предельное количество ступеней замедления (в данном примере  $n=8$ ), превышать которое при производстве взрывов нежелательно.

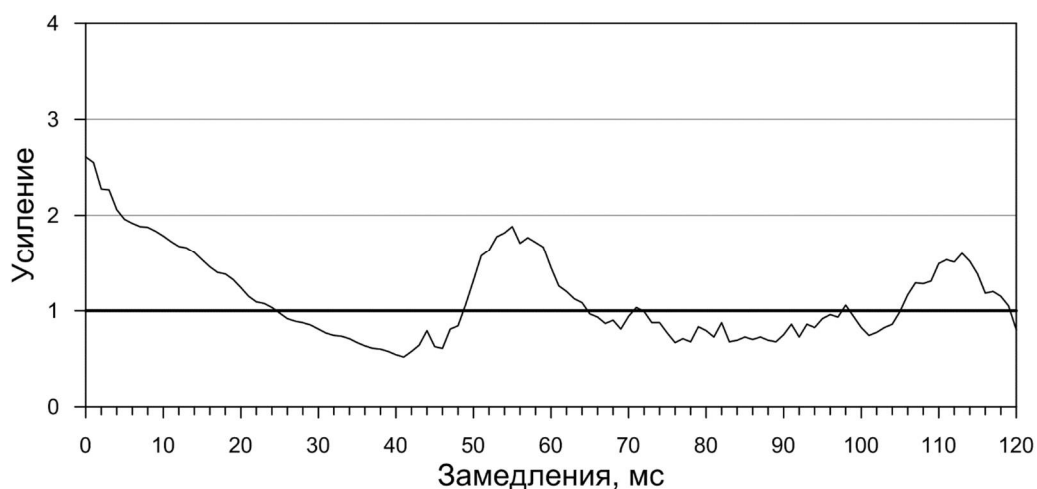


Рис. 2.8. Пример модельной зависимости уровня усиления сейсмического эффекта от величины замедления

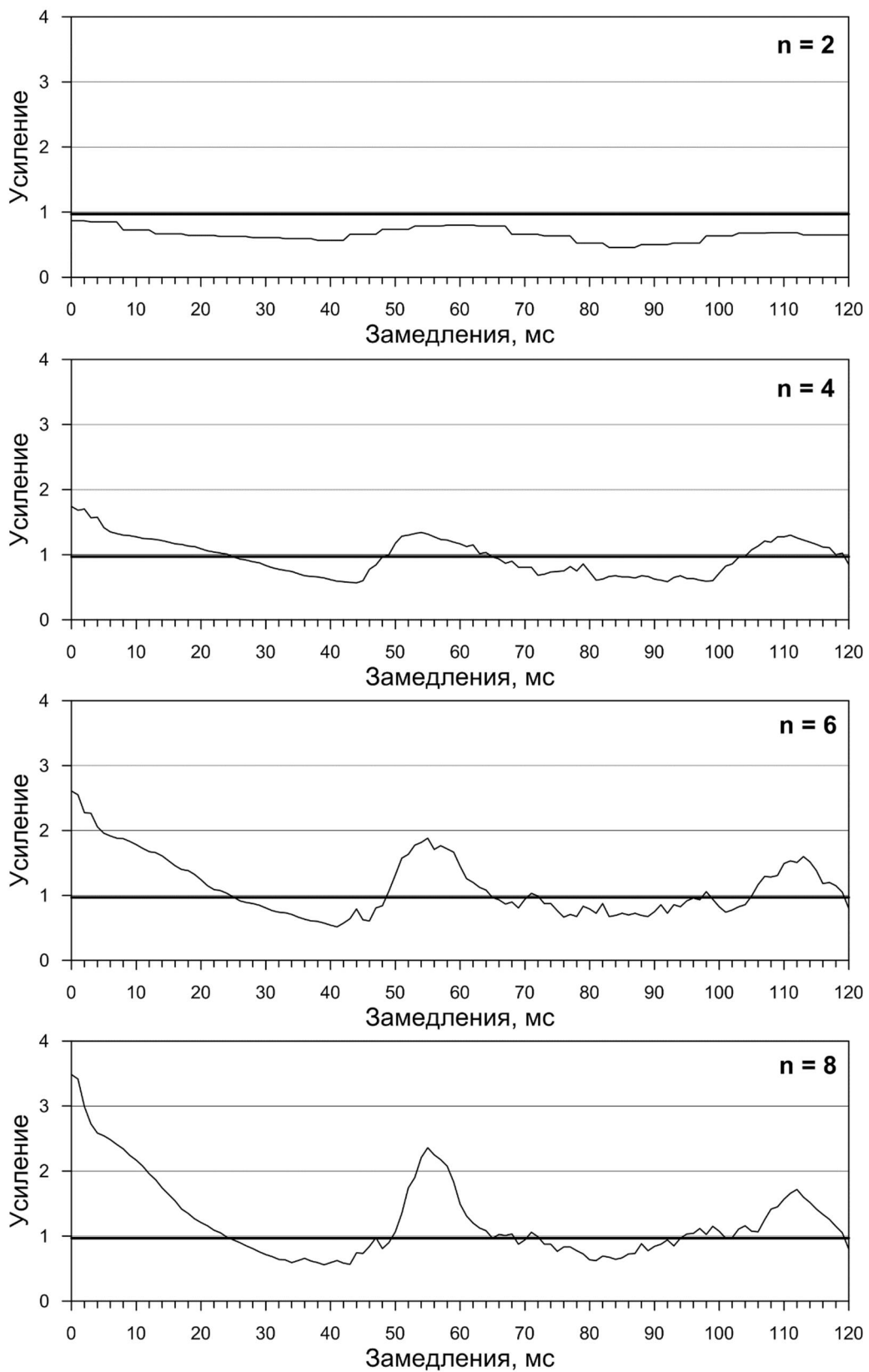


Рис. 2.9. Моделирование эффектов наложения волн для различного числа ступеней замедления ( $n$ )

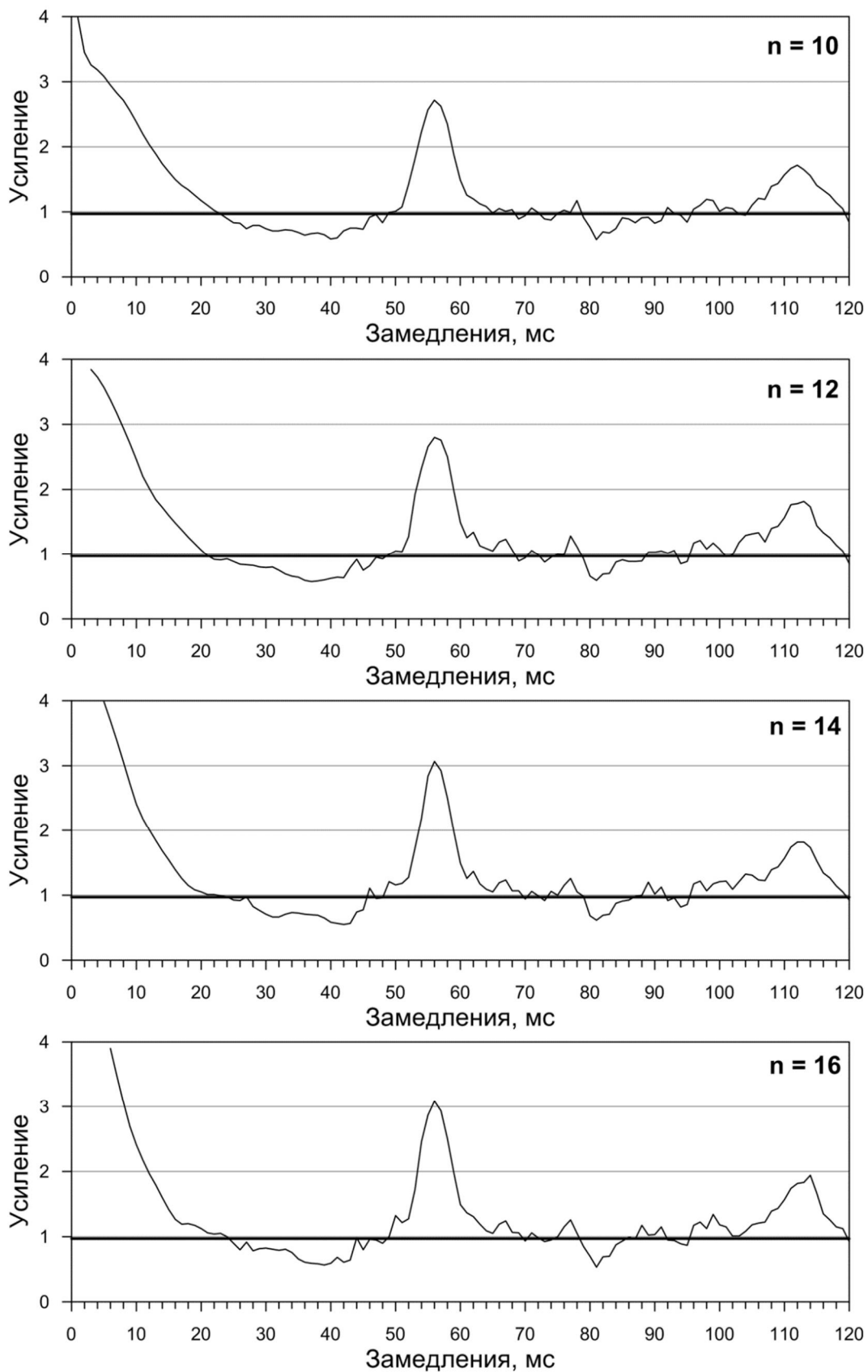


Рис. 2.9. Моделирование эффектов наложения волн для различного числа ступеней замедления ( $n$ ) (продолжение)

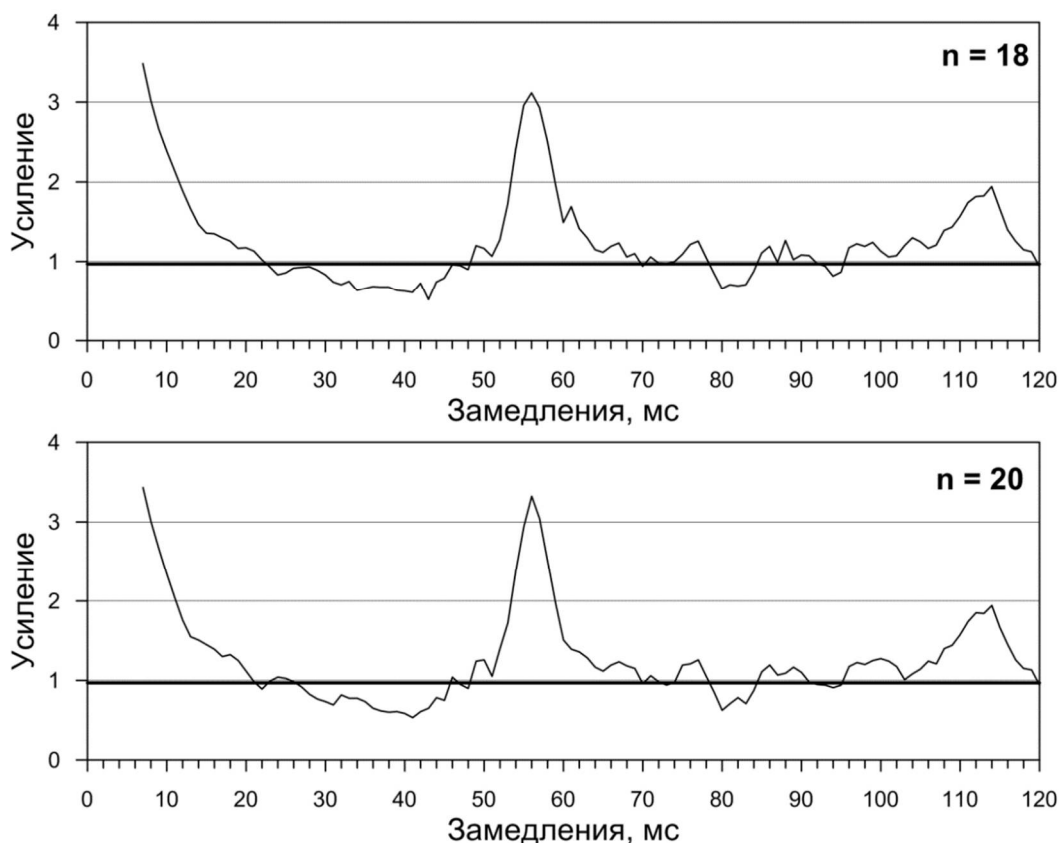


Рис. 2.9. Моделирование эффектов наложения волн для различного числа ступеней замедления ( $n$ ) (окончание)

Результаты изучения сейсмического эффекта взрывных работ на различных объектах горнорудной промышленности подтверждают необходимость приступать к изучению влияния факторов, влияющих на сейсмический эффект, с анализа работы применяемых систем инициирования. Это связано с тем, что при оценке ожидаемой величины сейсмического воздействия взрыва исходят из предположения, что инициация зарядов происходит именно в том порядке и в те моменты времени, как это определено в проекте (паспорте) БВР. Необходимость в контроле работы СИ связана с частыми отклонениями паспортных (номинальных) замедлений применяемых СИ от фактических. Нестабильная работа замечена в работе таких современных неэлектрических СИ как ИСКРА (СИНВ), КОРШУН, ЭДИЛИН. Необходимо подчеркнуть, что анализ работы СИ возможен лишь по сейсмическим записям взрывов на минимальном удалении от взрываемого блока (забоя), на которых четко выделяются импульсы от инициации отдельных зарядов, имеющие на малых расстояниях более высокочастотный спектр колебаний. Помимо потенциального снижения



эффективности разрушения породы вследствие некорректности работы СИ, из-за наложения ступеней замедления друг на друга возможно существенное увеличение величины сейсмического воздействия [32, 53]. То есть, следствием неправильной работы СИ может являться то, что в отдельные моменты времени амплитуда сейсмических волн становится существенно выше, чем могла бы быть при точном соблюдении замедлений детонаторами. Пример сопоставления сейсмограмм, полученных на небольшом удалении от взрываемого блока, с данными используемых паспортов (проектов) взрывов приведен на рис. 2.10, где отмечается значительное несоответствие фактических параметров взрыва (а именно интервала замедления между зарядами) проектным значениям.

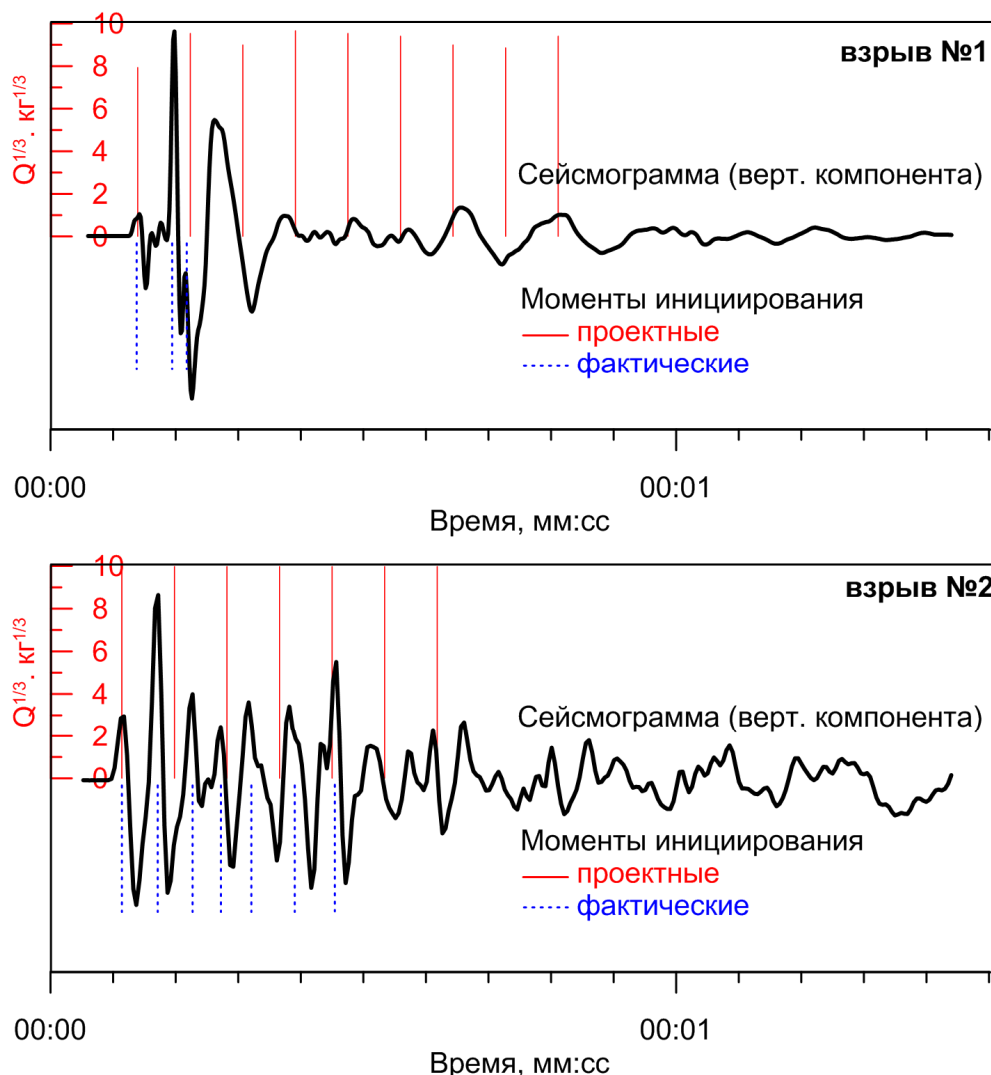


Рис. 2.10. Сопоставление проектных и фактических интервалов замедления

На сейсмических записях взрыва №1, полученных на ближайшем пункте, расположенном в 150 м от взрыва, видно, что система инициирования сработала

с существенными отклонениями от проектных параметров, в результате чего вместо 9 этапов детонации в течение 672 мс произошло 3 в течение 90 мс. Фактические параметры замедлений для взрыва №2 оказались хоть и ближе к проектным параметрам, но также свидетельствует о неточности работы СИ.

Благодаря большому количеству зарегистрированных взрывов, была собрана статистика по работе одной из самых распространенных СИ в России – ИСКРА, которая применялась на изучаемом горнодобывающем объекте, ведущим добычу открытым способом. С помощью данной СИ за время наблюдений произведена взрывная отбойка более 100 блоков. Общая статистика отклонений фактических интервалов замедления от номинальных (паспортных) представлена в табл. 2.5 и на рис. 2.11.

Таблица 2.5.

Статистика отклонений интервалов замедлений  
для системы инициирования ИСКРА

Отклонение dT, мс	Количество блоков, %
$\leq 5$	62
$\leq 10$	26
$\leq 15$	5
$\leq 20$	5
$\leq 25$	1
$> 25$	1

Приведенные результаты свидетельствует о том, что около 90% взрывов произведены с отклонениями во временах инициирования не более 10 мс. И хотя работа СИ ИСКРА была признана условно удовлетворительной, даже незначительные отклонения во времени могут существенно влиять на синфазное наложение волн, что существенно затрудняет анализ влияния различных факторов и реализацию прогноза уровня сейсмического воздействия.

Таким образом, для взрывов, инициация которых прошла с определенными отклонениями, выполнение анализа факторов, влияющих на сейсмический эффект, с использованием закона подобия по отношению к максимальной величине одновременно инициируемого заряда ВВ  $Q_{max}$ , не представляется возможным.

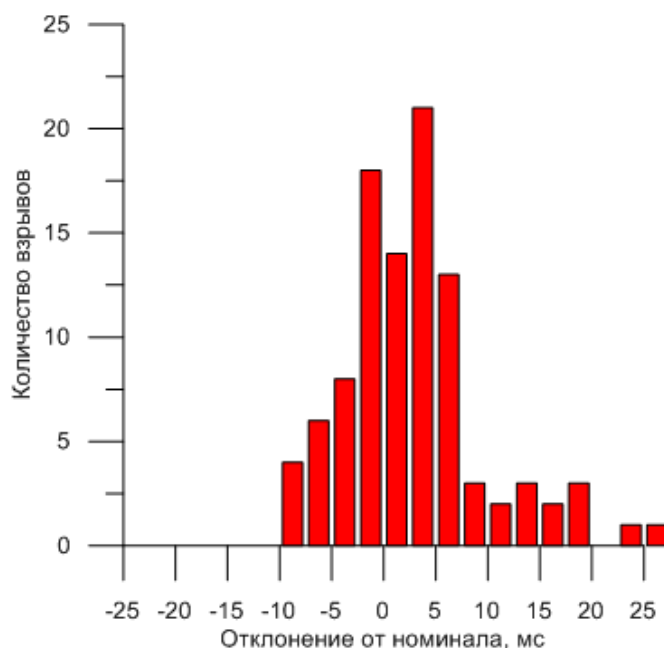


Рис. 2.11. Распределение отклонений замедлений для системы инициирования ИСКРА-С

### 2.3. Влияние грунтовых условий

Под грунтовыми условиями в данной работе понимается совокупность геоморфологических, литологических, гидрогеологических и физико-механических характеристик грунтов в пункте регистрации сейсмического эффекта, влияющих на амплитуду и частотный состав проходящих сейсмических волн. На современном этапе решение такой задачи, как определение сейсмически безопасного расстояния при проектировании БВР, строго регламентировано в соответствующих параграфах Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения». Фактор грунтовых условий учтен в этом нормативном документе в виде интегрального поправочного коэффициента в формулах (1.10)-(1.12). Проблема использования такого формально подхода состоит в том, что практика учета влияния грунтовых условий в виде интегральных поправочных коэффициентов не всегда дает корректный результат. Анализ распределения уровня сейсмического воздействия взрывов на охраняемых территориях, выполненный для различных горнодобывающих объектов, ведущих добычу как

открытым, так и шахтным способом, показывает, что часто разница в интенсивности колебаний объясняется различием резонансных характеристик грунтов, несмотря на то, что согласно классификации ФНП грунты могут быть отнесены к одной категории. То есть, невзирая на схожий характер структурных связей в грунтах и одинаковый литологический состав в разных точках исследуемой территории, реакция грунтов может существенно отличаться. Более того, попадание собственных частот охраняемых сооружений в область резонансного усиления сейсмических воздействий, обусловленных грунтовыми условиями, приводит к дополнительным динамическим нагрузкам. Это значит, что более надежные данные о влиянии грунтов при возможном сейсмическом воздействии могут давать подходы, которые учитывают спектральный состав колебаний.

В виду того, что роль грунтовых условий (резонансных характеристик) в решении задачи оценки и прогноза сейсмического эффекта имеет большое значение, вопросу их изучения посвящено множество экспериментов и исследований [7, 52, 58, 64, 82, 131, 132, 135, 161]. В связи с этим, более подробное описание влияния данного фактора и способы его изучения будут детально рассмотрены в главе 3.

#### **2.4. Влияние рельефа местности**

Существенное влияние на уровень сейсмического воздействия БВР могут оказывать геоморфологические особенности территории. То, что элементы рельефа могут фокусировать сейсмические волны и, соответственно, усиливать их воздействие на поверхностные объекты, является вполне очевидным и давно известным фактом. В одной из последних работ, посвященных этому эффекту [163], на основании цифрового трехмерного моделирования распространения сейсмических волн показано, что в отдельных случаях за счет рельефа их амплитуда может существенно меняться. Наличие относительно сложных инженерно-геологических условий, характеризующихся большим разнообразием мезоформ различного генезиса, в определённой мере оказывает

влияние не только на амплитуду, но и на спектральный состав проходящих сейсмических волн.

Рельеф местности в определенной мере влияет на изменение спектрального состава сейсмических колебаний. Опыт измерения сейсмического эффекта на разных горнодобывающих предприятиях показывает, что нередко случаи, когда на одних и тех же удалениях от взрыва отмечается различное отношение амплитуд объемных и поверхностных волн. Иногда различие амплитуд разнотипных волн может достигать 2-х и более раз.

В качестве примера такой ситуации можно привести карту пространственного распределения параметра отношения амплитуд объемных и поверхностных волн  $A_{PS}/A_L$  (рис. 2.12), построенную для одного из карьеров Саратовской области. Изучаемая местность характеризуется сильно расчлененным рельефом, где перепад высот достигает нескольких десятков метров. Вместе с этим, грунтовые условия изменяются незначительно: грунты в основании всех охраняемых объектов одного литологического состава и относятся ко II категории по сейсмическим свойствам (СП 14.13330-2018). Анализ волновых форм позволил сделать вывод, что сейсмические волны при распространении создают довольно сложную интерференционную картину. Наблюдаемые на объекте инженерно-геологические условия обуславливают перераспределение энергетического вклада объемных и поверхностных волн. Как видно из приведенной карты, участки вблизи карьера характеризуются максимальным сейсмическим эффектом, обусловленным влиянием поверхностных волн, что само по себе является нетипичной картиной. Дело в том, что наблюдаемое явление противоречит теоретическим представлениям, согласно которым амплитуда объемных волн с расстоянием должна убывать быстрее, чем поверхностных. По мере удаления от карьера на запад и восток отмечается как возрастание, так и снижение параметра  $A_{PS}/A_L$ , которое детерминировано, по всей видимости, влиянием рельефа местности, а не различиями в геометрическом расхождении разнотипных волн.

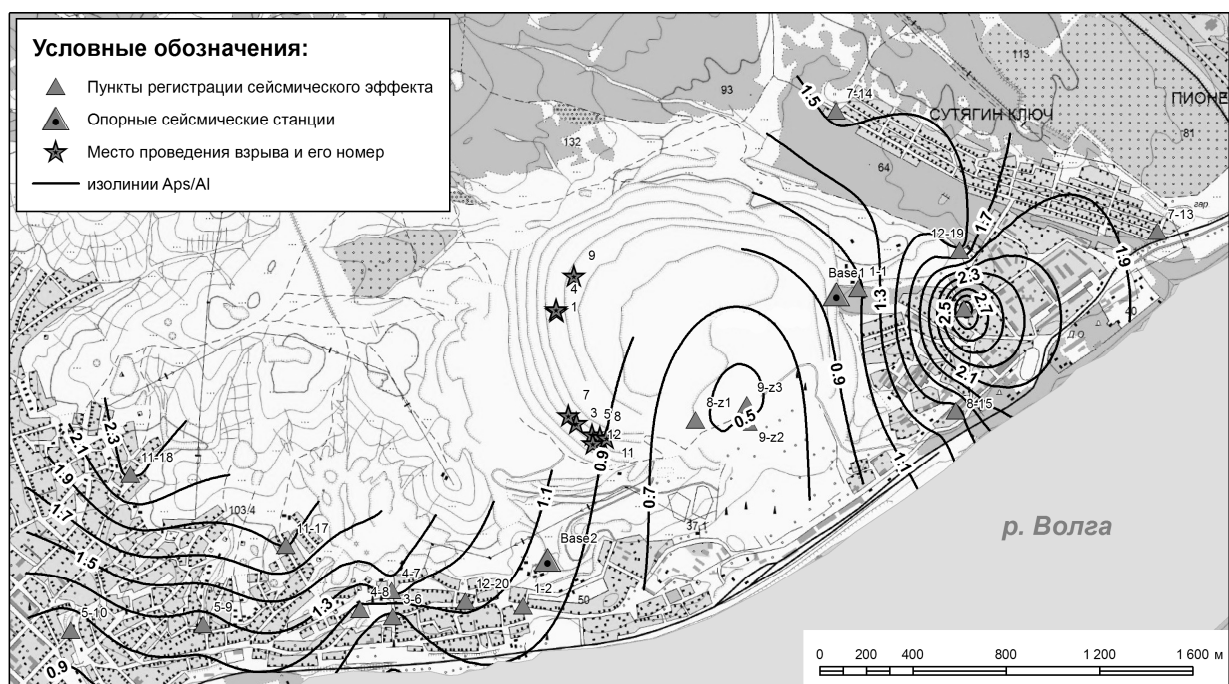


Рис. 2.12. Карта пространственного распределения параметра  $A_{PS}/A_L$

## 2.5. Расстояние от источника до точки измерения и максимальный заряд, приходящийся на одну ступень замедления

Скорость смещения грунта является общепризнанным критерием оценки сейсмического действия взрыва и определяется выражением (1.7). Величина эмпирического коэффициента сейсмичности  $a$  в формуле (1.7) колеблется в очень широких пределах и зависит от местных условий инициирования (особенности технологии БВР) сейсмических колебаний. Величина показателя степени – коэффициента  $b$  - колеблется от 1 до 3, отражая его зависимость от свойств грунта, характера преобладающих сейсмических волн, а также от расположения точки измерения относительно места проведения взрыва. В целом можно сказать, что коэффициент  $b$  является показателем затухания и, соответственно, отвечает за фактор рассеивания и поглощения сейсмических волн на пути их распространения от места взрыва к охраняемому объекту. В области приведенных расстояний, где преобладает поверхностный тип сейсмических волн, коэффициент  $b$  находится в диапазоне 0.5 - 1.2. В области, где максимальное действие оказывают упруго-пластичные объемные волны,  $b$  изменяется, как правило, от 1.3 до 2. На небольших расстояниях, где

распространяются пластические волны сжатия, величина коэффициента  $b$  может достигать 3 и более. Таким образом, показатель степени затухания  $b$  зависит не только от условий геометрического расхождения и поглощения сейсмических волн различного типа, но и от тех потерь энергии, которые наблюдаются при переходе объемных продольных и поперечных волн в поверхностные волны [91]. Возрастание затухания сейсмических волн при приближении к источнику зависит от напряженно-деформированного состояния пород [1]. Необходимо отметить то обстоятельство, что в реальных условиях при разрушении горных пород взрывом генерируются и объемные, и поверхностные сейсмические волны, поэтому при изменении расстояния до точки наблюдения соотношение амплитуд может существенно изменяться. Это означает, что даже для одного конкретного взрыва величина коэффициентов  $a$  и  $b$  для различных диапазонов приведенных расстояний могут не совпадать. Для определения параметров регрессии вида (1.7) специалисты, занимающиеся проблемами сейсмичности взрывов, традиционно используют метод наименьших квадратов, с помощью которого аппроксимируются полученные в ходе прямых инструментальных измерений скорости смещения. Разброс фактических значений также зависит от многообразия и сложности горнотехнических и инженерно-геологических условий. В качестве примера в таблице 2.6 приведем значения коэффициентов  $a$  и  $b$ , определенные экспериментально на разных горнодобывающих объектах (названия объектов указаны условно). В графическом виде эти же аппроксимирующие зависимости представлены на рис. 2.13.

Из представленной таблицы и графиков можно сделать следующие выводы:

1. На различных горнодобывающих объектах в диапазонах одинаковых приведенных расстояний амплитуда сейсмической волны может отличаться более чем на порядок, что обусловлено, главным образом, особенностями технологии БВР на конкретном объекте и другими факторами, влияющими на уровень сейсмического воздействия.

2. При проведении взрывов в прочных породах (хромиты, кварциты, известняки), а также в подземных выработках в гипсе, значение коэффициента  $b$  находится в диапазоне от 1.5 до 1.8, что говорит о преимущественной генерации сейсмических волн объемного типа, а также о влиянии, наравне с

геометрическим расхождением, поглощения волн в среде (наиболее ярко оно проявляется для высокочастотных колебаний).

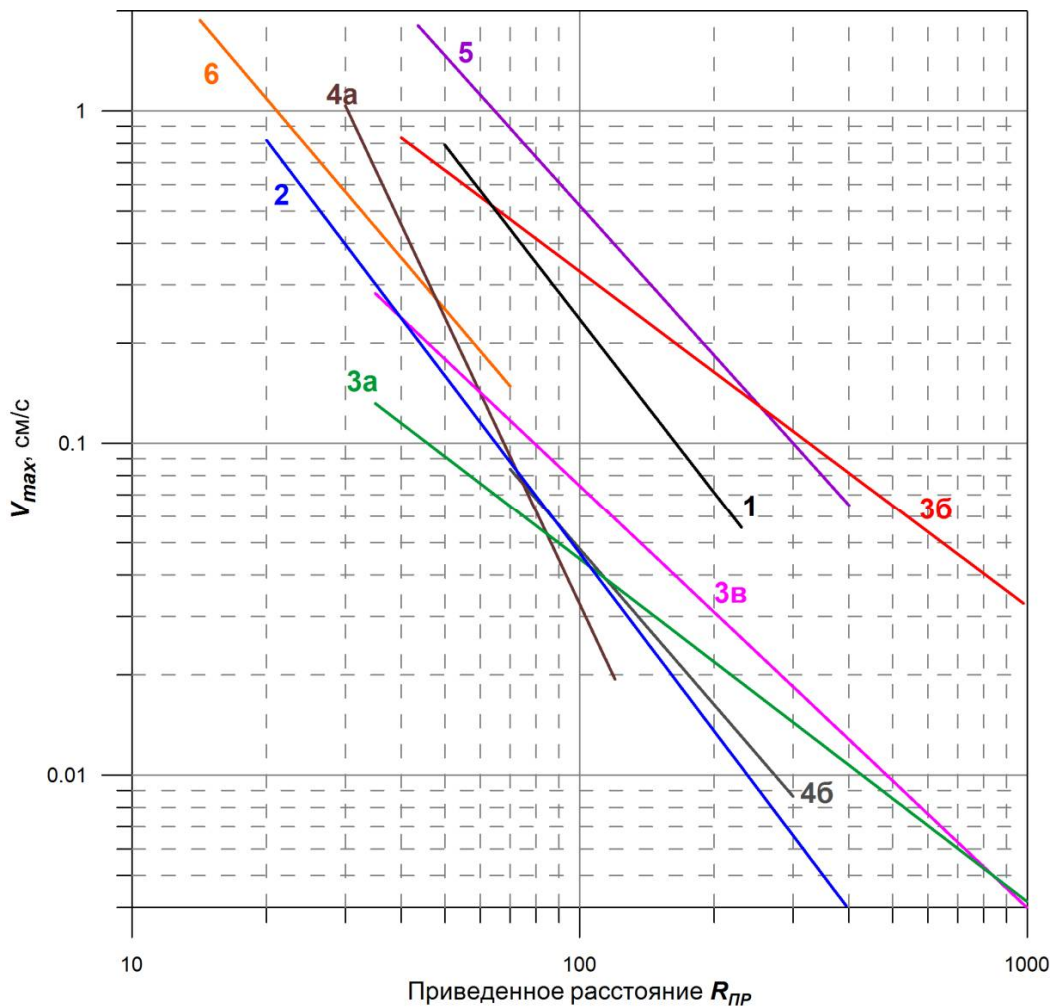


Рис. 2.13. Зависимость векторной скорости смещения от приведенного расстояния для различных горнодобывающих объектов (номера соответствуют таблице 2.6)

3. При взрывных работах в гипсовых карьерах сейсмическая энергия излучается в основном в виде поверхностных волн (коэффициент  $b$  принимает значения от 1 до 1.3).

4. При проведении измерений непосредственно над забоем гипсовой шахты и в ближайших его окрестностях наблюдается крайне резкое убывание амплитуды сейсмической волны с расстоянием. Такая ситуация может быть связана с влиянием направленности излучения сейсмической волны в вертикальном направлении. Следствием этого является также высокое значение коэффициента сейсмичности (например, зависимость 4а в таблице 2.6).



Таблица 2.6.

Значения расчетных коэффициентов для разных горнодобывающих объектов

№ п/п	Объект	<i>a</i>	<i>b</i>	Диапазон <i>R<sub>ЛР</sub></i> , м/кг <sup>1/3</sup>
1	Хромитовый рудник	715	1.74	50 – 230
2	Известняковый карьер	169	1.80	20 – 4000
3	а) Гипсовый карьер №1	51.3	1.03	35 – 10000
	б) Гипсовый карьер №2	34.5	1.01	40 – 1500
	в) Гипсовый карьер №3	25.8	1.27	35 – 2000
4	а) Гипсовая шахта (наблюдения над забоем)	18000	2.87	30 – 120
		63.2	1.56	60 – 300
5	Карьер железной руды №1	520	1.50	30 – 400
6	Карьер железной руды №2	127	1.59	2 – 70

## 2.6. Затухание сейсмических волн на пути их распространения от места взрыва к охраняемому объекту

Интенсивность сейсмического воздействия в конкретной точке среды зависит также от скорости затухания сейсмических волн, которое определяется не только влиянием перечисленных выше факторов, но и состоянием массива пород на пути распространения от места взрыва к охраняемому объекту. Определение сейсмически безопасных расстояний с помощью регламентированных формул в общем случае предполагает, что сейсмические волны от места взрыва до защищаемого сооружения проходят по сравнительно однородному массиву. Однако каждый конкретный массив горных пород характеризуется своим напряженно-деформированным состоянием, имеет свои уникальные границы раздела среды и нарушения. В подобной ситуации сейсмические волны при распространении могут образовывать сложную интерференционную картину, что приводит к значительным колебаниям их амплитуды с расстоянием.

При наличии границы (границ) раздела сред продольные и поперечные претерпевают преломление и отражение. Таким образом, часть волны проникает в нижележащую среду, а другая часть отражается границей. Это обуславливает

формирование различных классов сейсмических волн (прямые проходящие, однократно- и многократно отраженные, преломленно-отраженные и отраженно-преломленные, и другие). Помимо этого, при наклонном падении волны на границу, кроме монотипных, формируются обменные (как отраженные, так и проходящие) волны.

Следствием сложной волновой картины на границе раздела земля-воздух является возникновение поверхностных волн. Волны, у которых плоскости колебания частиц среды вертикальны и параллельны направлению распространения, называются волнами Рэлея. Помимо поверхностных волн Рэлея, возможно формирование поперечных поверхностных волн Лява, смещение на фронте которых перпендикулярно к направлению их распространения.

Распространяясь, поверхностная волна характеризуется двумерным затуханием, в отличие от трехмерного, свойственного для продольных и поперечных волн объемного типа. В связи с этим, общее затухание поверхностных волн довольно ограничено, в идеально упругой среде их амплитуда обратно пропорциональна корню квадратному из расстояния до источника, тогда как для объемных волн затухание обратно пропорционально степени  $3/2$  [91]. Вследствие этого, по мере удаления от источника колебаний, роль поверхностной волны с точки зрения сейсмического воздействия возрастает. Поэтому с позиции сейсмической защиты инженерных зданий и сооружений на относительно больших расстояниях, высокая интенсивность и низкая частота поверхностных волн представляют максимальный интерес.

Существенным фактором, влияющим на волновую картину, является наличие экранирующих выработок, при этом волногасящие свойства экрана будут зависеть от его геометрии и размеров, а также от природы и характеристик падающих на него волн.

Учет влияния состояния массива пород на пути распространения сейсмических волн определяется также возможным наличием в геологическом разрезе слоя с пониженным значением скорости, служащего волноводом сейсмических волн. По такому каналу сейсмические волны могут распространяться с минимальными потерями интенсивности колебаний. Это

может привести к серьезным дополнительным нагрузкам на охраняемые объекты, попадающие в область влияния волновода. Необходимо отметить, что увеличение сейсмического воздействия взрыва в случае наличия волновода зависит и от самих условий взрывания: при длине сейсмической волны, существенно отличной от размеров волновода, его влияние может быть незначительным.

## **2.7. Определение параметра затухания сейсмических волн и коэффициента сейсмичности на основе инструментальных измерений серии взрывов**

Важным этапом обработки данных инструментальных измерений сейсмического воздействия взрывов является корректное определение эмпирического коэффициента сейсмичности  $a$  и показателя затухания волн  $b$  формулы (1.7). Обычно данные параметры регрессии определяются методом наименьших квадратов, поэтому надежность их определения напрямую зависит от объема и качества исходных данных. При одном взрыве объем исходных данных ограничен количеством пунктов измерения. Имея ограничения в инструментальном обеспечении измерений, часто прибегают к накоплению данных в ходе реализации нескольких взрывов. Сложность корректного определения эмпирических коэффициентов по серии взрывов связана, главным образом, со значительным разбросом амплитуд сейсмических волн от разных взрывов. Причина такого разброса в том, что амплитуда сейсмического воздействия каждого отдельного взрыва зависит одновременно от множества трудноучитываемых и порой случайных факторов. Как было показано ранее, выявление влияния каждого из них возможно только в результате проведения множества специальных экспериментов, организовать которые на производстве не всегда представляется реальным. Это касается, прежде всего, параметров, которые характеризуют сам источник: степень трещиноватости и обводненности взрываемого блока, качество забойки, направленность излучения сейсмической волны, точность работы системы инициирования и др.

Если принять во внимание, что фактическая величина сейсмического воздействия взрыва в каждом отдельном случае обусловлена не только влиянием

вышеописанных факторов, но и их случайными отклонениями, часть из которых учесть не представляется возможным, то подход раздельного выявления их влияния посредством множества специальных экспериментов представляется весьма затратным и практически труднореализуемым. Более перспективным подходом видится попытка минимизации влияния всех случайных факторов одновременно (интегрально), что также потребует организации специальных экспериментальных замеров, но стоит организовать такие эксперименты так, чтобы они мало отличались от обычных замеров сейсмического эффекта. Основой для планирования такого эксперимента может стать следующий принцип. Если имеется возможность разделить все факторы, оказывающие влияние на сейсмический эффект, на три группы:

- 1) известные факторы, которые можно точно измерить;
- 2) неизвестные факторы, которые можно зафиксировать или обеспечить их неизменность в серии экспериментов;
- 3) прочие неизвестные факторы, которые нельзя ни измерить, ни жестко зафиксировать;

- то влияние третьей группы может быть выявлено интегрально из первых двух групп. Очевидно, что в первую группу попадают измеряемые амплитуды колебаний и расстояния между источником и пунктами измерения. Будем считать, что приведенные расстояния, учитывающие массу ВВ, также относятся к первой группе, хотя также будем иметь в виду, что некоторая незначительная часть ВВ может не взорваться и, таким образом, уйти в третью группу факторов. Во вторую группу можно отнести грунтовые условия, рельеф, среду распространения волн, которые не зависят от взрывов и если меняются, то очень медленно (во временных рамках экспериментов их изменениями можно пренебречь) или меняются только по плану самого эксперимента. Все остальные факторы, в том числе и те, которые не были упомянуты в силу их малозначительности, следует отнести в третью группу.

Таким образом, для минимизации влияния третьей группы факторов и наиболее корректного определения величин эмпирических коэффициентов зависимости вида (1.7) среди прочих измерений предлагается проводить измерения сейсмического эффекта взрывов на опорной (стационарной, или

базовой) сейсмической станции. Опорная станция во время проведения всех измерений должна располагаться в одном и том же пункте, позволяя зафиксировать возможное влияние грунтов в этом пункте (требования к расположению опорной сейсмической станции будут представлены в разделе 4.1) для всей серии экспериментальных взрывов. Фиксируя в опорной точке грунтовые условия и имея точные данные о расстоянии до источника, отклонения в ожидаемом сейсмическом воздействии при известной массе ВВ можно интерпретировать как влияние всех неучтенных отклонений в параметрах самого источника. Учет данного отклонения выполняется в рядовых точках измерения посредством расчета нормированных приведенных расстояний ( $R_{\text{пр.норм}}$ ) и нормированных амплитуд ( $A_{\text{норм}}$ ), представляющих собой отношения приведенных расстояний ( $R_{\text{пр.и}}$ ) и измеренных амплитуд ( $A_{\text{и}}$ ) к таковым на опорном пункте ( $R_{\text{пр.о}}$  и  $A_{\text{о}}$ ):

$$R_{\text{пр.норм}} = \frac{R_{\text{пр.и}}}{R_{\text{пр.о}}}, \quad (2.2)$$

$$A_{\text{норм}} = \frac{A_{\text{и}}}{A_{\text{о}}}. \quad (2.3)$$

Используя отношение двух выражений вида (1.7) для рядового пункта измерения и для опорного пункта, легко получить следующее выражение:

$$A_{\text{норм}} = R_{\text{пр.норм}}^{-b}, \quad (2.4)$$

которое не содержит влияние источника, а значит и влияние случайного отклонения его параметров, которые при обычных наблюдениях уходят в ошибку определения эмпирических коэффициентов  $a$  и  $b$ . Далее, по полученным зависимостям нормированных амплитуд от нормированных расстояний легко определить показатель степенной функции  $b$ , который характеризует затухание волн.

Анализ результатов натуральных измерений показал, что использование нормированных значений значительно повышает устойчивость определения коэффициента  $b$ : величина среднеквадратического отклонения  $\sigma$  нормированных амплитуд (графики  $a$ ,  $б$ ,  $в$  на рис. 2.14) от аппроксимирующей функции до 2 раз ниже, чем для исходных измерений (графики  $г$ ,  $д$ ,  $е$  на рис. 2.14). Коэффициент взаимной корреляции  $R$  нормированных данных становится выше.

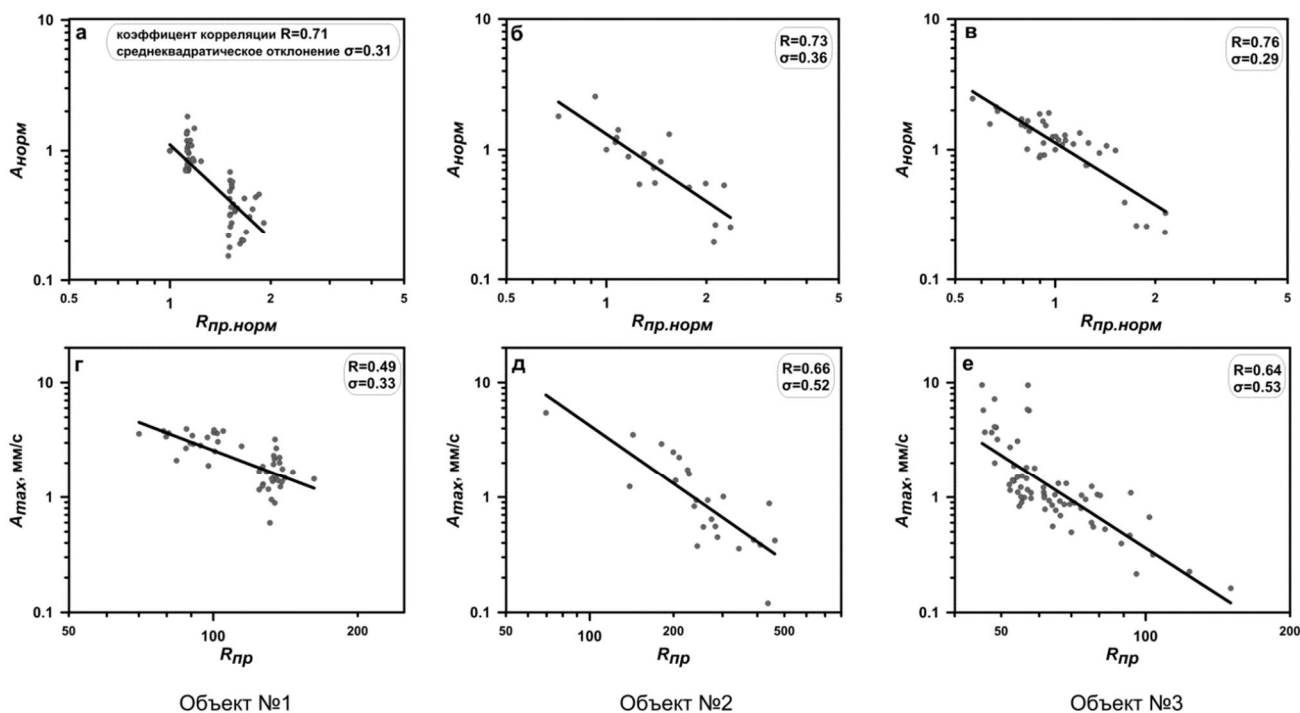


Рис. 2.14. Сравнение зависимостей нормированных амплитуд от нормированных приведенных расстояний (а, б, в) с аналогичными зависимостями без нормирования скорости смещения грунта и приведенных расстояний (г, д, е) для разных объектов

Определив таким образом коэффициент  $b$ , можно, используя уже не нормированные, а исходные величины скоростей и приведенных расстояний, рассчитать величину коэффициента сейсмичности  $a$  [32]. Затем, используя найденные эмпирические коэффициенты, можно получить формулы для прогнозных оценок величины сейсмического воздействия. Или, задавшись максимально допустимой величиной сейсмического воздействия по РБ Г-05-039-96, получить формулы для расчета сейсмически безопасного расстояния.

Таким образом, использование опорной сейсмической станции при инструментальных измерениях сейсмического эффекта взрывов позволяет компенсировать влияние случайных факторов, связанных с условиями взрывания (степень трещиноватости взрываемого блока, качество забойки и т.д.), и повысить надежность определения величины затухания сейсмических волн в среде.

## 2.8. Выводы

В ходе выполнения экспериментальных работ по оценке влияния факторов, влияющих на величину и спектральный состав сейсмического воздействия взрывов, получены следующие выводы:

1. Стандартный способ определения сейсмически безопасных расстояний по формулам 1.10-1.12 (ФНП) учитывает далеко не все факторы, которые влияют на амплитуду сейсмического воздействия. Натурные измерения показывают, что диапазоны изменений условий взрывания, свойств грунта в основании здания гораздо шире, чем представлено в ФНП.

2. Решение задачи корректного определения сейсмически безопасных расстояний возможно только на основании натурных измерений, позволяющих учесть всю совокупность факторов, влияющих на образование и распространение сейсмических волн.

3. Область использования факторов, связанных с параметрами БВР, для управления уровнем сейсмического воздействия существенно ограничена горнотехническими показателями взрыва и другими техническими особенностями производства и не позволяет в полной мере регулировать уровень сейсмического воздействия.

4. Раздельный учет множества факторов, влияющих на сейсмический эффект, возможен при условии организации серии специальных экспериментальных работ. Однако выявление влияния каждого фактора в отдельности весьма затратно и не всегда способствует повышению качества решения задачи прогноза сейсмического воздействия или задачи корректной оценки безопасных расстояний.

5. Наиболее перспективным и технически просто реализуемым является подход с использованием интегральной оценки отдельной группы трудноучитываемых факторов со значительной случайной составляющей через точное измерение и фиксирование других параметров взрыва. Способ, основанный на использовании опорной сейсмической станции, позволяет повысить надежность определения параметра затухания сейсмических волн в среде и компенсировать случайные факторы, связанные с условиями взрывания.

### ГЛАВА 3. ОЦЕНКА И УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ГРУНТОВЫХ УСЛОВИЙ (РЕЗОНАНСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТА) НА ИНТЕНСИВНОСТЬ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Как упоминалось выше, среди множества факторов, определяющих уровень сейсмического воздействия от природных и техногенных источников на охраняемые и проектируемые здания и сооружения, многие исследователи выделяют фактор грунтовых условий (или резонансных характеристик грунта). Влияние данного фактора заключается в том, что верхняя толща пород, которая существенно отличается своими физическими свойствами от нижележащей, обладает избирательностью к ослаблению/усилению колебаний определенной полосы частот. Изменения в амплитуде сейсмического сигнала, происходящие на глубинах в первые десятки метров, могут составлять до нескольких раз. Такое явление обусловлено различием сейсмических импедансов, эффектами интерференции (между верхними слоями и земной поверхностью) волн, а также собственными колебаниями грунтовой толщи. В мировой сейсмологии данное явление хорошо изучено и широко известно под названием “site effect” [64, 131, 132, 149, 161].

Важность, а также необходимость изучения и учета грунтовых условий при оценке сейсмического воздействия буровзрывных работ, отмечается как в нормативной документации (РБ Г-05-039-96, ГОСТ Р 52892-2007, ФНП “Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения”), так и в научной литературе [58, 64, 91, 128, 135].

В работе [91] показана необходимость учета горно-геологической обстановки в условиях мягких вскрышных пород, подстилаемых толщей скальных пород с акустической жесткостью в 4-5 раз более высокой, чем у вскрышных пород. Отмечено, что в случае совпадения мощности вскрышных пород с длиной сейсмических волн, отражение и выход их на поверхность происходит при существенном повышении амплитуды колебаний.

Одной из особенностей изменения сейсмических колебаний за счет грунтовых условий является проявление нелинейного характера распределения



физико-механических свойств грунтов. Это выражается в сложной зависимости напряжений и деформаций во временной области и проявляется при колебаниях разной интенсивности. Усиление колебаний складывается из влияния двух факторов: собственно возрастания амплитуды волны в низкоскоростных слоях и усиления колебаний за счет резонансных эффектов. Наличие резонансного эффекта на частотах, совпадающих с собственными частотами подвергающихся сейсмическому воздействию охраняемых инженерных сооружений, может привести к дополнительным нагрузкам на конструкцию.

В общем случае различие интенсивности колебаний на грунтах разного состава объясняется их физическими свойствами, объективно влияющими на амплитуду и частоту сейсмических волн. Прежде всего, это плотность пород и скорость распространения волн. Согласно современным представлениям, изложенным в СП 283.1325800.2016 (Объекты строительные повышенной ответственности. Правила сейсмического микрорайонирования), амплитуда колебаний в среде обратно пропорциональна ее сейсмической жесткости, представляющей собой произведение скорости поперечной волны в грунте на плотность грунта. В связи с этим на более плотных коренных породах здания и сооружения страдают значительно меньше, чем на рыхлых и менее плотных. Изменчивость свойств грунтов разных типов влияет на изменение интенсивности колебаний и оценивается по следующим показателям [50]:

- для скальных грунтов – по петрографическому составу и степени выветрелости;
- для крупнообломочных грунтов – по гранулометрическому и петрографическому составу, количеству песчано-глинистого заполнителя, степени влажности и плотности;
- для песчаных грунтов – по гранулометрическому составу, плотности сложения и степени влажности;
- для глинистых грунтов – по гранулометрическому составу (числу пластичности), показателю консистенции, коэффициенту пористости и плотности.

Вместе с этим, изменение интенсивности сейсмических колебаний на земной поверхности зависит от глубины залегания грунтовых вод, степени

влажности самих грунтов и мощности водонасыщенной толщи [55]. В целом, существенное повышение интенсивности сейсмических колебаний в основании охраняемых зданий и сооружений наблюдается при уровне грунтовых вод (УГВ) менее 10 м. В работе [63] отмечается связь УГВ с изменением интенсивности землетрясения в г. Ашхабад 6 октября 1948 г. При этом подчеркивается, что изменение УГВ в суглинках на глубине больше 10 м никак не сказывается на величине сейсмического эффекта. Вместе с этим, изменение УГВ от 4 до 10 м может сопровождаться существенным увеличением скорости колебаний грунта при сейсмическом воздействии.

Таким образом, благоприятными в сейсмическом отношении являются ненарушенные плотные скальные породы. Сильно выветрелые или нарушенные геологическими процессами породы, просадочные грунты, районы осыпей, плывунов, грунты с высоким УГВ, районы горных выработок являются относительно неблагоприятными для устройства оснований инженерных сооружений.

Изучение влияния грунтовых условий в рамках работ по оценке сейсмического действия взрывов на охраняемые здания и сооружения тесно связано с решением задач сейсмического микрорайонирования (СМР) – вида инженерно-геологических изысканий, проводимых для обоснования сейсмичности площадки строительства проектируемых зданий и сооружений. Предмет изучения сейсмического микрорайонирования – это сейсмические свойства грунтов и подстилающих пород, их мощности, геоморфологические особенности исследуемой территории. Результатом СМР являются приращения сейсмической интенсивности возможных землетрясений за счет локальных грунтовых условий к базовым величинам, которые берутся в основном из карт общего сейсмического районирования (ОСР).

Информация о пространственной изменчивости грунтовых условий на исследуемой территории является чрезвычайно полезной для истолкования неравномерности уровня сейсмического воздействия взрывов. Наличие таких данных позволяет перейти к решению задачи корректного прогноза величины сейсмического воздействия взрывов.

### 3.1. Анализ влияния мощностей слоев и физических свойств слагающих пород на резонансные характеристики грунта

Привлечение аналитических расчетов может показать, какие именно изменения в регистрируемом волновом поле стоит ожидать в связи с различной морфологией слагающих пород верхней части разреза. В качестве примера для демонстрации влияния мощностей и физических свойств слагающих пород на уровень оказываемого сейсмического воздействия выполним анализ грунтовых условий для двух участков с инженерно-геологическими условиями, имеющими незначительные различия. Инженерно-геологические условия первого участка (условное название - S01) представлены сейсмогеологической моделью, характеризующейся сравнительно плотными отложениями верхней части разреза (таблица 3.1), которые прослежены на глубину до 60 м. Второй вариант инженерно-геологических (таблица 3.2) условий (условное название участка - S02) представляет собой копию сейсмогеологической модели из таблицы 3.1 с добавлением в верхней части разреза двух толщ общей мощностью более 4.5 метров, сложенных сильно выветрелым разрушенным суглинком с линзами песка, а также небольшим почвенно-растительным слоем.

Фактор уровня грунтовых вод в сейсмогеологических моделях заложен не был, а коэффициенты демпфирования (поглощения) для всех слоев были взяты равными 0.05.

Самыми показательными результатами расчета (выполнен с помощью пакета *DeepSoil 6.0*) являются амплитудно-частотные характеристики усиления горизонтально поляризованных поперечных волн для построенных выше моделей среды – кривые резонансных усилений. Как видно из рисунка 3.1, присутствие в верхней части разреза слоев с относительно небольшой удельной плотностью и пониженными скоростями *P*- и *S*-волн может обуславливать существенное усиление отклика на оказываемое сейсмическое воздействие. Кривая резонансных усилений, соответствующая второму типу инженерно-геологических условий (таблица 3.2) и характеризующаяся менее плотными грунтами у поверхности обозначена на рисунке пунктирной линией. Осложненная пиками с максимумами в районе 3.3, 7.4 и 11.4 Гц кривая усилений

характеризуется величинами усиления 2 и более. Вместе с этим, более высокоскоростной разрез (сплошная линия), верхняя часть которого сложена плотными породами, дает менее интенсивный отклик на сейсмическое воздействие и совершенно на других частотах.

Таблица 3.1.

Параметры сейсмогеологической модели участка S01

№ слоя	Характеристика грунта	$V_p$ , м/с	$V_s$ , м/с	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Мощность слоя, м
1	Суглинок плотный, песчанистый	660	350	2.1	4.6
2	Глина темно-серая, жирная, плотная	770	400	2.3	6.3
3	Глина плотная с прослойками известняка и сланца	1010	530	2.3	27.0
4	Песчаник плотный с прослоями глины	1950	1020	2.4	>20

Таблица 3.2.

Параметры сейсмогеологической модели участка S02

№ слоя	Характеристика грунта	$V_p$ , м/с	$V_s$ , м/с	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Мощность слоя, м
1	Почвенно-растительный слой	304	160	1.8	0.5
2	Суглинок разрушенный, с линзами кварцевого песка	320	180	1.9	4.3
3	Суглинок плотный, песчанистый	660	350	2.1	4.6
4	Глина темно-серая, жирная, плотная	770	400	2.3	6.3
5	Глина плотная с прослойками известняка и сланца	1010	530	2.3	27.0
6	Песчаник плотный с прослоями глины	1950	1020	2.4	>20

Продемонстрированные отличия в отклике разных грунтов на сейсмические воздействия находят отражение в параметрах синтетических сейсмограмм (рис.

3.3), полученных в результате симуляции прохождения волн от массового взрыва (рис. 3.2) через модельные разрезы снизу вверх.

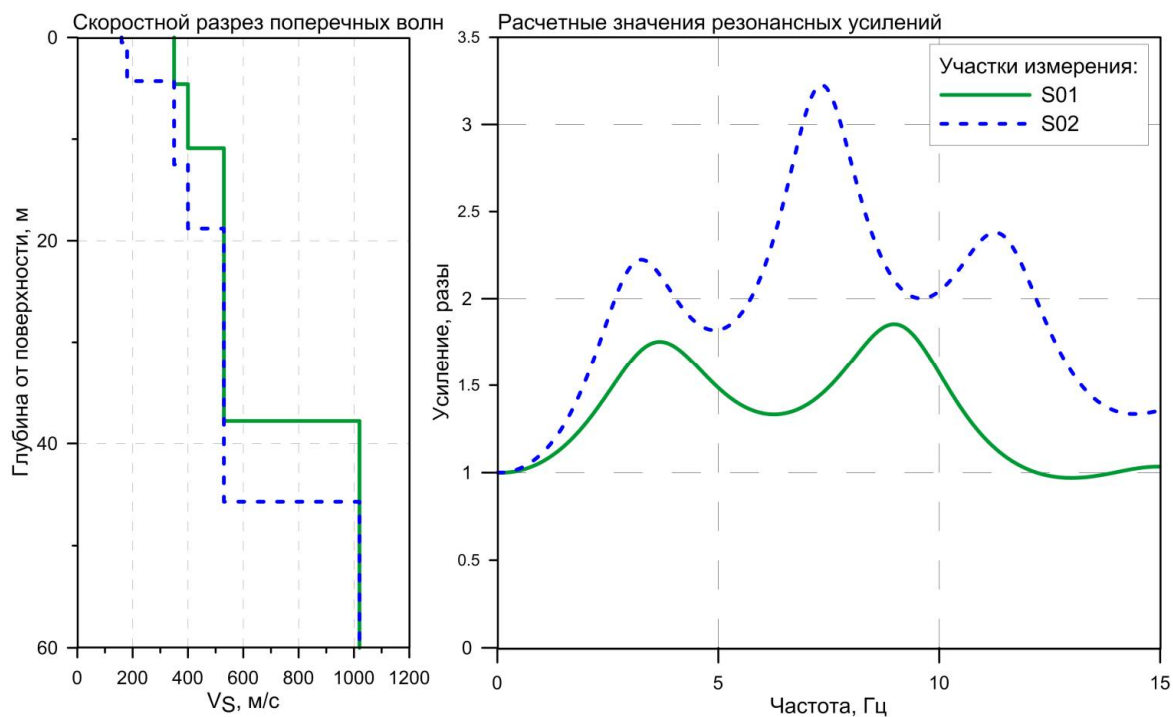


Рис. 3.1. Скоростные разрезы поперечных волн и соответствующие им резонансные характеристики

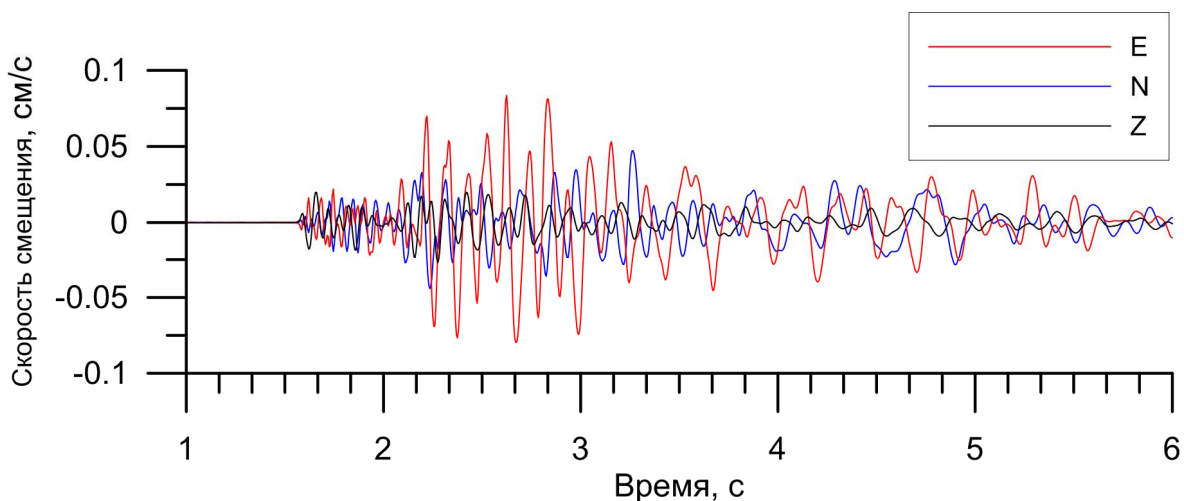


Рис. 3.2. Запись массового взрыва, используемая для расчета синтетических велосиграмм

Сопоставляя полученные сейсмограммы на рис. 3.3, можно сказать, что ожидаемые максимальные скорости смещения на тестовом участке S02 будут больше скоростей смещения, ожидаемых на участке S01 для такого же воздействия, более чем на 20% (0.20 см/с против 0.16 см/с).

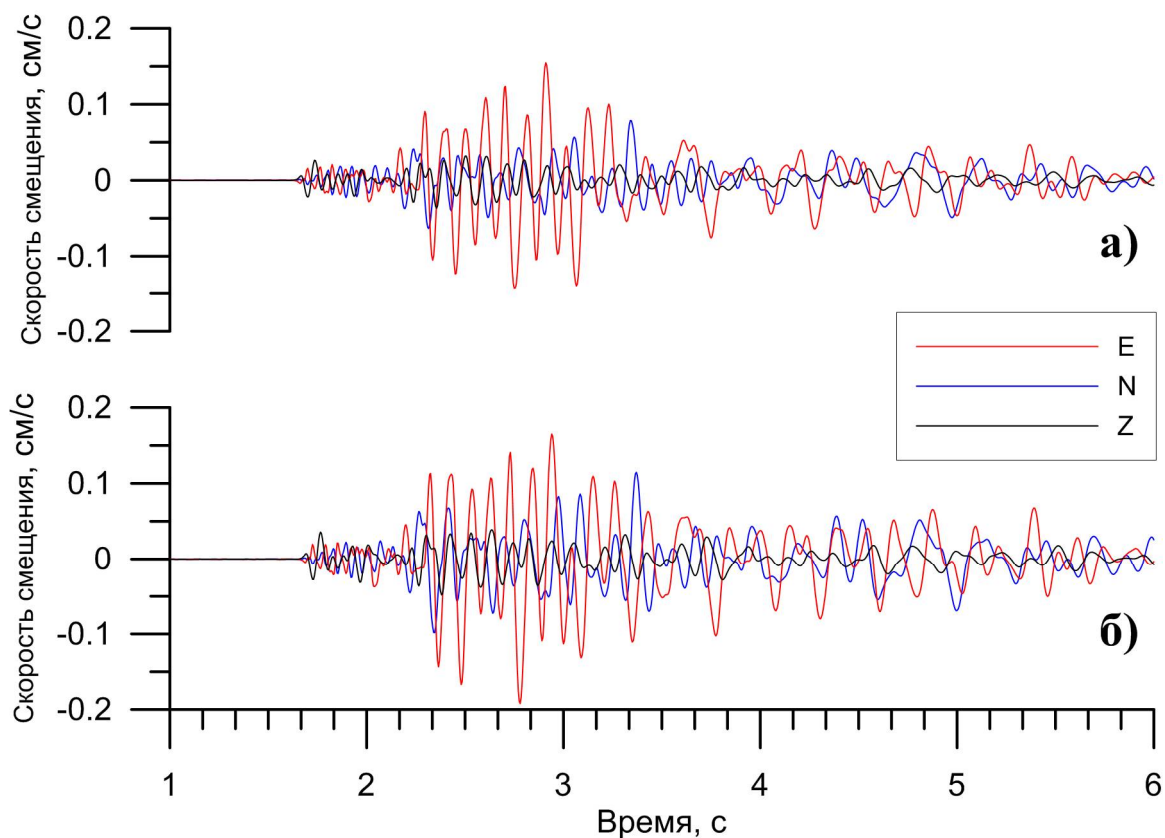


Рис. 3.3. Расчетные сейсмограммы для участков S01 (а) и S02 (б)

Приведенный пример показывает, что во многих реальных ситуациях, даже когда имеются сведения о почти полном сходстве литологического состава слагающих приповерхностную толщу пород, ни одним нормативным способом нет возможности оценить не только величину влияния грунтов, но и резонансные частоты, на которых это влияние будет иметь наибольшее значение.

### *3.1.1. Влияние вариаций гидрогеологических и сезонных условий*

Как говорилось ранее, изменение интенсивности сейсмических колебаний на земной поверхности обусловлено, в том числе, гидрогеологическими условиями, в частности, глубиной залегания грунтовых вод (уровень грунтовых вод – УГВ), степенью влажности самих грунтов и мощностью водонасыщенной толщи [55]. Необходимо отметить, что положение УГВ на конкретном участке может существенно меняться в зависимости от времени года. Более, того на спектральные (резонансные) характеристики может также оказывать влияние глубина промерзания грунта.

Для более детального изучения возможного изменения интенсивности сейсмических колебаний на земной поверхности, которые обусловлены вариациями гидрогеологических (УГВ) и сезонных условий (промерзание грунта), была поставлена и реализована следующая серия экспериментов. На участке с меняющимся УГВ в течение года (для изучения влияния сезонных условий) проведена серия наблюдений методом регистрации взрывов (метод СМР) [106, 107], способом Накамуры (метод *HVSR*) [155], а также методом спектрального анализа поверхностных волн (*SASW*) [168].

Тестовый полигон располагался вблизи Кунгурской ледяной пещеры (Пермский край, Кунгурский район). Данный участок, расположение которого представлено на рис. 3.4, характеризуется инженерно-геологическими условиями, обусловленными близким расположением русла р. Сытва.

Свойства грунтов (рис. 3.5) известны по результатам бурения разведочных скважин в непосредственной близости от тестового полигона. Информация об уровне грунтовых вод регулярно фиксируются в составе мониторинговых работ, проводимых в пещере. При среднем УГВ 8 м, диапазон изменения в течение года не превышает 1.5 м.

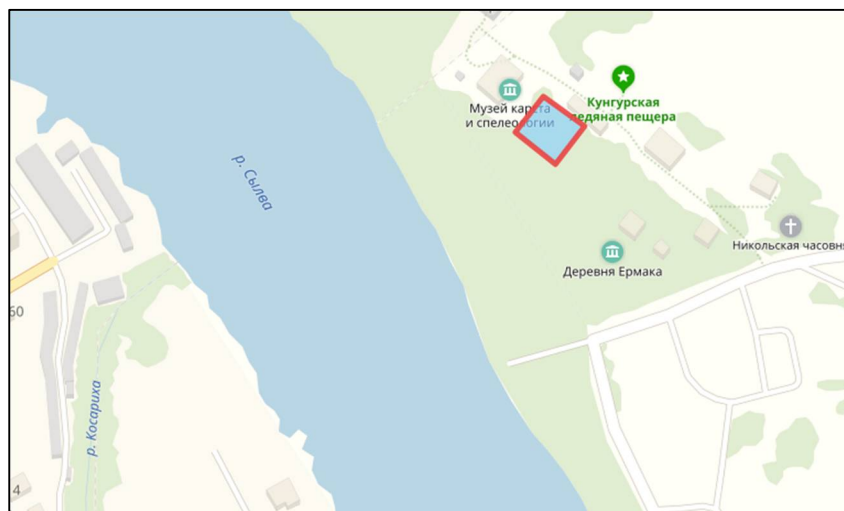


Рис. 3.4. Расположение тестового полигона (красный прямоугольник)

Для реализации серии экспериментов использовались данные двух сейсмических станций. Одна сейсмическая станция была установлена на период проведения экспериментов на территории тестового полигона (исследуемый грунт), тогда как вторая располагалась на скальных грунтах непосредственно в пещере (грунты I категории по сейсмическим свойствам). Также была

реализована серия ежемесячных (режимных) измерений на территории тестового полигона для изучения характера изменения скоростного разреза методом *SASW*.

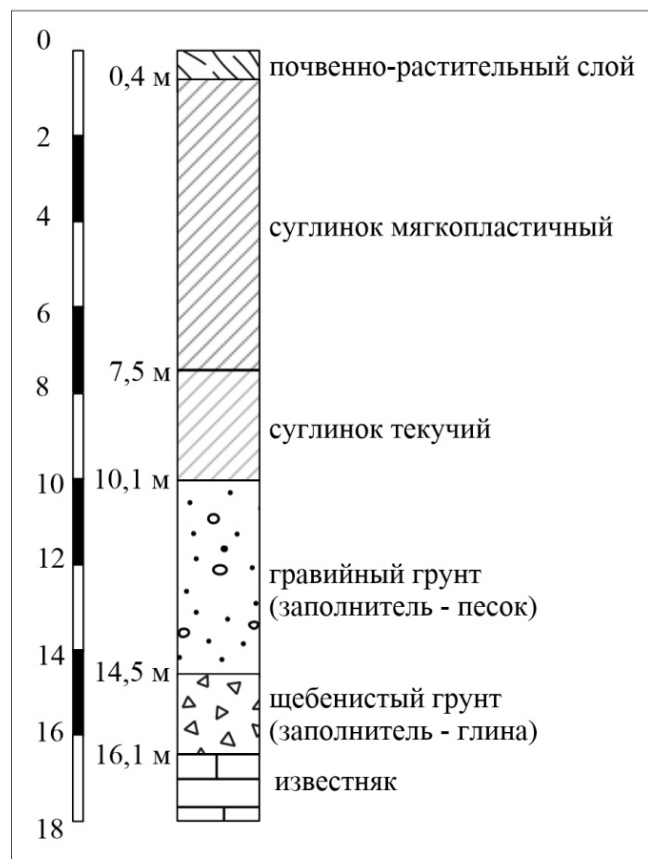


Рис. 3.5. Изучаемый интервал разреза

Взрывные работы, проводимые на карьере строительного камня, расположенного в 20 км от тестового полигона, позволили оценить разницу в отклике отличных по свойствам грунтов на сейсмическое воздействие, а также реализовать метод регистрации взрывов. На рис. 3.6 представлен амплитудный спектр сейсмического сигнала взрыва, зарегистрированного обеими станциями. Из рисунка можно сделать вывод о значительном влиянии рассматриваемых грунтовых условий: разница зарегистрированных амплитуд достигает более порядка.

Поскольку взрывные работы на данном карьере выполняются сравнительно редко, не удалось выполнить оценку изменения спектральных свойств грунтов в зависимости от сезонных условий. Однако оценка усилений, полученная по зарегистрированному взрыву, позволяет говорить о наличии резонанса на частоте 5 Гц (рис. 3.6).



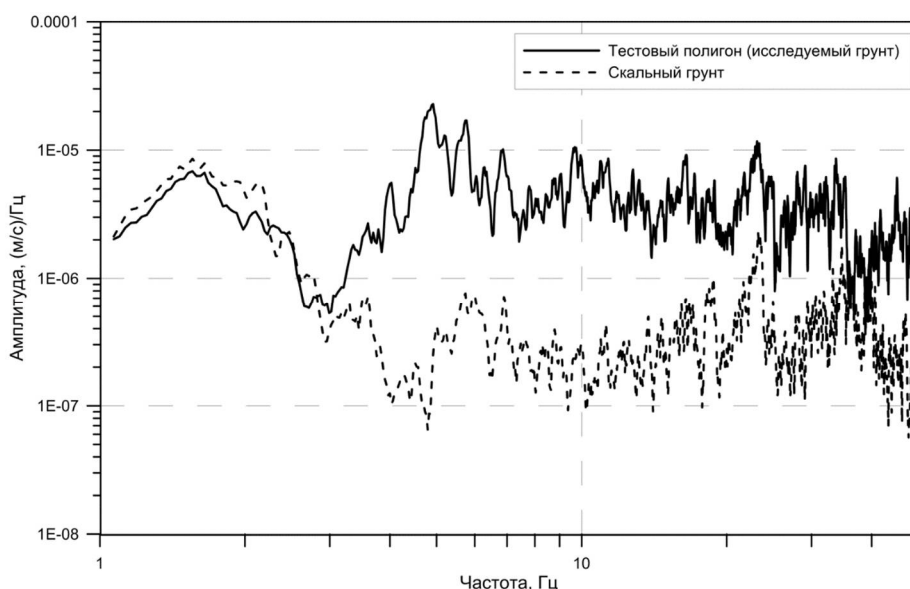


Рис. 3.6. Амплитудные спектры горизонтальной компоненты зарегистрированного взрыва (эпицентральное расстояние 20 км)

Использование трехкомпонентного сейсмоприемника на временной станции позволило получить резонансные характеристики способом Накамуры (метод *HVSR*). Изменение поляризационных спектров на исследуемом грунте представлено на рис. 3.7. Необходимо отметить, что спектры, полученные способом Накамуры, претерпевают существенные изменения в зависимости от времени наблюдений. Вместе с этим, частота резонансной гармоники постоянна и совпадает с частотой, полученной методом регистрации взрывов. Величина максимального усиления колебаний (на частоте 5 Гц) изменяется от 6.5 до 9. При этом явной зависимости от сезонных условий выявлено не было. Интегральная величина усиления в диапазоне 1-10 Гц – от 2.4 до 3.8.

Кроме описанных выше подходов, в рамках экспериментальных исследований были реализованы измерения методом *SASW*, основанные на частотно-скоростной дисперсии поверхностных волн. Измерения проводились (раздел 3.2.3) как в активном (профиль с расстоянием между сейсмоприемниками 5 м), так и в пассивном режиме (пространственная расстановка с радиусом 15 и 30 м). Данные геологоразведочного бурения позволили достоверно выполнить инверсию полученных дисперсионных кривых в скоростной разрез поперечных волн. Скоростной разрез, в свою очередь, послужил основой для аналитического расчета спектральных характеристик грунтов (с помощью пакета *DeepSoil 6.0*). Представленная на рис. 3.8 кривая

резонансных усилений, соответствующая полученному скоростному разрезу поперечных волн, говорит также о наличие максимума на частоте 5 Гц. При этом величина максимального усиления достигает 4.9.

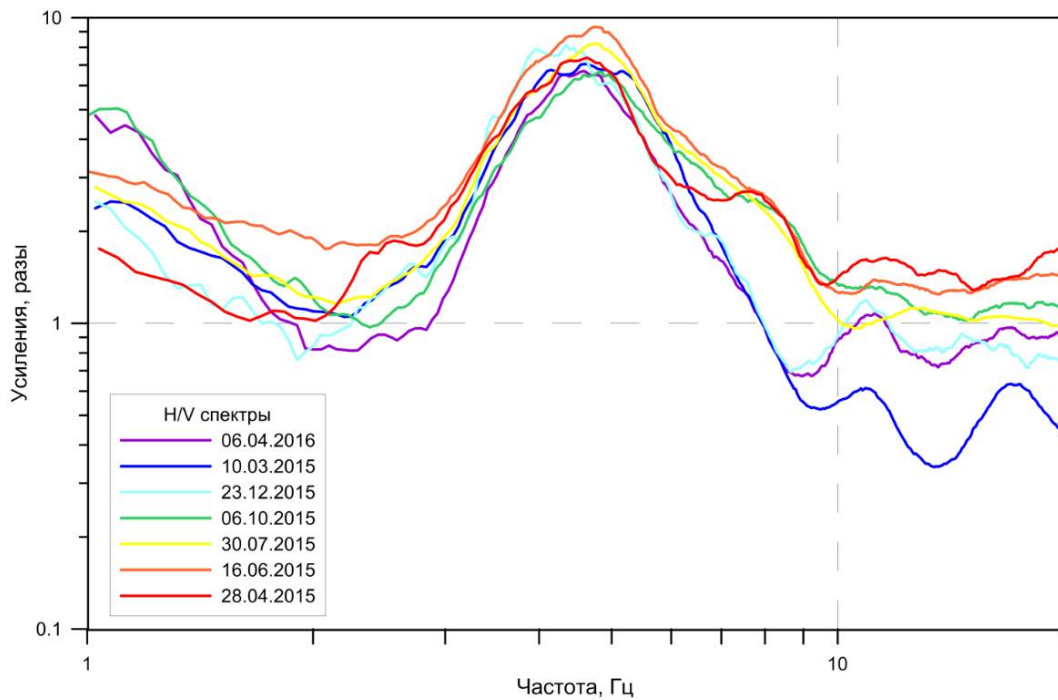


Рис. 3.7. Поляризационные спектры микросейсмического шума, полученные способом Накамуры (метод *HVSR*)

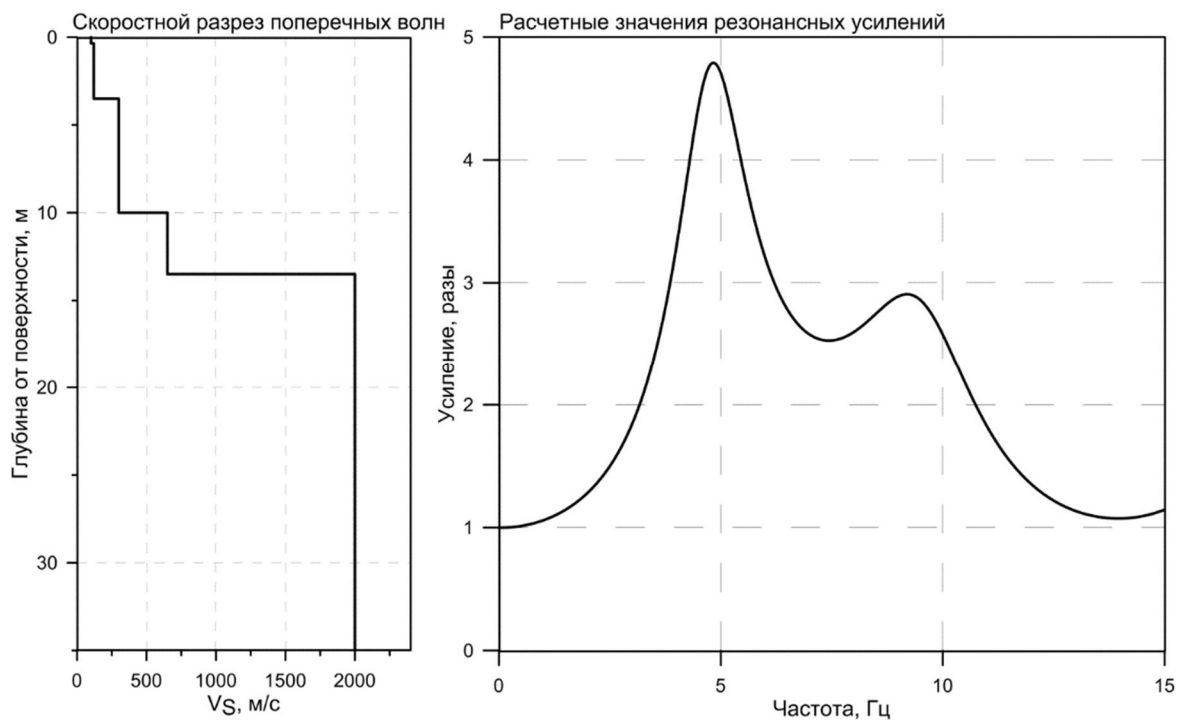


Рис. 3.8. Скоростной разрез поперечных волн и соответствующие ему резонансные характеристики

Инверсия дисперсионной кривой в скоростной разрез является обратной задачей, результат решения которой во многом зависит от дополнительной априорной информации. Присутствующая неоднозначность решения обратной задачи в ходе обработки данных методом *SASW* не позволяет корректно сравнивать результаты с результатами, полученными другими методами (например, методом регистрации взрывов и способом Накамуры). В то же время сами по себе дисперсионные кривые, характеризующие связь частоты волны с ее скоростью, рассчитываются однозначно. В связи с этим было решено использовать для последующего анализа именно их. В итоге, физико-механические свойства грунтов (плотности и мощности слоев) в совокупности со сведениями о скоростном строении стали основой для расчетов методом сейсмических жесткостей (РСН 60-86, СП 283.1325800.2016). Так, средняя скорость поверхностной волны  $V_R$  в 10-метровой толще (согласно РСН 60-86 учитывается только верхняя толща мощностью 10 м от планировочной отметки) может быть оценена на основании скорости волны длиной 30 м, поскольку большая часть энергии поверхностной волны сконцентрировано на глубине равной  $1/3$  ее длины [105, 126, 133]. Средняя скорость поперечных волн  $V_S$  в 10-метровой толще в этом случае может быть определена с использованием следующей формулы [39]:

$$\frac{V_R}{V_S} = \frac{0.862 + 1.14\mu}{1 + \mu}, \quad (3.1)$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона. Далее отношения сейсмических жесткостей на исследуемом и эталонном грунте (в данном эксперименте это скальный гипс в пещере) будут характеризовать усиления колебаний.

Диапазон имеющихся в распоряжении дисперсионных кривых позволяет также рассчитать среднюю скорость  $V_S$  для других длин волн. В таблице 3.3 представлены расчеты усиления методом сейсмических жесткостей (МСЖ) для разных длин волн ( $\lambda$ ), полученных в ходе серии экспериментов в течение года.

Можно отметить, что максимальные значения усиления (как и ожидалось) наблюдаются в весенне-летний период, когда грунты наиболее обводнены и/или не связаны льдом в качестве цемента. Минимальные усиления отмечены в зимний период, когда УГВ был ниже всего. Вместе с этим разброс значений не

превышает 10%, что говорит о незначительном влиянии сезонных изменений в грунтах на интегральное усиление.

Таблица 3.3

Усиления сейсмических колебаний, рассчитанные с помощью МСЖ для сейсмических волн разной длины

Дата	$\lambda = 50$ м	$\lambda = 40$ м	$\lambda = 30$ м	$\lambda = 20$ м
24.04.2015	1.17	1.26	1.38	1.55
21.05.2015	1.19	1.28	1.39	1.57
23.06.2015	1.18	1.27	1.38	1.54
30.07.2015	1.21	1.29	1.41	1.57
08.09.2015	1.20	1.29	1.40	1.54
06.10.2015	1.21	1.29	1.39	1.52
12.11.2015	1.20	1.29	1.40	1.56
23.12.2015	1.16	1.24	1.36	1.54
04.02.2016	1.12	1.21	1.34	1.53
02.03.2016	1.12	1.22	1.34	1.54
06.04.2016	1.14	1.24	1.37	1.56

### 3.2. Способы оценки и учета влияния грунтовых условий

#### 3.2.1. Инструментальные методы сейсмического микрорайонирования

Исследования грунтовых условий в том или ином виде выполняется не только в рамках работ по определению сейсмически безопасного расстояния БВР. Работы по сейсмическому микрорайонированию (СМР) заключаются в изучении грунтовых условий и направлены на уточнение сейсмической опасности для конкретной территории. Результатом исследований при этом являются поправки к исходной сейсмичности (интенсивности возможных землетрясений), которая, в свою очередь, определяется методами общего сейсмического районирования и указана на картах ОСР. Определяемые методами СМР данные корректировки обусловлены грунтовыми условиями, которые влияют на амплитуду и частотный состав проходящих сейсмических волн.

Сейсмические инструментальные наблюдения базируются на регистрации региональных и локальных землетрясений малых энергий и взрывов. При микрорайонировании участков, для которых сложно получить кондиционные

записи землетрясений и взрывов (в силу их низкой повторяемости), обычно привлекают методы, использующие микросейсмические шумы различной природы. Качество итоговых оценок приращений интенсивности возможных сейсмических воздействий зачастую зависит от уровня техногенных помех, что приводит к усложнению реализации методов регистрации землетрясений, взрывов и микросейсмических шумов.

**Микросейсмь.** Микросейсмь или микросейсмические колебания грунта присутствуют практически повсеместно и могут быть использованы для решения задач СМР. Так как спектральный состав микросейсм может отличаться от спектрального состава таких воздействий как землетрясение или взрыв, методы, основанные на регистрации микросейсм, обычно применяются в качестве вспомогательных в комплексе с другими инструментальными методами. Преимуществами методов, основанных на регистрации микросейсмических шумов, кроме простоты реализации, является возможность их комплексирования с другими инструментальными методами СМР, а также возможность получения оценок в широком диапазоне частот (от 0.1 до 100 Гц).

Для изучения грунтовых условий методами, основанными на регистрации микросейсмических шумов, необходимо проводить специальные наблюдения, позволяющие оценить спектрально-временную изменчивость амплитудно-частотных характеристик местных источников микросейсм. Получение подобных оценок возможно посредством круглосуточных наблюдений одновременно в нескольких пунктах.

Наиболее широкое распространение в практике СМР получили два способа, основанные на регистрации и обработке микросейсм – стандартный (референсный) и способ Накамуры.

Обязательным условием реализации *стандартного способа регистрации микросейсм* является наличие синхронных записей микросейсм на эталонном и исследуемом грунтах. Согласно РСН 65-87 (Инженерные изыскания для строительства, сейсмическое микрорайонирование), отношение спектральных амплитуд одновременно регистрируемых микроколебаний на исследуемом грунте ( $S_i$ ) и в пункте с эталонными грунтами ( $S_э$ ) принимается за величину усиления ( $U_{смр}$ ) на исследуемом грунте:

$$y_{\text{смп}} = \frac{S_i}{S_3}, \quad (3.2)$$

Способ Накамуры [155] широко используется в качестве экспресс-метода для оценки реакции грунтов на сейсмическое воздействие. Суть метода, который также носит название *HVSR (the Horizontal to Vertical Spectrum Ratio)*, заключается в расчете отношений спектральных амплитуд, полученных в горизонтальной плоскости, к соответствующим амплитудам на спектре вертикальных колебаний. Обязательным условием для таких оценок является наличие обычной трехкомпонентной записи микросейсмического фона на исследуемом грунте. В основе способа лежит представление о том, что сейсмические волны от удаленных источников микросейсм приходят снизу, а структура изучаемых грунтов оказывает влияние на характеристики поперечных волн и практически не изменяет продольные волны. В таком случае отношение спектральных характеристик горизонтальных компонент к спектру вертикальной компоненты будет характеризовать передаточную функцию, которая строго зависит от структуры и свойств изучаемых грунтов.

Рассматривая теоретическую функцию усиления исследуемых грунтов как отношение спектров горизонтальных колебаний на исследуемом ( $S_{Hi}$ ) и эталонном ( $S_{Hэ}$ ) грунте:

$$R_{Hiэ} = \frac{S_{Hi}}{S_{Hэ}}, \quad (3.3)$$

Накамура делает предположение и показывает на множестве примеров, что вертикальные колебания подвержены влиянию грунтовых условий незначительно, за исключением случая прохождения поверхностных волн от источников поверхностного происхождения. Таким образом, отношение спектров вертикальных колебаний на исследуемом ( $S_{Vi}$ ) и эталонном ( $S_{Vэ}$ ) грунте

$$R_{Viэ} = \frac{S_{Vi}}{S_{Vэ}}, \quad (3.4)$$

будет существенно больше 1 только за счет усиления волн Релея. То есть, если не принимать во внимание поверхностные волны, то величина  $R_{Viэ}$  будет близка к 1. Если также предположить (а множественные записи микросейсм это подтверждают), что амплитуды горизонтальных и вертикальных колебаний на эталонных грунтах в широком диапазоне частот близки

$$R_{HV\varepsilon} = \frac{S_{H\varepsilon}}{S_{V\varepsilon}} \approx 1, \quad (3.5)$$

то функция

$$R_{HVi\varepsilon} = \frac{R_{Hi\varepsilon}}{R_{Vi\varepsilon}} = \frac{S_{Hi} S_{V\varepsilon}}{S_{Vi} S_{H\varepsilon}} = R_{HVi} / R_{HV\varepsilon} \approx R_{HVi}, \quad (3.6)$$

где

$$R_{HVi} = \frac{S_{Hi}}{S_{Vi}}, \quad (3.7)$$

будет представлять усиление грунтов при прохождении объемных волн, опираясь только на измерения, выполненные на исследуемом участке.

Таким образом, теоретические основы метода достаточно просты и позволяют сопоставить полученные отношения с реальными усилениями грунтов, как если бы они были получены с использованием синхронных наблюдений на эталонных грунтах, но без привлечения таковых.

**Землетрясения и взрывы.** Методы, при которых регистрируются волны от импульсных источников (взрывы и землетрясения), являются основными в работах СМР. Как и в случае стандартного метода регистрации микросейсм, реализация метода регистрации волн от импульсных источников основывается на синхронных наблюдениях на исследуемых грунтах и на грунтах с известными свойствами (эталон). Важное условие реализации методов, основанных на регистрации волн от импульсных источников, заключается в том, что расстояние между пунктами с изучаемыми и эталонными грунтами должно быть меньше 0.1 гипоцентрального расстояния до источника. Метод регистрации землетрясений, по сути, является прямым и лучше всего подходит для решения задач СМР. Однако при этом ввиду того, что сильные землетрясения происходят достаточно редко, чаще всего регистрируются и обрабатываются землетрясения малых энергий. При изучении грунтовых условий возможна частичная или полная замена регистрации землетрясений регистрацией промышленных или специальных взрывов. Хотя механизм взрыва как источника отличен от механизма землетрясения по ряду параметров, но в общих чертах возбуждаемые ими сейсмические волны схожи и вполне подходят для изучения особенностей грунтовых условий. В случае необходимости проведения длительных наблюдений для регистрации землетрясений, желательно привлечение данных стационарных сейсмостанций.

### *3.2.2. Сравнение результатов, полученных инструментальными методами сейсмического микрорайонирования*

Поскольку теоретические основы способов, основанных на регистрации и обработке микросейсм (референсный способ и способ Накамуры), отличаются, представляет интерес сравнить на тестовом объекте результаты, полученные обоими описанными способами.

В качестве такого объекта выбран участок с выходом скальных слабовыветрелых известняков с глинистым заполнителем, что согласно СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах», соответствует породам I категории. Для решения задачи выбраны волновые формы длительностью трое суток, которые поделены на ночные и дневные часовые интервалы, а затем очищены от интенсивных техногенных помех. При этом необходимо учитывать, что процедура удаления интенсивных помех не устраняет с записей широкополосного микросейсмического шума, который является результатом влияния локальных факторов, имеющих, как правило, наибольшую активность в дневное время суток. Следующие построения направлены на то, чтобы выявить, насколько это влияние сказывается на результатах оценки усилений грунтов. Чтобы оценить погрешности оценки усилений, получаемые в результате применения стандартного референсного способа, в качестве эталонных записей были приняты ночные записи на этом же пункте. Далее для всех часовых интервалов посчитаны спектры мощности для трех компонент колебаний ( $Z$  – вертикальная,  $E$  и  $N$  – горизонтальные), а затем по этим спектрам определены среднеквадратические значения амплитуд. Отношения значений дневных и ночных амплитуд дает нам значения усилений, которые дал бы стандартный способ при использовании его в дневное время. По этим же спектрам были получены оценки усилений способом Накамуры. Спектральные характеристики грунтов в пункте получены для каждого часа в течение 3 суток. Усиления рассматривались в трех частотных диапазонах, регламентированных РСН 60-86 «Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Нормы производства работ»:

- частотный диапазон 3.3 – 10 Гц (короткие периоды 0.1 – 0.3 с);



- 2 – 3.3 Гц (средние периоды 0.3 – 0.5 с);
- 0.5 – 2 Гц (длинные периоды 0.5 – 2 с).

Кривые изменения усиления, полученные способом Накамуры (рис. 3.9), свидетельствуют о том, что частотные характеристики грунтов в целом стабильны. Максимальный разброс усиления, полученный за все время наблюдений способом Накамуры, относится к среднепериодным колебаниям и лежит в диапазоне от 1.1 до 2.2. Это соответствует приращению сейсмической интенсивности по шкале MSK-64 примерно на 0.1-0.5 балла. Стоит отметить наличие незначительных различий между величинами дневных (1.1-1.4) и ночных вариаций (1.33-2.2). Таким образом, наблюдаемые значения усиления, полученные способом Накамуры, имеют слабую зависимость от времени суток, то есть от “оживленности” близлежащего населенного пункта.

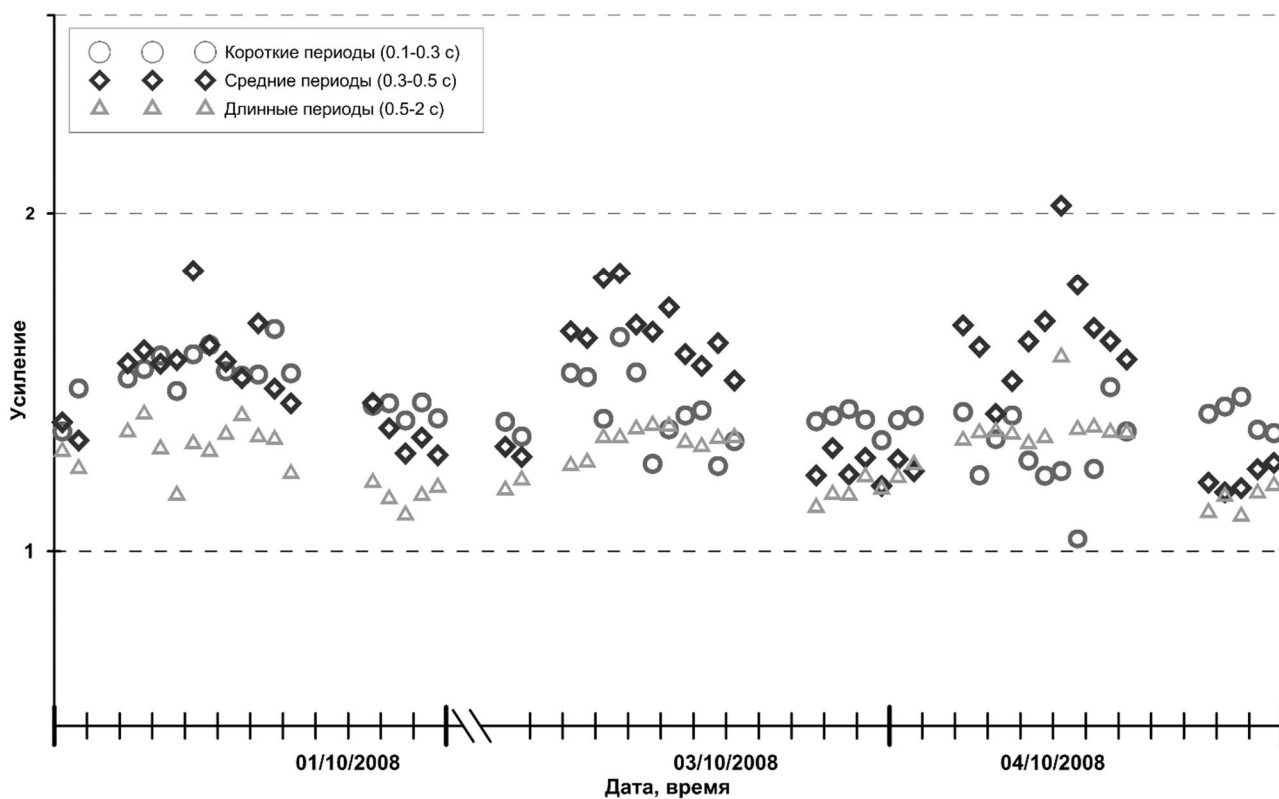


Рис. 3.9. Резонансные характеристики, полученные способом Накамуры

В то же время для частотных характеристик грунтов, полученных стандартным способом регистрации микросейсм, наблюдается значительный разброс между дневными и ночными показателями. Из результатов расчетов, представленных на рис. 3.10, можно сделать вывод, что максимальный разброс

значений усиления для коротко- и среднeperиодных колебаний может достигать 4-5 раз.

Сравнение результатов, полученных методами регистрации микросейсм, позволяют говорить о том, что наибольшую устойчивость к влиянию локальных факторов имеют длиннопериодные колебания. В этом частотном диапазоне усиления имеют дисперсию и уровень, сопоставимые с результатами, полученными способом Накамуры.

Отсюда можно сделать вывод, что стандартный способ оценки грунтовых усиления может давать существенные искажения в области средних и коротких периодов, в случае если измерения микросейсмического фона производятся в области влияния локальных помех (в частности, на урбанизированных территориях). Наименее подверженным влиянию техногенных факторов является диапазон длиннопериодных колебаний. Способ Накамуры, как было показано, менее подвержен искажениям во всей области исследуемых частот. Однако, в то же время, имеющиеся в теории метода допущения и предположения ограничивают его использование, делая его применение возможным лишь совместно с другими методами.

В связи с существенным разбросом в оценках грунтовых условий, полученных методом регистрации микросейсм в области влияния техногенных помех, представляет интерес выполнить сравнительный анализ результатов, получаемых методами регистрации микросейсм и методом регистрации сейсмических волн от импульсных источников при их использовании на одном и том же объекте. Данный эксперимент был выполнен в рамках работ, связанных с изучением грунтовых условий при сейсмическом микрорайонировании участка строительства биатлонного комплекса, расположенного в Краснодарском крае, г. Сочи, Адлерский район. Для решения задачи были выбраны волновые формы 6 зарегистрированных технологических взрывов, записанных на эталонном и исследуемом грунте (расстояние между пунктами наблюдения меньше 0.1 гипоцентрального).

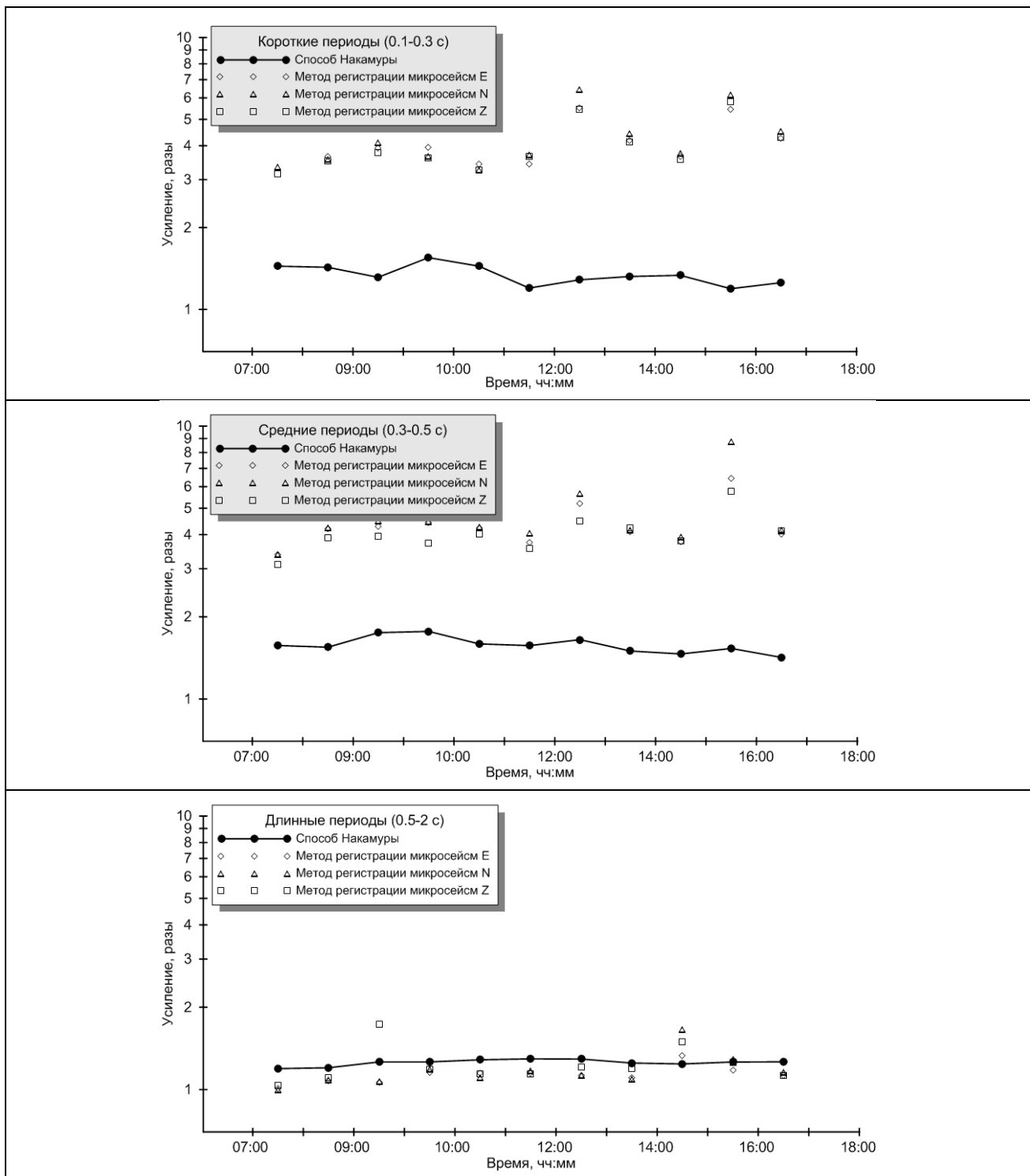


Рис. 3.10. Резонансные характеристики, полученные методом регистрации микросейсм (стандартный способ) и способом Накамуры

Обработка данных методом микросейсм выполнялась в суточном временном интервале, соответствующем взрывным работам. Для всех записей получены спектральные оценки, причем для метода микросейсм использовался способ Бартлетта, а для обработки взрывов – способ Даниеля [62]. Обычная

спектральная оценка, получаемая в результате преобразования Фурье, не может выступать в качестве основы для дальнейших расчетов в виду значительной ее подверженности ошибкам расчета спектральных амплитуд, поэтому для микросейсм, регистрируемых в течение длительного времени, способ Бартлетта является наиболее подходящим, а для кратковременных записей взрывов наилучшие результаты будет давать способ Даниеля [62]. Разница при вычислении оценок энергетических спектров в этих двух подходах заключается в том, что при большой выборке данных применяется осреднение рассчитываемых периодограмм, а при относительно небольших выборках используется весовая функция прямоугольной формы.

При расчете бартлеттовских оценок использовалось временное окно длительностью 20 секунд, а для получения оценок способом Даниеля – 10 секунд. Длина спектрального весового окна Даниеля была выбрана равной 5 точкам. Сравнение различных длин весовых окон (3, 5, 7 – рис. 3.11) показало, что 5-точечное окно является вполне достаточным вариантом, при котором изрезанность спектров заметно снижается, а полезный частотный состав существенно не страдает от недостатка гармоник. Именно в таком виде спектры взрывов, зарегистрированных на эталонном и исследуемом пунктах, были использованы для дальнейшего анализа.

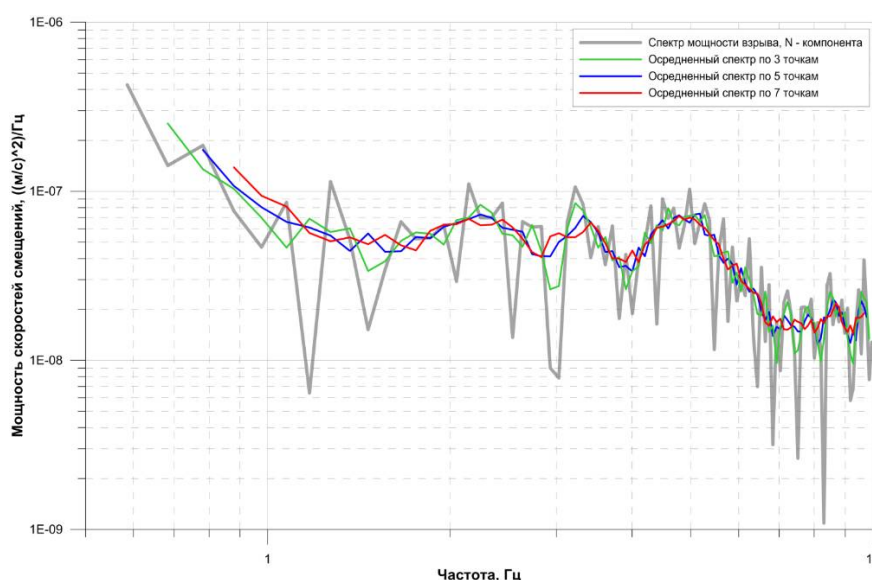


Рис. 3.11. Спектральная оценка. Выбор длины весовой функции Даниеля

Достаточное снижение дисперсии спектров Бартлетта для записей микросейсмических шумов обеспечивалось большой продолжительностью

записей микросейсм (несколько часов). В среднем на часовом интервале при 50% зашумленности сигнала достигалось почти 10-кратное снижение дисперсии спектральных оценок.

Адекватность полученных спектральных оценок микросейсм определяется степенью изученности их вариации во времени в районе исследований. От степени надежности полученных спектральных оценок зависит и качество определения изменений сейсмической интенсивности. Сравнение кривых усиления, полученных по спектрам микросейсм, очищенных от интенсивных помех (рис. 3.12), для исследуемого пункта в течение суток показывает, что кривые усиления достаточно стабильны, и наблюдаемые отличия не вносят существенных изменений в итоговое приращение интенсивности. Использование в расчетах всего полевого материала, включая помехи, таких стабильных результатов не дает. Все это предъявляет серьезные требования к исходным данными и способам их обработки:

- селекция интервалов без интенсивных помех должна выполняться обязательно;
- временные ряды должны быть продолжительными, обеспечивая достаточное количество “тихих” интервалов.

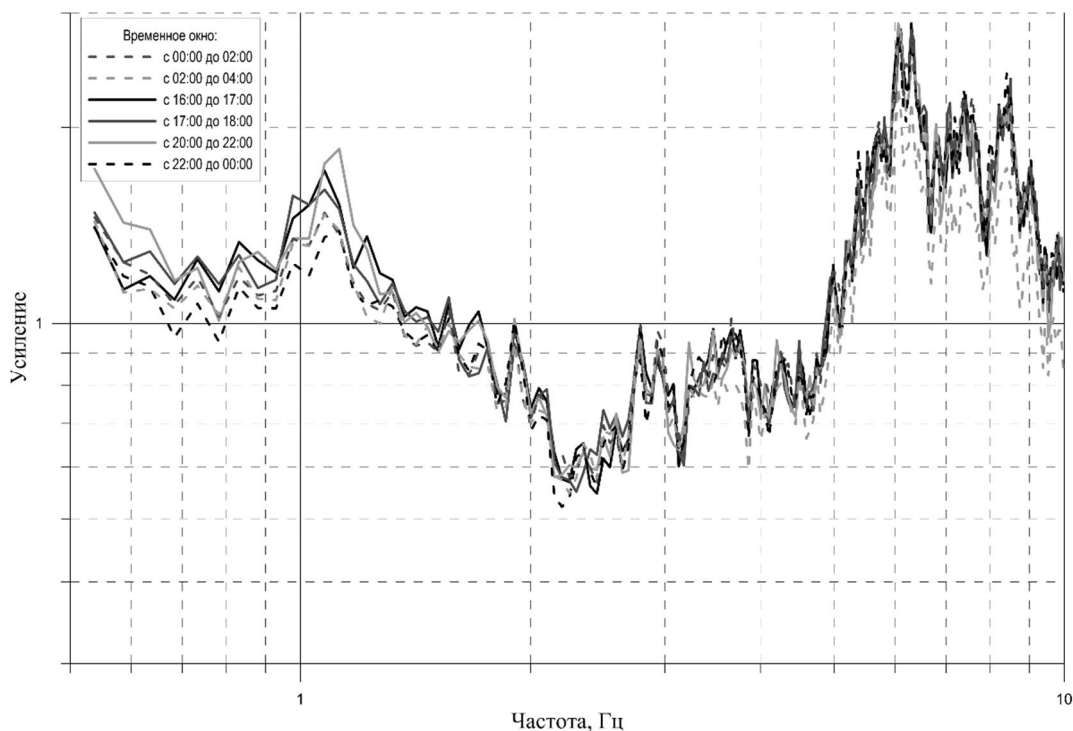


Рис. 3.12. Временные вариации кривых усиления, полученных по микросейсмам в течение суток

После построения спектральных оценок всех зарегистрированных взрывов, а также микросейсмических колебаний, были получены отношения спектров (исследуемого пункта к эталонному), характеризующие усиление колебаний на определенных частотах. Для сравнения результатов использовались средние кривые усиления, как для взрывов, так и для микросейсм (рис. 3.13). Планками на графиках показаны среднеквадратические отклонения усиления, рассчитанных по 6 взрывам. Величины отклонений по микросейсам в несколько раз меньше, поэтому не отображены.

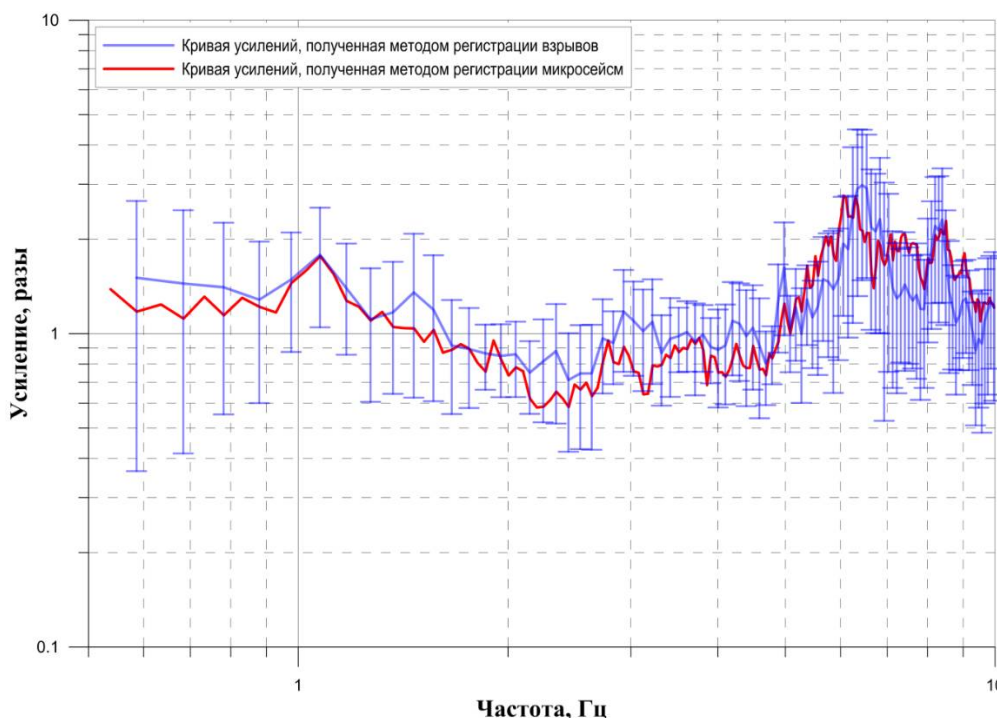


Рис. 3.13. Сравнение резонансных характеристик (кривых усиления), полученных разными методами сейсмического микрорайонирования

Сравнительный анализ графиков показал, что кривые усиления, полученные разными методами достаточно хорошо согласуются друг с другом. Они имеют практически одну и ту же форму и в пределах погрешности определения совпадают по величине.

В таблице 3.4 представлено сравнение усиления в трех частотных диапазонах, регламентированных согласно РСН 60-86, при этом среднеквадратические отклонения усиления, полученных в каждом диапазоне, составили 0.3 для каждого диапазона частот.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что метод регистрации микросейсм при определенных условиях обеспечивает получение вполне адекватных оценок резонансных характеристик грунтов и может использоваться в качестве экспресс-метода. Однако, учитывая возможные пространственные вариации состава микросейсм, оценки быстрого в производстве метода все же стоит подтверждать надежными результатами, которые могут быть получены только в ходе долговременных наблюдений методом регистрации землетрясений (взрывов).

Таблица 3.4

<b>Частотный диапазон</b>	<b>Усиления, разы</b>	
	<b>метод регистрации микросейсм</b>	<b>метод регистрации взрывов</b>
0.5 -2 Гц	1.15	1.20
2-3.3 Гц	0.70	0.90
3.3-10 Гц	1.50	1.40

### 3.2.3. Аналитический расчет спектральных (резонансных) характеристик грунтов, основанный на данных о скоростном строении толщи пород

Исследование грунтовых условий, выполняемых в условиях высокого уровня техногенных помех (урбанизированные территории, промышленные и сельскохозяйственные объекты), стимулировали применение экспериментальных и теоретических методов, которые позволили бы исключить или существенно снизить влияние неблагоприятных шумовых условий на результаты определения резонансных характеристик грунтов.

В основе одного из таких подходов лежат существующие теоретические представления о распространении сейсмических волн через толщу пород с известными физическими характеристиками. Для расчета спектральных (резонансных) характеристик грунтов имеет значение знание мощности слоев, скорости поперечных волн, плотности и коэффициентов демпфирования в расчетной толще. Считается [118], что достаточной мощностью, которая определяет влияние грунтов, является 30 м в дисперсных грунтах и до глубины залегания пород с сейсмической жесткостью  $R > 2000 \text{ т}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  в случае наличия

их в верхней 30-метровой толще. Наиболее значительное влияние на спектральные характеристики грунтов имеют различия скоростей сейсмических волн на разных глубинах. Данные о скоростях и границах сред с различными сейсмическими свойствами в верхней толще могут быть получены в ходе натуральных сейсмических наблюдений.

Одним из методов по изучению скоростного строения верхней толщи массива является спектральный анализ поверхностных волн, или *SASW* (*Spectral Analysis of Surface Waves*). В основе метода лежит явление дисперсии поверхностных волн, позволяющее оценить распределение сейсмических скоростей по частоте колебаний, а, следовательно, и по глубине их распространения. В связи с относительной простотой реализации метод получил большое распространение в современных исследованиях верхней части разреза. Принципиальная схема получения спектральных (резонансных) характеристик грунтов, основанная на результатах *SASW*, представлена на рис. 3.14. *SASW* является современным неразрушающим методом исследования, позволяющий получить данные о инженерно-геологическом строении, и включает следующие этапы:

- проведение сейсмических измерений на интересующем объекте;
- обработку сейсмических данных с целью построения дисперсионных кривых фазовой скорости первых гармоник волн Рэлея;
- восстановление по дисперсионным кривым скоростного разреза поперечных волн.

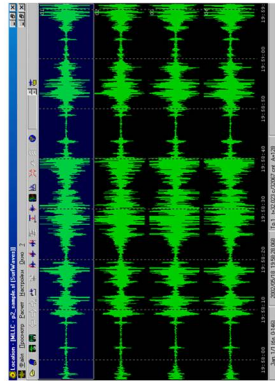
К настоящему времени в мировой практике инженерных сейсмологических исследований разработано и опробовано большое количество модификаций метода *SASW*, которые различаются видами источников полезных сигналов, типом изучаемых волн и частотными диапазонами. Модификация, используемая автором, была разработана в «ГИ УрО РАН» [79] и позволяет относительно оперативно оценивать скоростной разрез до глубины порядка 40-50 метров. Полевые измерения проводятся в двух режимах: активном и пассивном. В активном осуществляется регистрация сейсмических волн, возбуждаемых ударным способом, в пассивном ведется регистрация микросейсмических шумов. Для реализации метода *SASW* разворачивается пространственная



расстановка вертикальных короткопериодных сейсмоприемников. Для каждого режима характерна своя, подобранная в ходе специально организованных экспериментальных работ, схема расстановки датчиков, обеспечивающая наилучший способ извлечения полезной информации.

При экспериментах в активном режиме на некотором расстоянии от расстановки (рис. 3.15 а) при помощи кувалды и металлической пластины (падающий груз) производится серия возбуждений упругих волн. При выборе расстояния от источника до приемника важно руководствоваться условием преобладания на сейсмических записях поверхностных волн. Основным условием к выбору расстояния от источника возбуждения до расстановки является возможность обнаружения на записях явления дисперсии поверхностных волн. Как правило, явление лучше проявляется при больших расстояниях от источника (20-50 м), однако, одновременно действует ограничение, связанное с затуханием амплитуды полезного сигнала с расстоянием. Поэтому в каждом конкретном случае это расстояние определяется экспериментально. Эмпирически установлено, что при активном режиме наилучший результат дает использование линейной расстановки с шагом 5-10 м (рис. 3.15 а). Измерения выполняются для различных азимутов (с обеих сторон линейной расстановки) распространения волн и для различных размеров расстановки. Этот режим экспериментов обеспечивает получение данных о дисперсии поверхностных волн в относительно высокочастотном диапазоне (8-25 Гц).

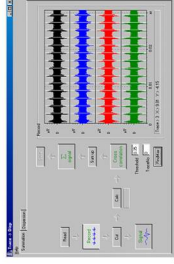
В пассивном режиме *SASW* проводится регистрация микросейсм от различных удаленных источников, каковыми обычно выступают волны в морях и океанах, движение автомобилей, железнодорожного транспорта, работа разнообразных механизмов, качание деревьев под действием ветра и т.п. Такие источники, как правило, имеют низкую частоту (0.5-15 Гц) и, соответственно, большую длину волны, поэтому позволяют получить данные скоростях на сравнительно больших глубинах. Необходимо отметить, что при этом предполагается, что основной составляющей микросейсмических колебаний являются волны Рэлеевского типа.



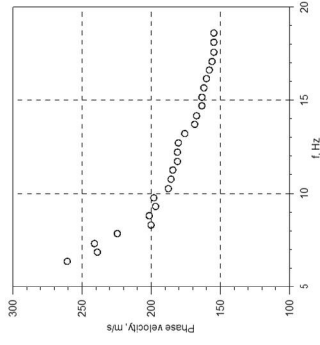
Обработка



Данные измерений



Синтез

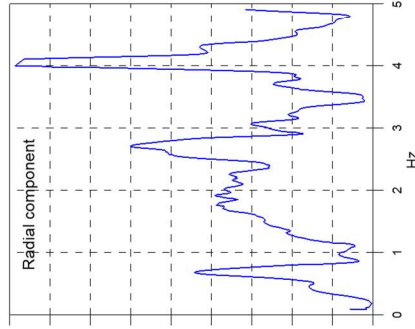


Дисперсионная  
кривая волн Рэлея

Трансформированные  
волновые поля



Инверсия

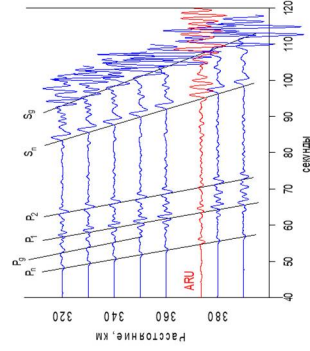


Локальное усиление

Оценка  
локального  
усиления



Синтетические  
сейсмограммы



Вычисление  
синтетических  
сейсмограмм



Разрез скоростей  
поперечных волн

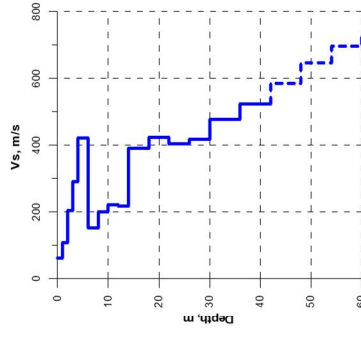


Рис. 3.14. Принципиальная схема исследования резонансных свойств грунтов, основанная на изучении скоростного строения методом SASW

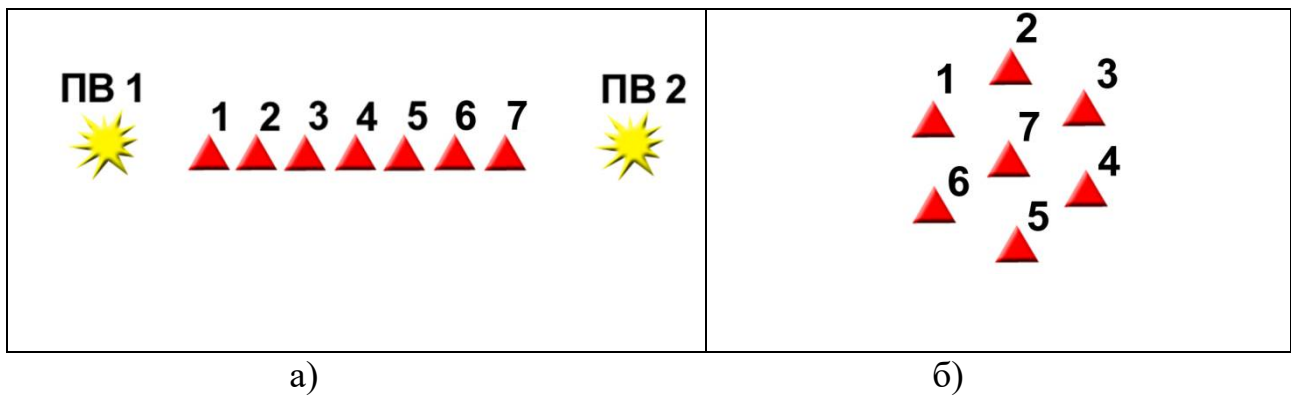


Рис. 3.15. Схема наблюдений по методу SASW в активном (а) и пассивном (б) режимах

Таким образом, пассивный режим позволяет, увеличив глубину исследуемой толщи, дополнить результаты, полученные в активном режиме. Обычно мониторинг микросейсмических шумов в пассивном режиме предусматривает непрерывную регистрацию волнового поля микросейсм в течение 1-4 часов. Как правило, при пассивных наблюдениях применяется площадная расстановка (например, окружность, треугольник, квадрат, крест и др.). Размер ее апертуры и количество точек наблюдения влияют на точность расчета скоростей, диапазон волновых чисел и диапазон глубин.

Экспериментально установлено, что исчерпывающую информацию для последующего дисперсионного анализа в пассивном режиме и восстановления скоростного разреза до глубин 40-50 м можно получить с помощью пространственной 7-точечной схемы наблюдений (рис. 3.15 б). При этом для обеспечения возможности определения скорости проходящих волн от разных источников (различные длины волн и различные азимуты) наблюдения могут выполняться одной расстановкой с изменением ее апертуры (радиус 5-15-30 метров).

*Обработка SASW (активный режим).* Целью обработки сейсмических записей, полученных в активном режиме метода SASW, является расчет дисперсионной кривой. Решение этой задачи зачастую требует подавление сигналов от сторонних источников (транспорт, механизмы и прочее). Это возможно реализацией процедуры суммирования, которая состоит из следующих шагов:

- выделение полезного сигнала;

- расчет на каждом канале функции взаимной корреляции (ФВК) между сигналом и всей записью. Задержки между максимумами ФВК показывают задержки между сигналами;

- накопление (суммирование интервалов записей с выбранными задержками).

На рис. 3.16 продемонстрированы результаты измерений методом *SASW* в активном режиме, полученные расстановкой из 4-х вертикальных сейсмоприемников. На записях четко прослеживаются вступления (прямых или преломленных) продольных и поперечных волн (*P* и *S*), имеющих частоты порядка 20 Гц. Следующий после поперечных волн низкочастотный (5 – 10 Гц) сигнал *R<sub>0</sub>* представляет собой первую гармонику волн Рэлея. Для данной волны хорошо заметна нормальная дисперсия групповой скорости (уменьшение видимого периода сигнала со временем). Этот режим экспериментов обеспечивает получение данных о дисперсии поверхностных волн в диапазоне 8 – 25 Гц.

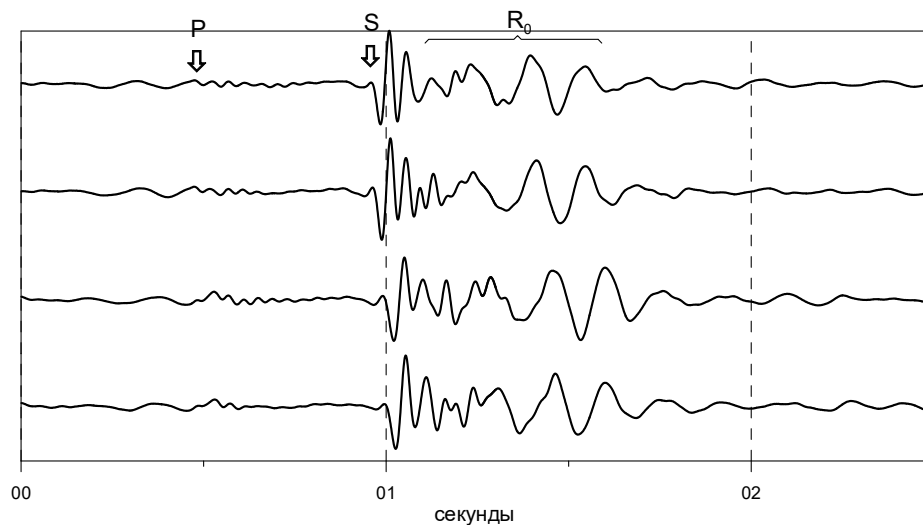


Рис. 3.16. Характерная запись сигнала при активных измерениях

В качестве примера процедуры суммирования на рис. 3.17 показан фрагмент записи по одному каналу и соответствующий ему суммарный сигнал, полученный в результате 10-кратного накопления. Суммарные сигналы, сформированные для разных каналов, используются для расчета дисперсионной кривой фазовой скорости. Для этого в спектральной области рассчитываются фазовые сдвиги между сигналами на разных каналах. Поскольку геометрия

расстановки и азимут на источник известны (фиксируются на этапе проведения измерений), то для каждой частоты по методу наименьших квадратов можно рассчитать фазовую скорость. Использование линейной расстановки сейсмоприемников исключает необходимость корректировки азимута прихода колебаний от источника.

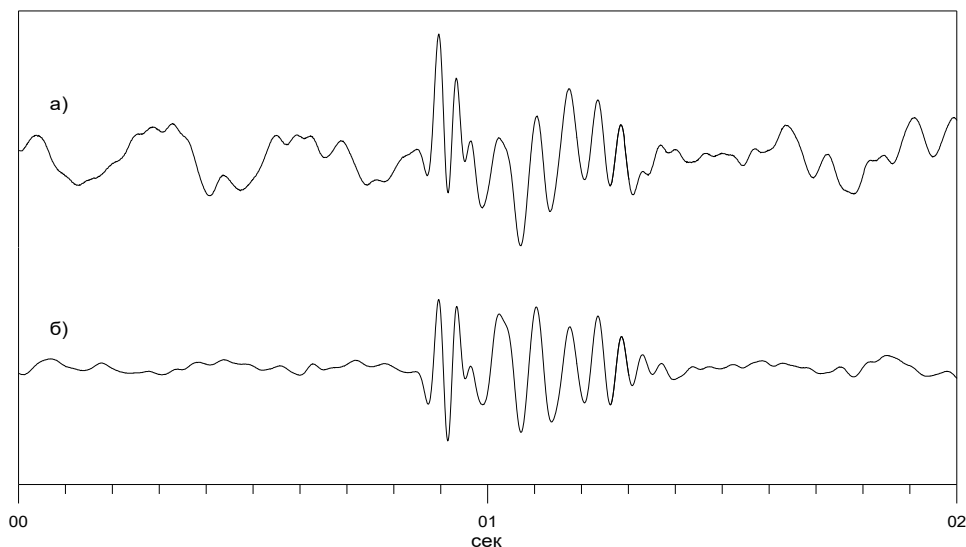


Рис. 3.17. Фрагмент записи с сигналом от пункта возбуждения (а) и соответствующий ему суммарный сигнал (б)

На рис. 3.18 представлены результаты расчетов для полевых данных. Различными символами отмечены фазовые скорости, полученные для различных положений источника. Прослеживаются две ветви дисперсионной кривой  $R_0$  и  $R_1$ , которые можно отождествить, соответственно, с первой ( $R_0$ ) и второй ( $R_1$ ) гармониками волн Рэлея.

*Обработка SASW (пассивный режим).* Целью обработки сейсмических записей, полученных в пассивном режиме метода *SASW*, является также построение дисперсионной кривой фазовой скорости основной гармоники волны Рэлея, расчет которой основан на технологии спектрально-временного анализа данных сейсмических групп. Используемая расстановка для наблюдений в пассивном режиме (рис. 3.15 а) состоит из 7 сейсмоприемников. Как видно из построенной передаточной функции (рис. 3.19 б), используемая 7-точечная расстановка с радиусом 15 м, способна уверенно регистрировать сигнал в диапазонах волнового числа 0.12-0.53 рад/м, что соответствует длинам волн 12-52 м и диапазону изучаемых глубин 4-25 м.

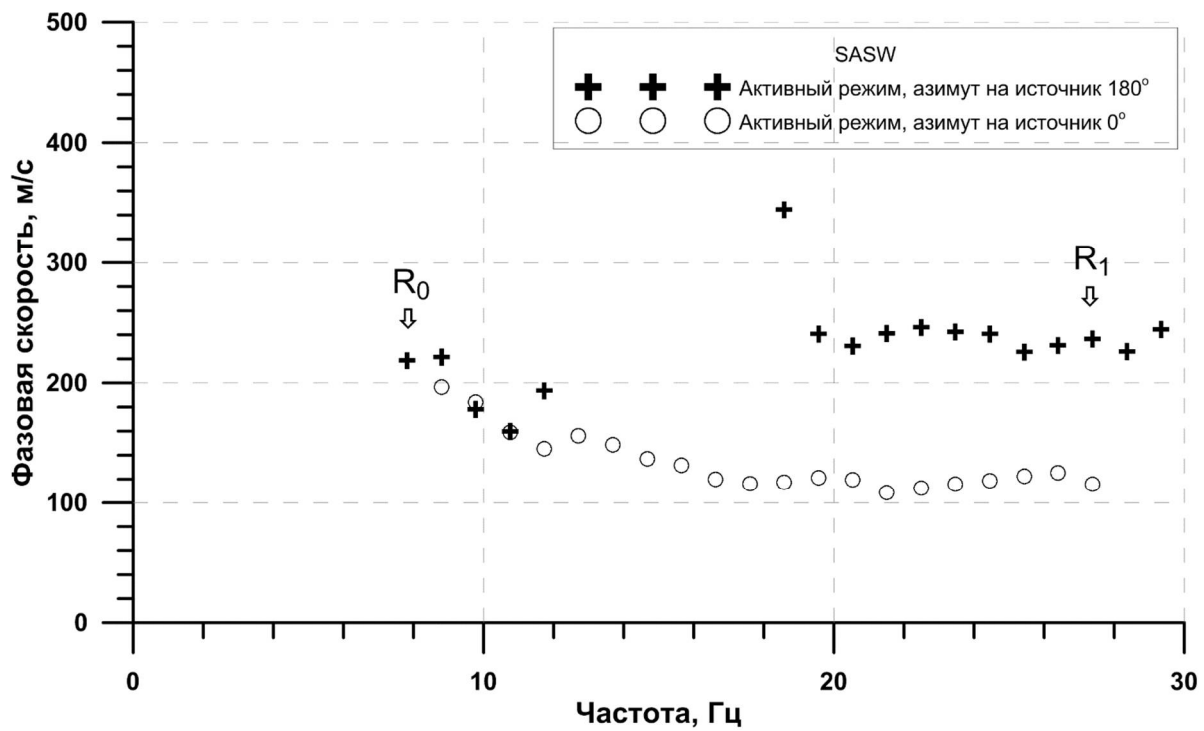


Рис. 3.18. Дисперсионные кривые гармоник волны

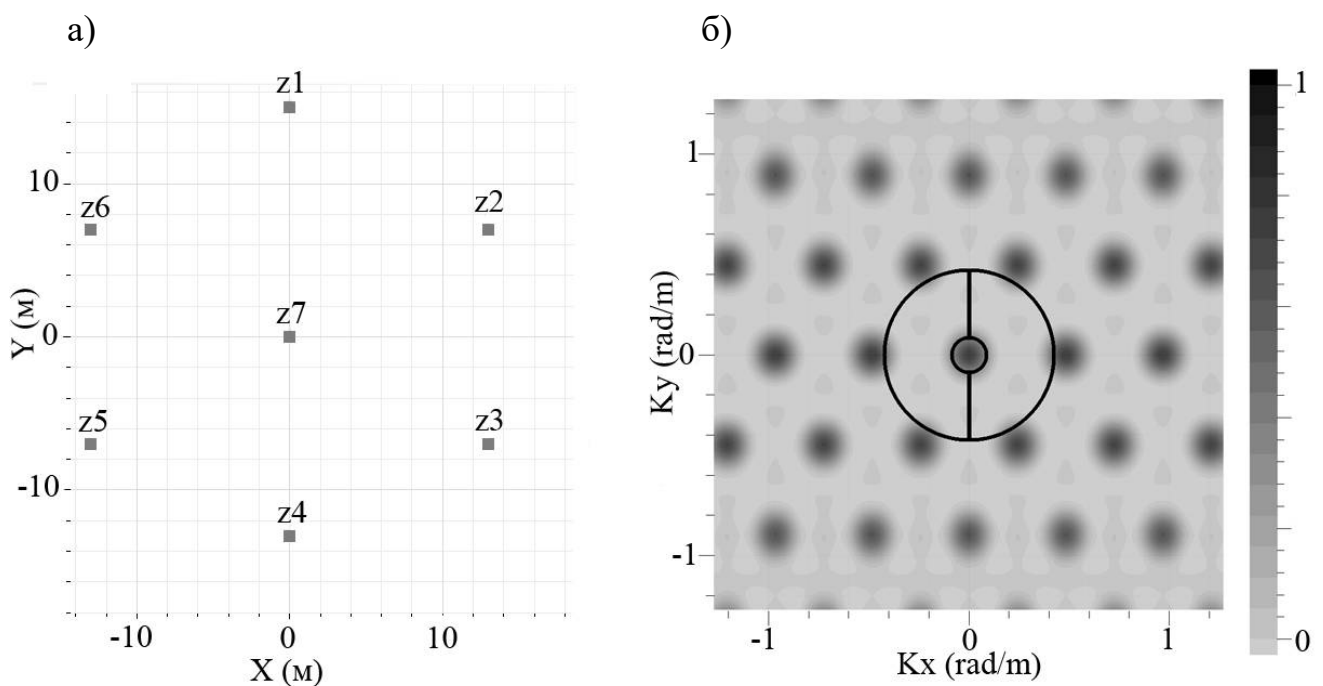


Рис. 3.19. Вариант пространственной расстановки сейсмоприемников в пассивном режиме метода *SASW* (а) и ее передаточная функция (б)

Информация о пространственном положении сейсмоприемников используется для вычисления энергии, распределенной между различными направлениями и медленностями (скоростями). Далее выполняется приведение

сейсмических сигналов к единой фазе с последующим получением максимальной амплитуды суммарного сигнала для определения медленности и направления прихода сейсмической волны. В результате обработки, основанной на регулируемом направленном анализе микросейсмических данных, для заданного частотного диапазона на спектрально-волновой ( $f-k$ ) диаграмме выделяется дисперсионная кривая фазовой скорости основной гармоники волны Рэлея (рис. 3.20).

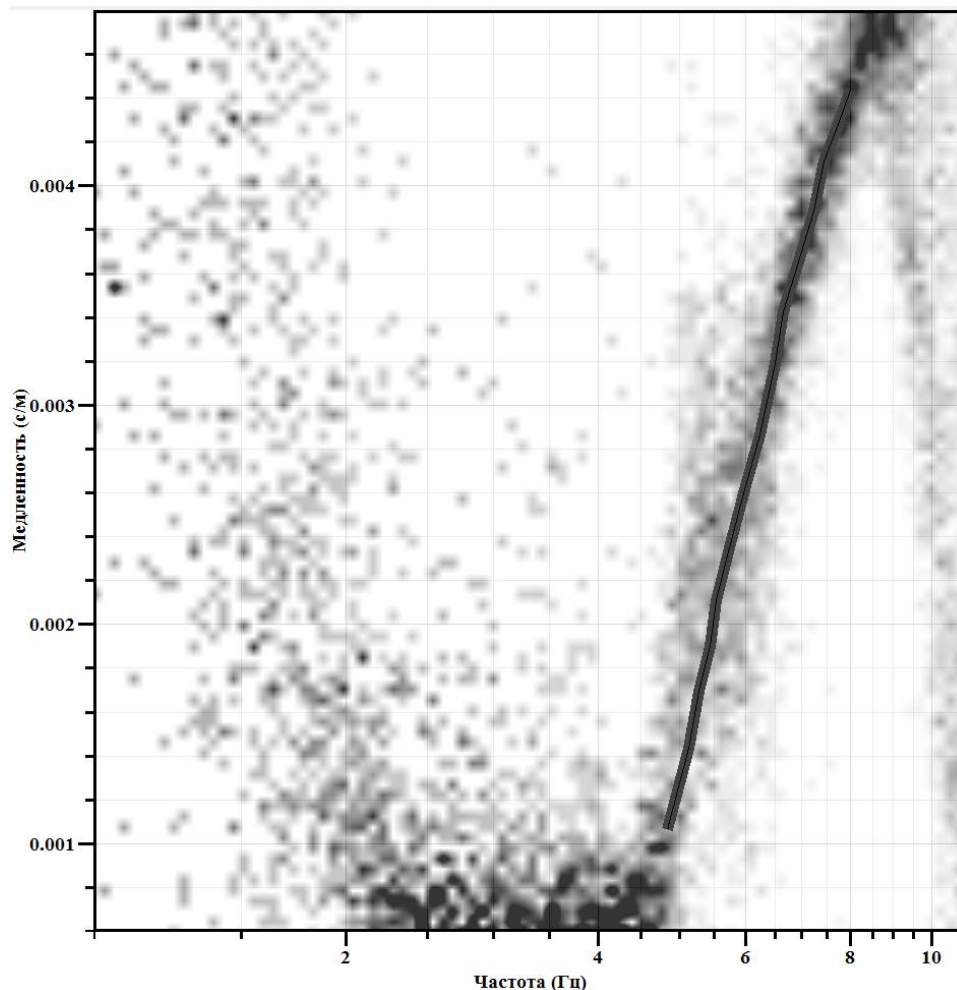


Рис. 3.20. Выделение на диаграмме спектрально-волнового ( $f-k$ ) анализа дисперсионной кривой фазовой скорости основной гармоники волны Рэлея (сплошной линией показана выделенная дисперсионная кривая)

#### *Комбинирование активного и пассивного режимов SASW*

Часто бывает полезно комбинировать активный и пассивный метод для получения дисперсионной кривой в более широком диапазоне. Объединение результатов на последних этапах позволяет получить общую картину распределения скоростей волн для разреза на малых и больших глубинах. Также

совмещение результатов дает возможность точно оценить модальный порядок дисперсионных кривых. В ходе специально организованных экспериментальных работ были подобраны наиболее эффективные виды расстановок. Результаты данного эксперимента демонстрируют (рис. 3.21), что частоты, фиксируемые в пассивном режиме расстановкой с радиусом 30 метров, находятся в диапазоне 5-8 Гц, расстановкой с радиусом 15 метров в диапазоне 7.6-10 Гц, а диапазон частот для активных наблюдений составил 9-23 Гц. Таким образом, комбинирование позволяет расширить частотный диапазон метода *SASW*, увеличить глубину исследования, а также контролировать корректность результатов, которые были получены иной расстановкой.

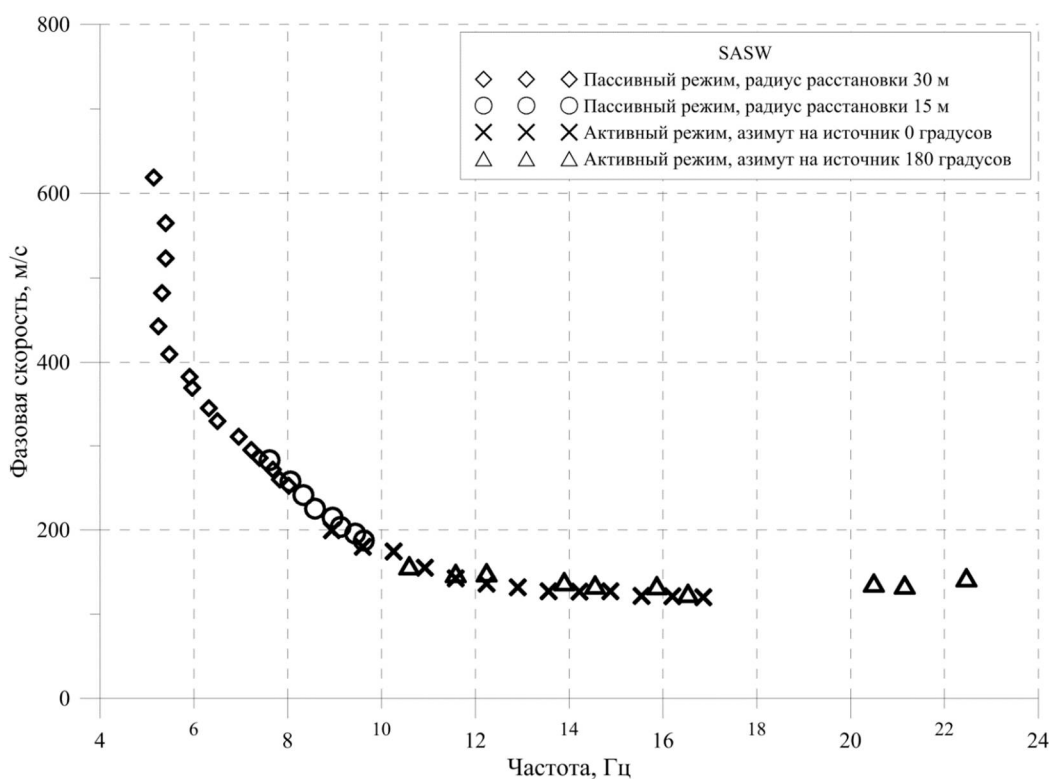


Рис. 3.21. Дисперсионная кривая фазовой скорости основной гармоники волны Рэлея, полученная разными режимами метода *SASW*

*Восстановление из дисперсионной кривой скоростного разреза поперечных волн.* Следующим шагом после получения дисперсионной кривой является этап восстановления (инверсии) распределения поперечных волн в среде  $\beta(z)$ . Исходными данными в решении задачи инверсии дисперсионных кривых являются:



- а) значения фазовой  $v_{ph}(f_i)$  и групповой скорости  $v_{gr}(f_i)$  гармоники поверхностных волн для набора частот  $f_i, i=1,2,\dots,N$  (дисперсионные кривые);
- б) априорные данные о скоростном строении.

Задача инверсии ограничена определением только параметра  $\beta(z)$ , поскольку скорость поперечных волн оказывает доминирующее влияние на вид дисперсионных кривых по сравнению со скоростью продольных волн  $\alpha(z)$  и плотностью  $\rho(z)$  [20, 168]. В общем случае фазовые и групповые скорости связаны с параметрами среды (плотностью, скоростями продольных и поперечных волн) нелинейными функциональными зависимостями, выражающимися через собственные функции краевых задач на распространение волн Лява и Рэлея. Вид зависимости  $E$  между  $\beta(z)$  и фазовой (или групповой) скоростью  $v(f)$  имеет вид [78]:

$$v(f) = E(\beta(z)). \quad (3.8)$$

Для приведения уравнения связи (3.8) к дискретному виду, среда аппроксимируется набором  $M$  однородных слоев со скоростями поперечных волн  $\beta_j (j=1,2,\dots,M)$  и вводится вектор  $\bar{\beta}$  длины  $M$ :

$$\bar{\beta} = [\beta_1, \dots, \beta_M]^T. \quad (3.9)$$

Если вектор  $\bar{v}$  значения дисперсионной кривой  $v(f)$  при  $N$  частотах  $f_1, \dots, f_N$  обозначить как

$$\bar{v} = [v(f_1), \dots, v(f_N)]^T. \quad (3.10)$$

Тогда уравнение (3.8) примет вид:

$$v_i = E_i(\bar{\beta}), \quad i=1,2,\dots,N. \quad (3.11)$$

Существует несколько подходов к решению данной задачи, однако чаще всего применяются алгоритмы, основанные на минимизации среднеквадратического отклонения теоретической дисперсионной от измеренной. Широко распространены метод  $k$ -ближайших соседей (*Neighborhood Algorithm*) и метод Монте-Карло (*Monte-Carlo sampling*). Оба метода программно реализованы в пакете программ и утилит для обработки и интерпретации геофизических данных *GEOPSY* [167]. В используемой автором

модификации *SASW* для решения задачи инверсии также программно реализован [79] итерационный способ Марквардта [6].

На рис. 3.22 приведен пример инверсии скоростного разреза (слева) по выявленным экспериментально сведениям о дисперсии фазовой скорости первой (основной) гармоники волны Рэлея. Корректность инверсии оценивается по степени соответствия теоретической дисперсионной кривой (сплошная линия на правом рисунке) экспериментальным точкам.

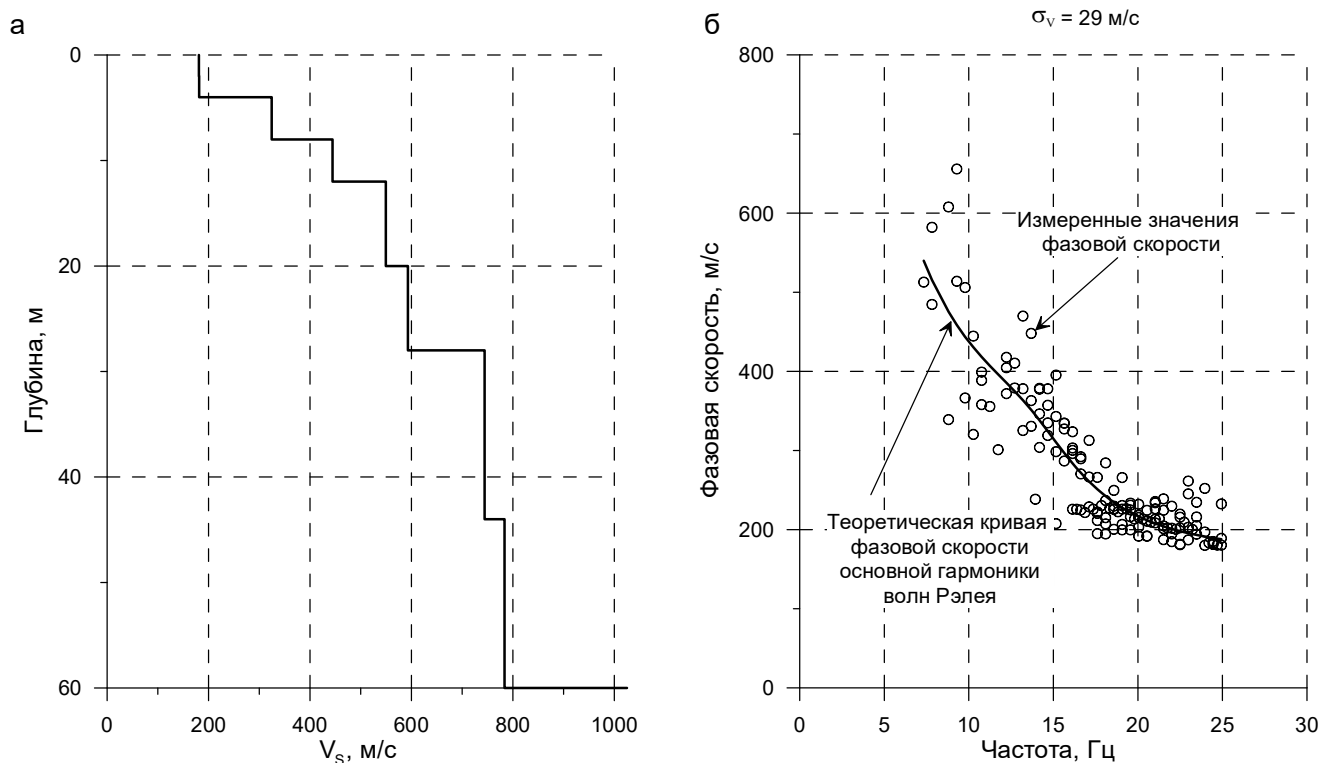


Рис. 3.22. Восстановление скоростного разреза по кинематическим характеристикам поверхностных волн

*Аналитический расчет резонансных характеристик.* Полученные скоростные разрезы в комплексе с данными о плотностях (получаются также в результате инверсии или из прямых определений) служат основой непосредственно для аналитического расчета спектральных (резонансных) характеристик грунтов с помощью специальных программных пакетов *Shake* [158], *DeepSoil* [143] или аналогичных, симулирующих прохождение сейсмических волн через исследуемую толщу и сравнивающих характеристики сейсмических сигналов на входе и на выходе.

Используемая автором модификация метода тонкослоистых сред, позволяющая учесть нелинейные сейсмические свойства грунта, реализована в программном пакете *DeepSoil*. Так называемая нелинейность сейсмических свойств грунтов является зависимостью уровня реакции (т.е. интенсивности колебаний на поверхности грунта) от амплитуды и частотного состава приходящего сейсмического сигнала [64]. Нелинейность связана с явлением изменения поглощения сейсмических колебаний от их частоты. Таким образом, нелинейные свойства грунтов зависят от таких характеристик, как скорости распространения продольных и поперечных волн, плотности, мощности слоев, обводненность пород и пр. *DeepSoil* позволяет выполнить расчет спектральных (резонансных) характеристик грунтов, а также получить акселерограммы (сейсмограммы) возможных сейсмических воздействий как на поверхности, так и во внутренних точках многослойных неупругих (поглощающих) сред, имеющих плоскопараллельные границы.

При этом решается двумерная задача распространения плоских объемных волн в неупругой пачке слоев со свободной верхней границей, подстилаемой упругим полупространством. Из полупространства на нижнюю границу толщи слоев под произвольным углом падает *P*- или *SV*-волна с единичной амплитудой заданной частоты или волна с заданной произвольной формой. То есть симулируется прохождение сейсмических волн через исследуемую толщу и сравниваются характеристики сейсмических сигналов на входе и на выходе. При этом, амплитуда входной осциллограммы, характеризующая любой вид сейсмического воздействия (землетрясение, взрыв и др.) задается с учетом факта удвоения амплитуды колебаний за счет влияния дневной поверхности. Учет нелинейности сейсмических свойств грунтов при моделировании реакции среды на сейсмическое воздействие выполняется путем решения динамического уравнения движения во временной области с малыми приращениями по времени [143]:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\}, \quad (3.12)$$

где  $[M]$  – матрица масс,  $[C]$  – матрица демпфирования,  $[K]$  – матрица жесткости,  $\{\ddot{u}\}$  – вектор ускорений,  $\{\dot{u}\}$  – вектор скоростей,  $\{u\}$  – вектор перемещений,  $P(t)$  – вектор нагрузки, который для исходного возбуждения можно записать в виде:

$$P(t) = -[M]\{I\}\ddot{u}_g(t), \quad (3.13)$$

$\{I\}$  – единичный вектор,  $\ddot{u}_g(t)$  – входная акселерограмма. Для решения уравнения (3.12) используется метод прямой итерации Ньюмарка [157], при этом матрицы составляются поэтапно и обновляются при каждом шаге по времени.

Модель среды описывается следующими параметрами: мощность слоя; плотность слоя; скорости распространения  $P$ - и  $S$ -волны; декремент поглощения или добротность. Выходными данными являются амплитудно-частотная (резонансная) характеристика толщи пород согласно заданной модели по горизонтальным (север-юг, запад-восток) и вертикальной компонентой колебаний; сейсмограмма (ряд меняющихся во времени величин ускорения, скорости смещения и смещения) на поверхности или на любой границе внутри заданной модели среды; спектры реакции для сценарных воздействий.

Таким образом, если известна модель среды, то, пользуясь аналитическими методами расчета резонансных характеристик грунтов, можно оценить влияние слоистости среды на величину усиления колебаний грунтами. В качестве примера частотной характеристики грунтов приведем кривую, представленную на рис. 3.23, которая была рассчитана в программном пакете *DeepSoil* для модели среды, полученной ранее (рис. 3.22). Коэффициенты демпфирования при расчете для всех слоев модели были заданы равными 0.05.

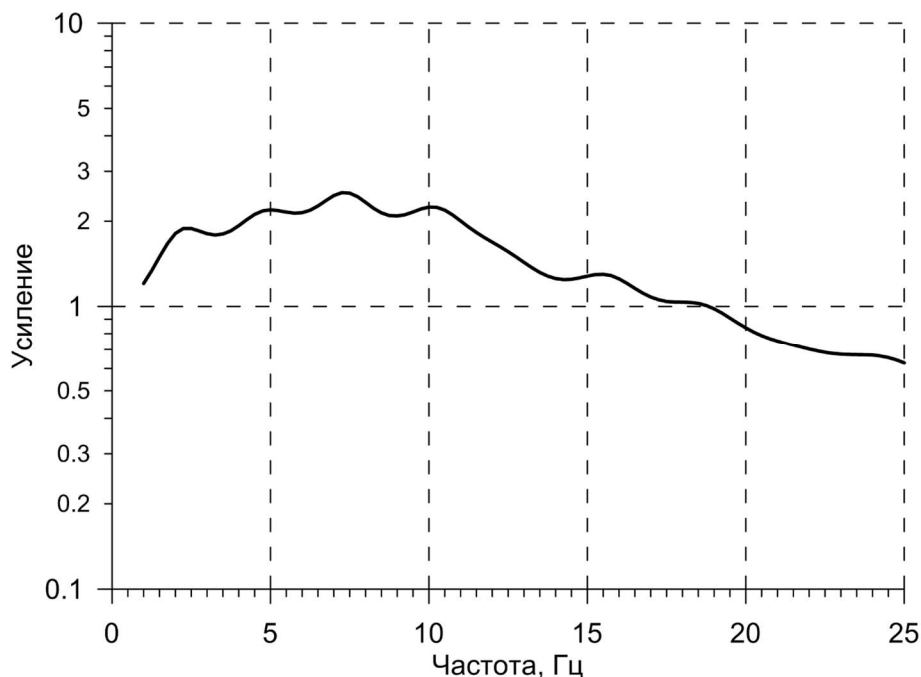


Рис. 3.23. Спектральная (резонансная) характеристика грунта для модели среды, представленной на рис. 3.22

### 3.2.4. Сравнение результатов, полученных способом Накамуры и аналитически

Высокая достоверность спектральных (резонансных) характеристик грунтов, получаемых аналитическим путем, неоднократно подтверждалась результатами экспериментов, выполняемых в рамках работ по оценке сейсмического воздействия взрывных работ на разных объектах. В качестве примера приведем результаты оценки грунтовых условий, полученные на дневной поверхности на одном из них (гипсовая шахта). Здесь помимо прямого метода получения частотных характеристик грунтов посредством применения стандартного (референсного) способа регистрации взрывов на исследуемом и эталонном грунтах также были выполнены исследования грунтовых условий способом Накамуры и методом *SASW* с последующими аналитическими расчетами резонансов в *DeepSoil*. Наличие априорной информации в виде данных бурения разведочно-оценочных скважин дало возможность с высокой достоверностью выполнить инверсию дисперсионной кривой в скоростной разрез. Минимальные невязки на уровне первых процентов подобранной в ходе инверсии расчетной дисперсионной кривой (рис. 3.24) свидетельствуют о корректном подборе скоростной модели среды. Распределение сейсмических скоростей и плотностей на глубину до 45 м, выполненное в пакете программ *GEOPSY*, представлено на рис. 3.25.

Рис. 3.26 сравнение демонстрирует высокую степень сходства спектральных (резонансных) характеристик, полученных способом Накамуры и описанным выше аналитическим способом. На обеих кривых отмечается усиление колебаний в низкочастотной области спектра (от 2 до 13 Гц), при этом на фоне обширного максимума выделяются два довольно четких пика на частотах 3 и 11 Гц, усиление колебаний в этих пиках достигает 2.5 раза. Некоторые отличия в низкочастотной области (до 3 Гц) для приведенной кривой, полученной способом Накамуры, объясняются упомянутыми ранее недостатками и ограничениями способа в случаях, когда кроме объемных волн регистрируются поверхностные волны и разделить их влияние не представляется возможным.

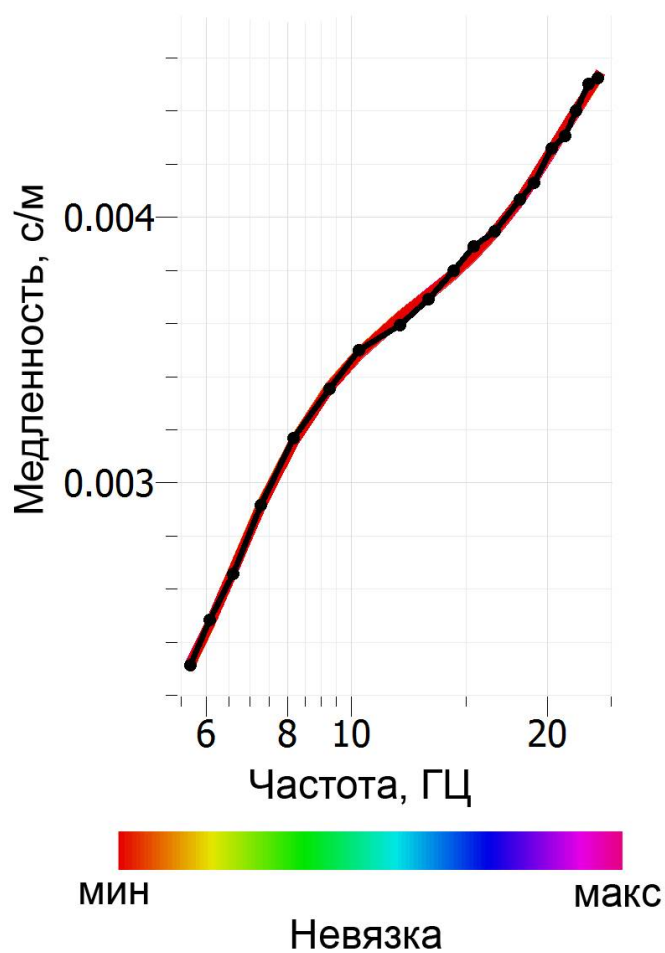


Рис. 3.24. Теоретическая дисперсионная кривая (красная линия) в сравнении с фактическими данными о дисперсии поверхностных волн (черная линия)

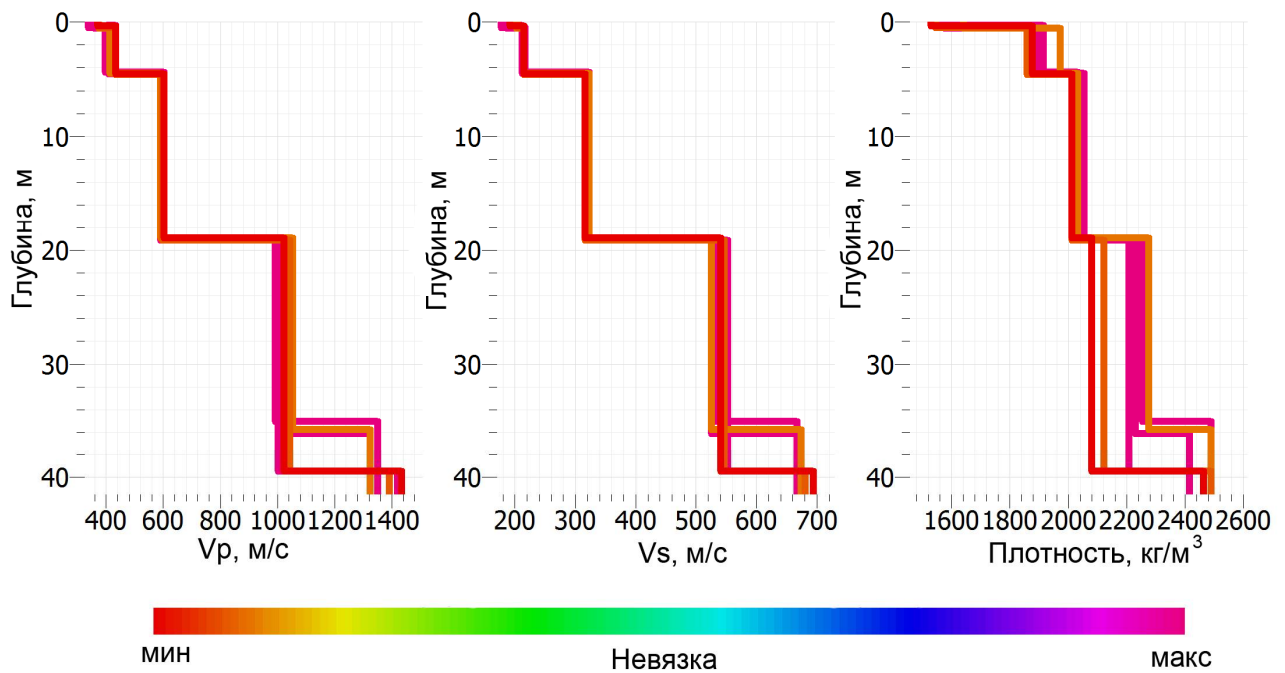


Рис. 3.25. Скоростной разрез продольных и поперечных волн, соответствующий дисперсионной кривой на рис. 3.24

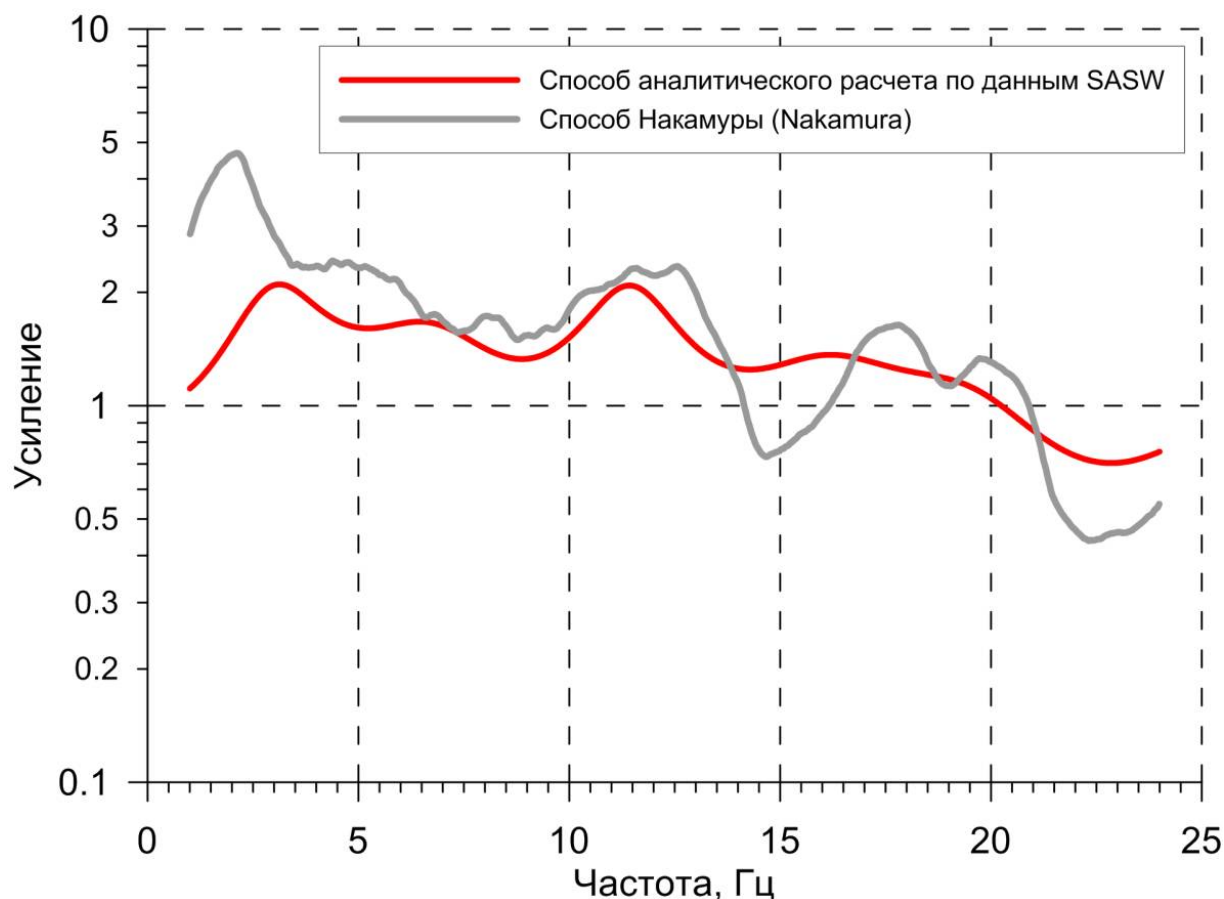


Рис. 3.26 Сравнение спектральных (резонансных) характеристик грунта, полученных разными способами

Таким образом, аналитический способ расчета спектральных (резонансных) характеристик по данным о скоростном строении толщи пород, полученных описанной выше модификацией метода *SASW*, позволяет достаточно достоверно получить абсолютные значения коэффициентов резонансного усиления в спектральной области, что делает его практически ценным инструментом в задаче корректной оценки влияния грунтов на сейсмический эффект. Одновременно стоит иметь в виду, что способ, хотя и позволяет в ограниченные сроки получить результат, все же несколько более трудоемок, чем способ Накамуры и предъявляет повышенные требования к квалификации исполнителей. Также способ применим только в условиях горизонтально-слоистой среды.

### 3.2.5. Статистический способ оценки усилений

Предлагаемый способ использует преимущества, предоставляемые изложенным ранее подходом с применением опорной сейсмической станции (предложенном в разделе 2.6). Автором данный способ был назван статистическим, поскольку для его практической реализации предполагается регистрация нескольких взрывов в одних и тех же пунктах. В основе способа лежит предположение, что разброс нормированных значений от аппроксимирующей функции (полученных с использованием формул 2.2 и 2.3), в которых минимизировано влияние источника, главным образом, обусловлен влиянием приповерхностной толщи пород на амплитуду проходящей сейсмической волны, причем именно в том диапазоне частот, для которого конкретные грунты более избирательны. То есть усиление в каждом пункте можно рассчитать по набору систематических отклонений измеренных (фактических) амплитуд от средних ожидаемых.

Интегральную количественную оценку фактического усиления на исследуемых пунктах для одного взрыва можно рассчитать по формуле:

$$K_{\Gamma} = \frac{A_{и}}{A_{о}} \left( \frac{R_{пр.о}}{R_{пр.и}} \right)^{-b}, \quad (3.14)$$

где  $A_{и}$  и  $A_{о}$  – максимальные амплитуды сейсмического воздействия на исследуемой и опорной точке,  $R_{пр.и}$  и  $R_{пр.о}$  – приведенные расстояния для исследуемой и опорной точки, соответственно.

При наличии записей нескольких взрывов в одном и том же пункте итоговый коэффициент усиления  $K_{\Gamma}$  определяется как среднее геометрическое исходных значений. В случае, когда необходимо получить характеристики грунта в спектральной области (резонансные характеристики), можно вместо максимальных амплитуд  $A_{и}$  и  $A_{о}$  подставить в формулу (3.14) спектральные амплитуды  $S_{и}$  и  $S_{о}$  в интересующем диапазоне частот.

Достоинством интегральной оценки усилений грунтами через максимальные амплитуды сейсмического воздействия является отсутствие необходимости сопоставлять частотный состав генерируемых взрывом сейсмических волн с частотными характеристиками исследуемого грунта, поскольку определение усилений выполняется по максимальным амплитудам



скоростей смещений, которые, по сути, являются результатом наложения характеристик грунтов на спектральные особенности источника. Однако здесь необходимо понимать, что оценки усиления грунтами, будучи полученными относительно опорной станции, имеют не абсолютные значения, так как содержат в себе грунтовые усиления на самой опорной станции.

Очевидно, что для практической реализации вышеописанного способа расчета усиления требуется одновременное использование минимум трех сейсмических станций в широком диапазоне приведенных расстояний (желательно, чтобы отношение максимального к минимальному было не менее 2 октав). Теоретически возможно снизить число станций до двух, последовательно увязывая серии взрывов через опорную станцию, но данный подход требует соответствующего увеличения количества взрывов и времени исследований.

Приведенный далее эксперимент позволил протестировать оценки грунтовых условий, получаемых статистическим способом, провести анализ надежности получаемых величин и оценить повторяемость получаемых результатов. Для этого была осуществлена регистрация колебаний в 6 тестовых пунктах (в том числе на опорной сейсмической станции) серии из 10 специально организованных взрывов. Результаты расчета усиления для 5 экспериментальных пунктов представлены на рис. 3.27. Усами на графике отмечены диапазоны полученных оценок усиления грунтами, а вертикальный размер каждого блока соответствует интерквартильному размаху, который характеризует 50% распределение полученных величин. На рисунке видно, что, несмотря на большой разброс оценок в отдельных пунктах, определяемые усиления статистически достаточно устойчивы ( $>3\sigma$ ), что говорит об их значимости.

В заключении в качестве демонстрации справедливости получаемых оценок приведем сравнение карт статистических усиления с картами, усиления для которых были рассчитаны способом Накамуры и заверены аналитическими расчетами. Пример, представленный на рис. 3.28 демонстрирует высокую степень сходства рассчитанных полей, что говорит об объективности оценок, получаемых статистическим способом.

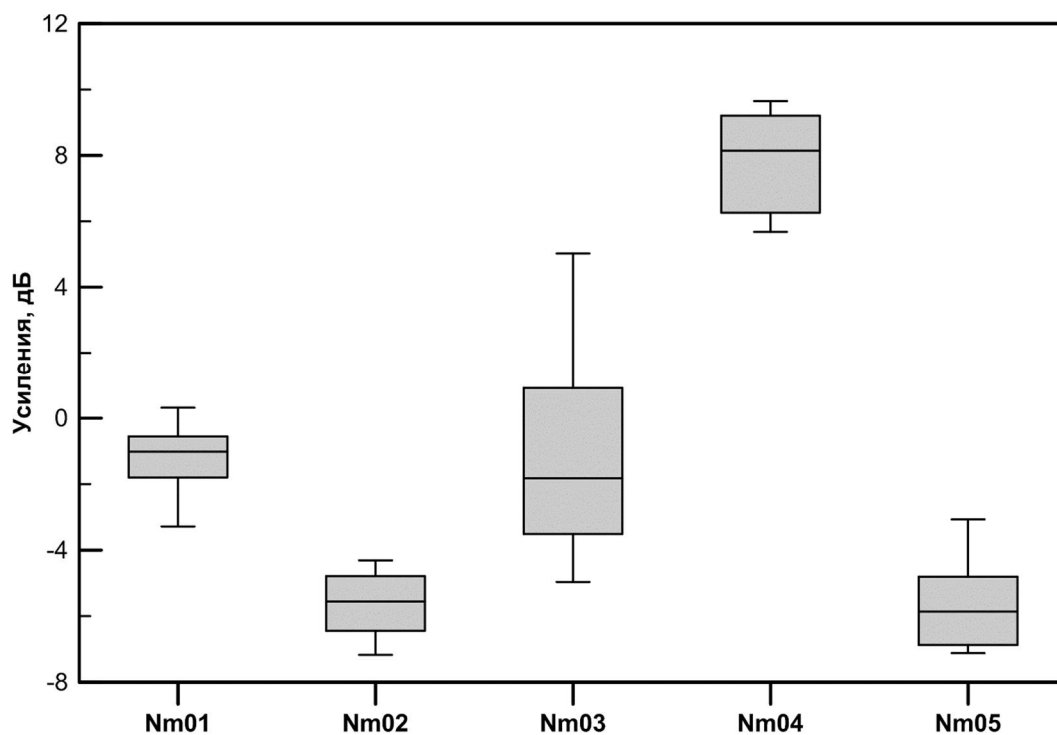


Рис. 3.27. Распределение оценок усиления грунтами для 5 пунктов регистрации серии из 10 взрывов

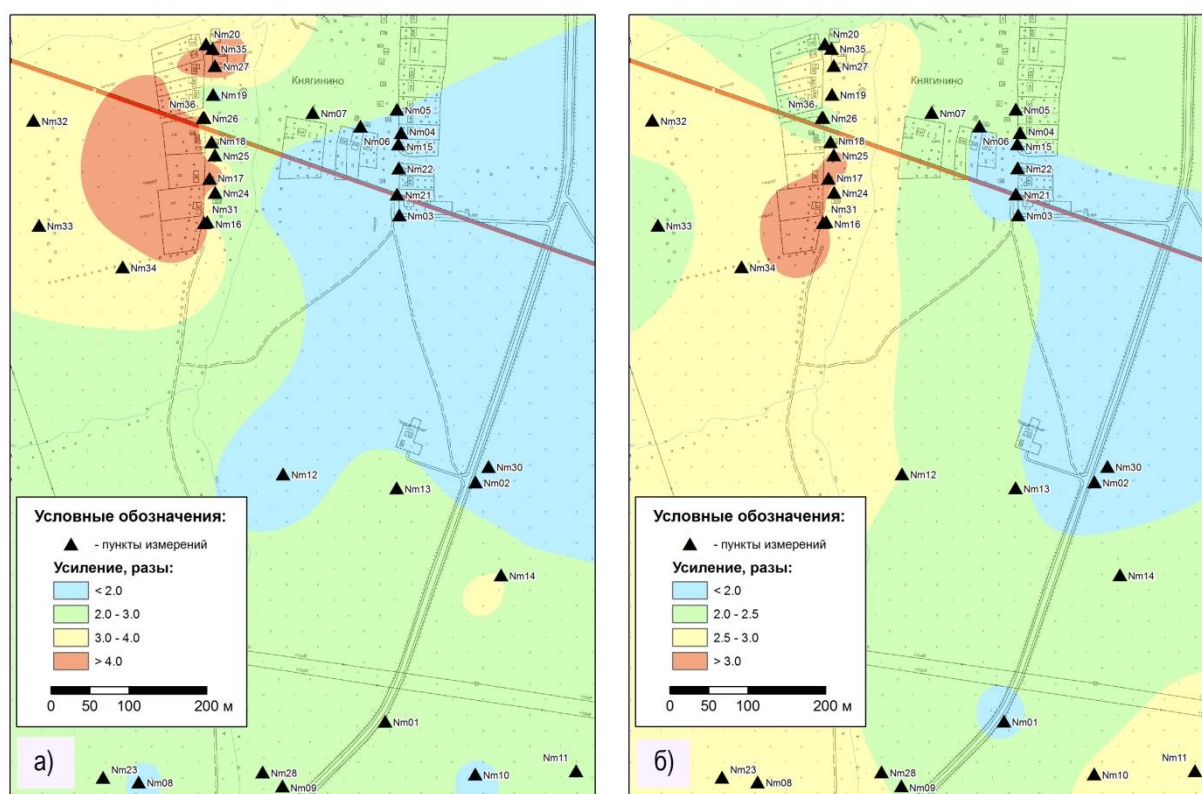


Рис. 3.28. Сравнение карт пространственного распределения усиления, полученных разными способами: а) статистический способ оценки усиления б) способ Накамуры

### 3.3. Выводы

В ходе изучения влияния грунтовых условий (резонансных характеристик грунта) на интенсивность сейсмического воздействия, а также способов их учета, сделаны следующие выводы:

1. Экспериментальные исследования реакции грунтов на сейсмические воздействия показали, что, несмотря на схожий литологический состав и, соответственно, одинаковую характеристику грунтов по ФНП, их реакция может значительно отличаться. То есть на практике может иметь место неадекватная оценка усиления амплитуды колебаний проходящих сейсмических волн и связанных с ними безопасных расстояний.

2. Показано, что учет влияния грунтовых условий при сейсмическом воздействии взрывов в виде одиночного коэффициента, регламентируемого нормативными документами, является простой, но в то же время грубой процедурой, которая может давать большую ошибку в расчете сейсмически безопасного расстояния, исчисляемую разами.

3. Реализованная годовая серия наблюдений по выявлению влияния вариаций гидрогеологических (УГВ) и сезонных (промерзание грунта) условий на интегральное усиление колебаний позволила установить небольшую значимость данных факторов, но в то же время продемонстрировала высокие возможности инструментальных методов оценки такого влияния.

4. Референсный метод регистрации сейсмических волн от импульсных источников является прямым и самым надежным инструментальным способом оценки спектральных характеристик грунтов, однако способ требует большого объема исходных данных (десятки событий), для получения которых может потребоваться длительные интервалы времени (дни-месяцы).

5. Сравнительный анализ спектральных характеристик грунтов, полученных методами регистрации сейсмических волн от импульсных источников и регистрации микросейсм, показал, что метод регистрации микросейсм при определенных условиях обеспечивает получение вполне адекватных оценок резонансных характеристик грунтов за сравнительно

короткие промежутки времени (первые сутки), в связи с чем может использоваться в качестве экспресс-метода.

6. Выполнено сравнение оценок спектральных характеристик грунтов, полученных различными инструментальными методами, основанными на регистрации только микросейсм. Сделан вывод, что стандартный метод регистрации микросейсм может давать существенные искажения в области средних и коротких периодов, в случае если измерения микросейсмического фона производятся в области влияния локальных помех (в частности, на урбанизированных территориях). Способ Накамуры менее подвержен искажениям во всей области исследуемых частот и является самым быстрым по времени получения результатов (минуты-часы), но имеет некоторые ограничения, которые можно преодолеть только при его применении совместно с другими методами.

7. Аналитический способ расчета спектральных характеристик грунтов по данным о скоростном строении толщ пород, получаемых в ходе инструментальных сейсмических исследований (например, методом *SASW*), позволяет получить достаточно надежные оценки абсолютных значений коэффициентов резонансного усиления в широкой полосе частот. Способ позволяет получить результаты в приемлемый ограниченный срок (сутки), но отличается повышенной трудоемкостью при производстве измерений и обработке данных и применим только в условиях горизонтально-слоистой среды.

8. Предложен статистический способ оценки усилений, основанный на регистрации нескольких взрывов в одних и тех же пунктах. Выполненная апробация доказала объективность, получаемых оценок.

9. Доказано, что наиболее адекватные и отвечающие современным требованиям оценки влияния грунтов на сейсмический эффект взрывов могут давать только инструментальные методы, учитывающие как строение, так и физико-механические свойства приповерхностных пород, непосредственно определяющие возникающие в них сейсмические усиления в широком диапазоне частот.

## **ГЛАВА 4. МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЕЛИЧИНЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ НА ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ**

Для обеспечения безопасности ведения взрывных работ важен корректный прогноз величины сейсмического воздействия в отношении охраняемых инженерных сооружений. Точность прогноза будет зависеть от того, насколько хорошо и полно изучено влияние всего многообразия перечисленных в главе 2 факторов для конкретных условий. Надежность зависит от объема исходных данных, позволяющих выявить и описать такое влияние в виде математической модели. Корректный прогноз возможен только при использовании проверенных и апробированных подходов и методик. От качества решения задачи прогнозирования сейсмического воздействия на охраняемые объекты зависит возможность управления его величиной.

Практика разработки месторождений твердых полезных ископаемых показывает, что возможность управления сейсмическим эффектом взрывных работ во многом ограничена горнотехническими и экономическими показателями БВР. Тем не менее, практически на любом горнодобывающем предприятии, проводящим БВР, управление сейсмическим действием взрыва без существенной потери качества дробления и снижения экономической эффективности возможно за счет:

- изменения массы заряда;
- регулирования интервалов замедления;
- изменения количества ступеней замедления;
- обеспечения корректности работы СИ.

Результаты экспериментов, представленные в главах 2 и 3, показывают, что точный прогноз амплитуды сейсмической волны невозможен без инструментальной оценки влияния всего многообразия факторов.

Метод прогнозирования величины сейсмического воздействия взрывных работ на поверхностные здания и сооружения, разработанный в ходе данного исследования, включает в себя порядок проведения инструментальных измерений (регистрация взрывов, изучение грунтовых условий), последующей

обработки данных и интерпретации результатов обработки. В конечном счете, для реализации прогноза величины сейсмического воздействия взрывных работ на поверхностные здания и сооружения  $V_{пр}$  необходимо определение параметров комплексной модели вида

$$V_{пр} = aR_{пр}^{-b} \prod_i k_i, \quad (4.1)$$

описывающей влияние основных (эмпирический коэффициент сейсмичности  $a$ , показатель затухания волн  $b$ , приведенное расстояние  $R_{пр}$ ) и ряда дополнительных факторов  $k_i$  на интенсивность сейсмического воздействия взрывов. Среди рассматриваемых факторов  $k_i$ :

- различия в физико-механических свойствах взрывааемых пород;
- направленность сейсмического излучения;
- различия в условиях и способов взрывания (тип ВВ; форма, конструкция и глубина заложения заряда; величина/качество забойки и величина перебура; интервал замедления и количество ступеней замедления; корректность работы системы инициирования);
- латеральная изменчивость грунтовых условий на охраняемой территории;
- рельеф местности;
- резонансные эффекты охраняемых инженерных сооружений.

Мультипликативный вид модели обусловлен тем, что каждый из рассматриваемых факторов последовательно влияет на амплитуду сейсмической волны, усиливая или ослабляя ее. Владая такой параметрически обеспеченной моделью, можно прогнозировать сейсмический эффект гораздо точнее нормативных способов расчета, а главное, определять оптимальное сочетание всех параметров БВР, обеспечивающее максимально продуктивную и в то же время безопасную разработку месторождения, не оказывающую вредного влияния на близлежащие здания и сооружения.

Особенно важным представляется использование предлагаемого метода прогнозирования величины сейсмического воздействия в следующих случаях:

- при возникновении повреждений в охраняемых зданиях и сооружениях;
- при наличии обоснованных жалоб от населения или иных лиц, эксплуатирующих здания и сооружения;

- если расстояние до охраняемых объектов составляет менее  $2 r_c$  (радиусов сейсмически опасных зон, рассчитанных по «Правилам безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения»);

- при изменении параметров буровзрывных работ (переход на новый тип ВВ или на новую СИ, существенное изменение структуры сети скважин/шпуров, увеличение количества скважин/шпуров, существенное увеличении глубины скважин/шпуров и т.д.);

- при изменении горно-геологической обстановки места ведения БВР.

#### **4.1. Комплекс инструментальных измерений**

С учетом ранее изложенного, для решения задачи прогнозирования амплитуды сейсмической волны и связанной с ней задачи управления сейсмическим эффектом автором предлагается комплекс исследований на горнодобывающих объектах, включающий следующие этапы:

- инструментальные измерения сейсмического воздействия серии взрывов, произведенных в различных горно-геологических условиях;

- спектральный анализ сейсмических записей с определением преобладающих частот колебаний и соответствующих им величин максимальных скоростей смещения грунта;

- пространственный анализ регистрируемого волнового поля на преобладающих частотах колебаний;

- оценка предельно допустимых величин скоростей смещения для всех охраняемых зданий и сооружений с учетом их конструктивных особенностей и состояния (ГОСТ Р 52892-2007, РБ Г-05-039-96);

- получение скоростного разреза верхней толщи пород в районе расположения охраняемых объектов для последующего аналитического расчета спектральных (резонансных) характеристик грунтов;

- инструментальные измерения спектральных (резонансных) характеристик грунтов способом Накамуры и предложенным статистическим способом.

Главным условием реализации такого подхода является использование комплекта регистрирующей аппаратуры, состоящего минимум из пяти трехкомпонентных сейсмических станций, позволяющих фиксировать сейсмические колебания в частотном диапазоне от 1 до 250 Гц. Такое условие обусловлено необходимостью соблюдения ряда требований:

- при планировании полевого этапа максимальную плотность пунктов наблюдения необходимо обеспечить вблизи места ведения БВР, то есть в ближней зоне, где сейсмический эффект представляет максимальную опасность. Вместе с тем, для корректной оценки зависимости амплитуды сейсмической волны от расстояния необходимо иметь пункты наблюдения на разных удалениях, в том числе и больших;

- места установки сейсмических станций выбираются как в непосредственной близости (у основания) инженерных сооружений, так и на других участках охраняемой территории. Такой подход позволяет повысить качество оценки величины сейсмического воздействия на разных расстояниях и изучить грунтовые условия;

- для оценки влияния параметров БВР на амплитуду сейсмической волны наблюдения и взрывные работы организовываются таким образом, чтобы была возможность сформировать серию наблюдений, где меняется только один из параметров БВР, а остальные остаются постоянными;

- кроме измерения скорости колебания грунта в основании сооружения, для строений, имеющих высоту более одного этажа, необходимо выполнять дополнительные измерения на верхних этажах, позволяющие выявить резонансные эффекты конструкций сооружений [113]. Также в каждой серии измерений помимо регистрации взрывов требуется выполнять запись фоновых микросейсмических колебаний;

- для оценки влияния величины интервала замедления при моделировании короткозамедленных взрывов необходима дополнительная серия измерений сейсмического эффекта одиночных взрывов на разных удалениях;

- с целью минимизации случайных (трудноучитываемых) факторов (степень трещиноватости взрываемого блока, качество забойки) и повышения точности прогноза величины сейсмического воздействия, при проведении измерений



необходимо использовать записи взрывов на опорной сейсмической станции, которая в течение всей серии наблюдений должна располагаться в одном и том же пункте, выбираемом по возможности ближе к охраняемым сооружениям, но не слишком близко к месту взрыва для исключения влияния неоднородности волнового поля в ближней зоне. Зарегистрированные на опорной станции и рабочей точке взрывы также позволяют реализовать оценку грунтовых условий способом расчета усиления по отклонениям измеренных фактических амплитуд от средних ожидаемых;

- каждый взрыв необходимо дополнительно регистрировать как минимум одной станцией на минимально возможном расстоянии для контроля корректности работы системы инициирования (СИ) по характеру волновых форм. Данные об отклонениях (разница между паспортным и фактическим временем замедления) позволяют дать инструментальную оценку точности работы СИ [86] и объяснить в ряде случаев различия в уровнях фактических и ожидаемых сейсмических воздействий. Инструментальный контроль работы СИ в каждом из запланированных взрывов также способствует повышению точности прогноза величины сейсмического воздействия, что обеспечивается возможностью увеличения объема экспериментальных данных за счет разделения записи одного короткозамедленного взрыва на серию нескольких, соответствующих каждой отдельной ступени замедления;

- территорию охраняемых объектов, где инструментальная регистрация взрывов не планируется, следует покрыть дополнительными пунктами регистрации микросейсм. Это условие необходимо для надежного прогноза сейсмического эффекта и корректной интерпретации неравномерности его пространственного распределения за счет различия грунтовых условий, которые можно оценить по микросейсмам способом Накамуры [141, 155];

- для калибровки (заверки) результатов, полученных способом Накамуры, на части пунктов необходимо проводить изучение скоростного строения верхней толщи пород, по которому далее выполнять аналитический расчет усиления грунтов в спектральной области с использованием программных пакетов *DeepSoil* [143], *ProShake* [146] или аналогичных. Один из вариантов изучения скоростного строения верхней толщи массива является метод *SASW* [168],

основанный на анализе частотно-скоростной дисперсии [144] поверхностных волн. Расположение пунктов наблюдений должно выбираться с учетом априорной информации о физико-механических свойствах изучаемых грунтов (обычно – данные бурения разведывательных скважин).

Для контроля постоянства амплитудно-частотных характеристик используемой аппаратуры необходимо особое внимание уделять идентичности регистрирующих каналов. Перед проведением полевых измерений и по их окончании должна выполняться сверка регистрирующих каналов, позволяющая учесть возможные изменения характеристик аппаратуры. Если продолжительность полевых работ велика и в данный период времени есть предпосылки для изменения частотных характеристик приборов (например, ежедневная вибронагрузка на сейсмометры, возникающая при их перевозке автотранспортом), то такая сверка необходима также во время полевых работ.

Качество измерений - особенно это актуально для измерений уровня микросейсмических колебаний - в решающей степени определяется условиями установки датчиков. Последние должны размещаться на твердом грунте и иметь с ним надежный контакт. Для обеспечения этого в каждом пункте необходимо производить заглубление датчиков. Находясь в ямах глубиной до 0.5 м, сейсмометры должны тщательно изолироваться от ветровых помех. При наличии вблизи пункта измерения источников потенциальных помех (отдельно стоящие деревья, лесные массивы, работающие механизмы, автодороги и пр.), продолжительность наблюдений должна увеличиться, чтобы обеспечить достаточный объем данных в «тихие» периоды времени.

При планировании пунктов наблюдения необходимо учитывать, что регистрируемый сейсмический эффект взрывов и микросейсмические колебания охватывают объем пород размерами, сопоставимыми с длинами преобладающих по амплитуде волн (до 30 Гц). То есть, фактически, результаты наблюдений в каждом пункте будут характеризовать всю прилегающую область с горизонтальными размерами до первых десятков метров. Для измерения сейсмического воздействия взрывных работ на охраняемые объекты, сейсмические датчики должны устанавливаться на грунте в основании этих объектов.

## 4.2. Обработка данных инструментальных измерений и интерпретация результатов

Обработка данных инструментальных измерений и интерпретация результатов включает в себя:

- получение максимального модуля вектора массовой скорости смещения;
- определение величины предельно допустимой скорости колебаний грунта для конкретного охраняемого инженерного сооружения;
- определение зависимости амплитуды сейсмической волны от расстояния;
- анализ работы СИ;
- определение изменения амплитуды колебаний за счет резонансных эффектов для сооружений;
- изучение латеральной изменчивости грунтовых условий;
- оценка влияния параметров БВР на амплитуду сейсмической волны;
- прогнозирование амплитуды сейсмической волны в произвольной точке местности.

### 4.2.1. Получение максимального модуля вектора массовой скорости смещения

Первым этапом обработки зарегистрированных взрывов является получение величины максимального модуля вектора массовой скорости смещения ( $V_{\Sigma}$ ). Обработку сейсмической информации рекомендуется выполнять с использованием специализированных программ, разработанных для работы с сейсмическими данными (сейсмограммами). Максимальный модуль вектора массовой скорости смещения определяется по формуле (1.8).

Расчет скоростей смещений по каждой компоненте осуществляется по формуле:

$$V = U_{\text{вх}} \frac{A_c}{A_{\text{max}} K_{\text{пр}}}, \quad (4.2)$$

где  $V$  – скорость смещения грунта, см/с;

$U_{\text{вх}}$  – максимальное напряжение на входе АЦП, В;

$A_c$  – амплитуда сигнала в отсчетах АЦП;

$A_{max}$  – максимальная амплитуда АЦП;

$K_{пр}$  – коэффициент преобразования датчика в рабочей полосе частот.

Максимальное значение определяется после расчета всех мгновенных значений на заданном интервале сейсмограммы, соответствующем сигналу от взрыва.

#### *4.2.2. Определение величины предельно допустимой скорости колебаний грунта для конкретного охраняемого инженерного сооружения*

Как было отмечено ранее, для оценки допустимости полученных величин скоростей колебаний грунта по отношению к охраняемым инженерным сооружениям есть 2 нормативных документа: ГОСТ Р 57546-2017 и РБ Г-05-039-96. ГОСТ Р 57546-2017 носит рекомендательный характер и устанавливает методы измерения вибраций (в том числе и от сейсмических воздействий) и оценки ее воздействия на конструкцию зданий. РБ Г-05-039-96 предназначено для выполнения инженерных оценок опасности аварийных взрывов на потенциально опасных объектах, но это единственный в РФ действующий на данный момент нормативный документ, в котором имеются величины допустимых скоростей для различных сооружений.

Ввиду неоднозначности выбора нормативного документа для определения величины предельно допустимой скорости колебаний грунта для конкретного охраняемого инженерного сооружения, необходимо согласовывать нормативные критерии с представителем горнодобывающей компании и/или контролирующей организации.

В соответствии с п. 4.2 ГОСТ Р 57546-2017 [44], связать повреждения конструкции с воздействием вибрации можно только в том случае, если обследование этой конструкции было проведено непосредственно до и сразу после воздействия. В случае наличия на охраняемой территории сооружений, при проектировании или исследовании которых были установлены специальные требования устойчивости к динамическим нагрузкам, допустимые нагрузки следует принимать в соответствии с паспортом объекта (заключением специализированной организации). Согласно приведенному в ГОСТ Р 52892-2007 комплексному критерию оценки, предельно допустимое значение скорости

$V_{доп}$  при кратковременной вибрации определяют для вертикальной составляющей пикового значения скорости. В соответствии с ГОСТ Р 57546-2017 предполагается, что при отсутствии превышения предельно допустимых скоростей смещений риск повреждения конструкции сооружения будет незначительным.

Согласно «Руководству по анализу опасности аварийных взрывов и определению параметров их механического действия» [104] величина предельно допустимой скорости колебания грунта  $V_{доп}$  в основании сооружения определяется с учетом разделения объектов по их классу и суммарному рангу (раздел 1.3.2).

Для зданий одного и того же типа и ранга существенную роль могут играть различия в качестве и прочностных свойствах строительных конструкций и элементов зданий. Это означает, что некоторая часть сооружений будет иметь повышенную (или пониженную) по сравнению со средней сейсмическую устойчивость. В связи с этим выводы, базирующиеся на инструментальных исследованиях сейсмического эффекта взрывов, должны обязательно носить статистический характер.

Общий принцип охраны сооружений определяется соотношением

$$V_{\Sigma} \leq V_{доп}, \quad (4.3)$$

где  $V_{\Sigma}$  – максимальный модуль вектора массовой скорости смещения, определенные по формуле (1.8),  $V_{доп}$  – допустимая скорость колебания грунта.

#### *4.2.3. Определение зависимости амплитуды сейсмической волны от расстояния*

Полученные на основании натуральных измерений записи взрывов составляют базу для определения зависимости вида (1.7), связывающую амплитуду сейсмической волны с приведенным расстоянием. В главе 1 показано, что расчет приведенного расстояния ( $R_{ЛР}$ ) возможен как от суммарной массы заряда ( $Q_{\Sigma}$ ), так и от максимальной массы на одну ступень замедления ( $Q_{max}$ ). Как показал опыт натуральных измерений, для выбора наиболее корректного варианта в каждом конкретном случае необходимо анализировать зависимость  $R_{ЛР}$  как от суммарной, так и от максимальной массы на ступень замедления.

Нередки случаи, когда возникает необходимость зону упругих деформаций делить на две области и анализировать сейсмическое воздействие в каждой из них отдельно. Причина этого может быть связана как с наличием нелинейных аномальных процессов в ближней зоне, так и с действием эффекта направленности и пр. Необходимость контроля подобного эффекта обусловлена тем фактом, что на минимальных расстояниях сейсмический эффект взрывов представляет максимальную опасность. Пример такого случая представлен на рис. 4.1, где показаны результаты измерения сейсмического воздействия взрывных работ, проводимых в гипсовой шахте ООО «КНАУФ ГИПС НОВОМОСКОВСК» (Тульская область).

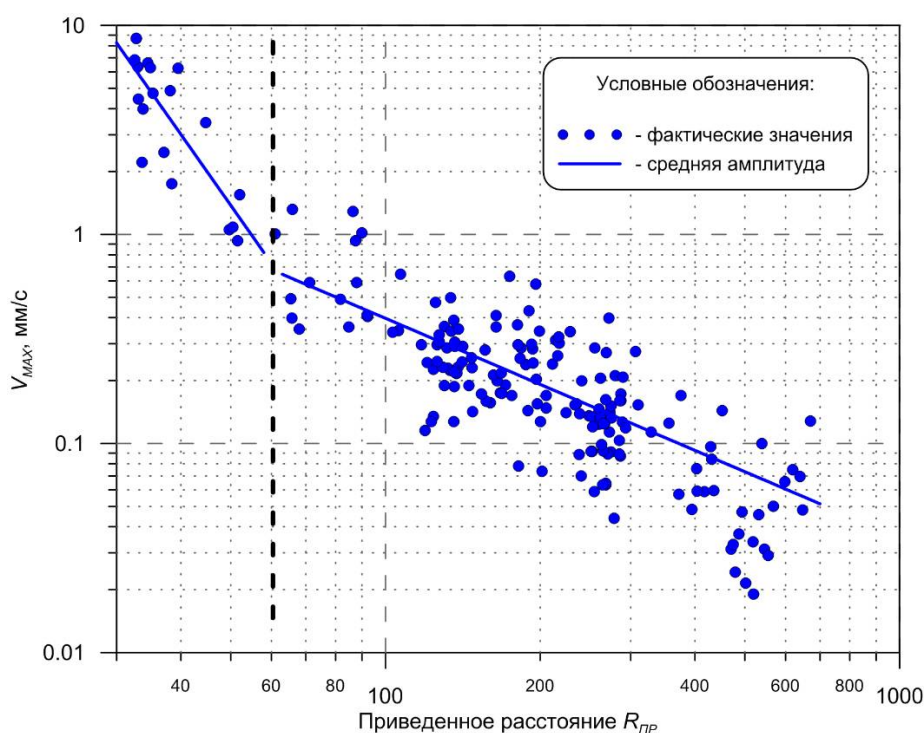


Рис. 4.1. Зависимости векторной скорости смещения грунта от приведенного расстояния над гипсовой шахтой

Полученные записи 30 взрывов составили информационную базу данных для оценки основного критерия сейсмической опасности – максимального модуля вектора массовой скорости смещения у оснований охраняемых зданий и сооружений. Анализ трехкомпонентных волновых форм показал, что зависимость амплитуды от приведенного расстояния для данного объекта не монотонна, на малых приведенных расстояниях она убывает заметно быстрее,

чем на больших. Условную границу между зонами с разной скоростью убывания амплитуды сейсмической волны можно провести на уровне  $R_{\text{ПР}} = 60$ .

Стоит отметить, что граница разделения областей с преобладанием различных типов волн в системе координат  $V(R_{\text{ПР}})$  является размытой и условной, поскольку приведенное расстояние  $R_{\text{ПР}}$  кроме собственно расстояния, определяющего пространственное положение границы областей, зависит также от массы ВВ, которая может меняться. Все это говорит о том, что при наличии такого эффекта зависимость вида (1.7) стоит строить отдельно для объемных и поверхностных волн ( $V_b(R_{\text{ПР}})$  и  $V_s(R_{\text{ПР}})$ ), а для более точного прогноза амплитуд необходимо использовать их суперпозицию  $V_{\text{max}}(R_{\text{ПР}}) = \max(V_b(R_{\text{ПР}}), V_s(R_{\text{ПР}}))$ .

#### 4.2.4. Анализ работы СИ

Как отмечалось ранее, корректная работа системы инициирования является залогом обеспечения приемлемого уровня сейсмического воздействия за счет недопущения синфазного наложения волн от разных зарядов. Если система инициирования не обеспечивает проектных замедлений (иницирование происходит раньше или позже нужного момента), то возможно искусственное увеличение массы одновременно инициированного ВВ в двух или более скважинах, что может привести к соответствующему усилению сейсмического эффекта.

Инструментальные записи взрывов, выполненные с высоким разрешением, позволяют дать объективную оценку качества работы СИ в виде отклонений фактически измеренных интервалов замедления от проектных. Анализ работы СИ возможен при наличии трёхкомпонентных сейсмических записей, полученных на минимальном расстоянии от места взрыва. Это обусловлено тем, что высокие частоты в спектрах сейсмических сигналов, имея более быстрое затухание, представлены лучше на незначительном удалении от источника, чем на больших расстояниях.

Минимальное расстояние подбирается с учетом динамического диапазона регистрирующего оборудования и затухания волн с помощью зависимости (1.7). Важно обеспечить условия, чтобы максимальная амплитуда регистрируемых сигналов не превышала диапазон измерений регистрирующего оборудования.

Наличие высоких частот в спектре сейсмической записи делает первые вступления сигналов от отдельных взрывов более четкими, что позволяет визуально проследить на сейсмограммах моменты подрыва каждого отдельного заряда короткозамедленного взрыва.

Фактические интервалы замедления определяются по временным интервалам между характерными максимальными пиками амплитуд на записях скоростей сейсмических колебаний (пример на рис. 2.10).

#### *4.2.5. Определение изменения амплитуды колебаний за счет резонансных эффектов для сооружений*

Изменения амплитуды колебаний за счет резонансных эффектов должно быть определено для всех сооружений, имеющих высоту более 2 этажей.

Степень влияния резонансных эффектов рассчитывается отношением максимальной скорости смещения, измеренной наверху сооружения к максимальной скорости смещения в основании. Большие значения усиления следует рассматривать как неблагоприятный фактор. Если инструментальные измерения показывают, что эффект усиления колебаний на верхнем этаже присутствует, то допустимую скорость смещения грунта для данного здания (сооружения) рекомендуется уменьшать пропорционально величине усиления.

#### *4.2.6. Изучение латеральной изменчивости грунтовых условий*

Как показывает опыт исследований сейсмического воздействия сотрясений от природных и техногенных источников, в том числе взрывных работ, фактор грунтовых условий ( $k_{gr}(x,y)$ ) может оказывать значительное влияние на амплитуду сейсмической волны. Анализ распределения уровня сейсмического воздействия взрывов на охраняемых территориях, выполненный для горнодобывающих объектов, ведущих добычу как открытым, так и шахтным способом, показывает, что разная интенсивность колебаний на разных грунтах связана различием их физических свойств, несмотря на то, что согласно классификации ФНП грунты формально относятся к одной категории.

В рамках предложенного комплекса инструментальных измерений (раздел 4.1) предлагается реализовать совокупность трех спектральных способов



изучения грунтовых условий на охраняемой территории. Использование нескольких способов мотивировано возможной разницей в абсолютных величинах усилений грунтов, полученных этими способами (см. главу 3). При наличии сети стационарных пунктов наблюдения грунтовые усиления в них также возможно получить статистическим способом.

Для изучения усилений колебаний за счет грунтовых условий оптимальным представляется следующий порядок действий [165]. Статистический способ оценки усилений выполняется для всех пунктов регистрации взрывов. На участках исследуемой территории, где не осуществляют регистрации взрывов, изучение грунтовых условий выполняют способом Накамуры, наиболее «легким» с позиции как технологии измерений, так и методики обработки полученных данных. Аналитический расчет спектральных характеристик на основе данных о скоростях и плотностях приповерхностных пород осуществляют для каждого из представленных типов инженерно-геологических условий в пределах исследуемой территории, он служит в качестве опорного для остальных используемых подходов. Аналитические расчеты могут быть реализованы с помощью специальных программных пакетов *Shake* [158], *DeepSoil* [143] или аналогичных, которые симулируют прохождение сейсмических волн через исследуемую толщу и сравнивают характеристики сейсмических сигналов на входе и на выходе.

Главной задачей обработки данных, полученных способом Накамуры, является расчет поляризационных  $H/V$  спектров с помощью формулы (3.7) через обычные амплитудные спектры, получаемые с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ). Также могут быть использованы и другие спектральные оценки (не спектры мощности) [62]. Далее полученные  $H/V$ -спектры преобразуются в коэффициенты усиления в целевом частотном диапазоне (полоса значимых частот сейсмических воздействий взрывных работ).

После увязки и объединения результатов, полученных разными подходами, строится итоговая карта пространственной изменчивости коэффициентов резонансного усиления грунтами.

#### 4.2.7. Оценка влияния параметров БВР на амплитуду сейсмической волны

Для оценки влияния параметров БВР на амплитуду сейсмической волны используется параметр  $dV$ , описанный в главе 2 настоящей работы (формула (2.1)). Данный параметр используется при анализе различных наборов данных, в которых переменной является только анализируемый фактор. Степень влияния рассматриваемого фактора должна определяться в результате статистической обработки достаточного количества взрывов (определяется опытным путем и зависит от многообразия горнотехнических условий для данного горнодобывающего предприятия).

В случае влияния грунтовых условий в пункте наблюдения, где установлена сейсмическая станция,  $V_{ож}$  формулы (2.1) определяется следующим образом:

$$V_{ож} = aR_{пр}^{-b}K_{Г}, \quad (4.4)$$

Анализ распределения  $dV$  для различных наборов данных позволяет выявить влияние параметров БВР на амплитуду сейсмической волны и учесть в предложенной комплексной модели (4.1).

#### 4.2.8. Прогнозирование амплитуды сейсмической волны в произвольной точке местности

Для определения величины показателя затухания  $b$  и коэффициента сейсмичности  $a$  формулы (4.1) используется способ компенсации случайных факторов, связанных с условием взрывания, посредством использования опорной сейсмической станции (глава 2).

В случае фиксации влияния дополнительных факторов  $k_i$  (параметры БВР, свойства среды в пункте наблюдения и др.) в условиях конкретного горнодобывающего объекта, зависимость (1.7) дополняется значениями соответствующих коэффициентов и приобретает вид комплексной модели (4.1).

При необходимости могут быть рассчитаны палетки, с помощью которых можно выполнять экспресс-оценку сейсмического воздействия для конкретных условий (например, для фиксированных значений массы ВВ).

### **4.3. Апробация метода прогнозирования величины сейсмического воздействия взрывных работ на поверхностные здания и сооружения**

Описанные подходы в том или ином виде прошли тестирование на нескольких предприятиях, ведущих добычу буровзрывным способом.

Предложенный комплекс исследований прошел апробацию в рамках НИР по разработке рекомендаций для оптимизации параметров БВР с целью снижения сейсмического эффекта взрывов на карьере «Шах-тау» АО «Сырьевая компания». Целью работ было определение параметров комплексной модели (4.1) для реализации корректного прогноза сейсмических воздействий, при этом взрывные работы на объекте велись в весьма неблагоприятных горно-геологических условиях (высокая обводненность массива, значительная неоднородность среды распространения волн), когда сейсмический эффект приближался к максимально допустимым величинам, причем имели место случаи, когда на больших удалениях сейсмический эффект был сильнее, чем вблизи от карьера. Главным условием приемки результатов работ было соответствие прогнозных оценок фактически измеренным в ходе проведения тестовых взрывов.

Разрабатываемый карьер находится рядом с п. Шах-Тау, г.Стерлитамак (участок №1 на рис. 4.2) и д. Восток, Ишимбайский район (участок №2 на рис 4.2). Расстояние от места проведения БВР до ближайших зданий составляет около 500 м, максимальное удаление от взрывов в обводненной части карьера составляет около 2 км. Застройка на рассматриваемой территории представлена преимущественно одноэтажными зданиями жилого назначения. Также имеются объекты с большим скоплением людей (5-этажные здания на ул. К.Либкнехта). Часть зданий имеет высокий износ, поэтому обеспечение их сохранности при ведении БВР является важной технической и социальной задачей. Инструментальные измерения сейсмического воздействия взрывов были проведены в основании 30 инженерных сооружений.

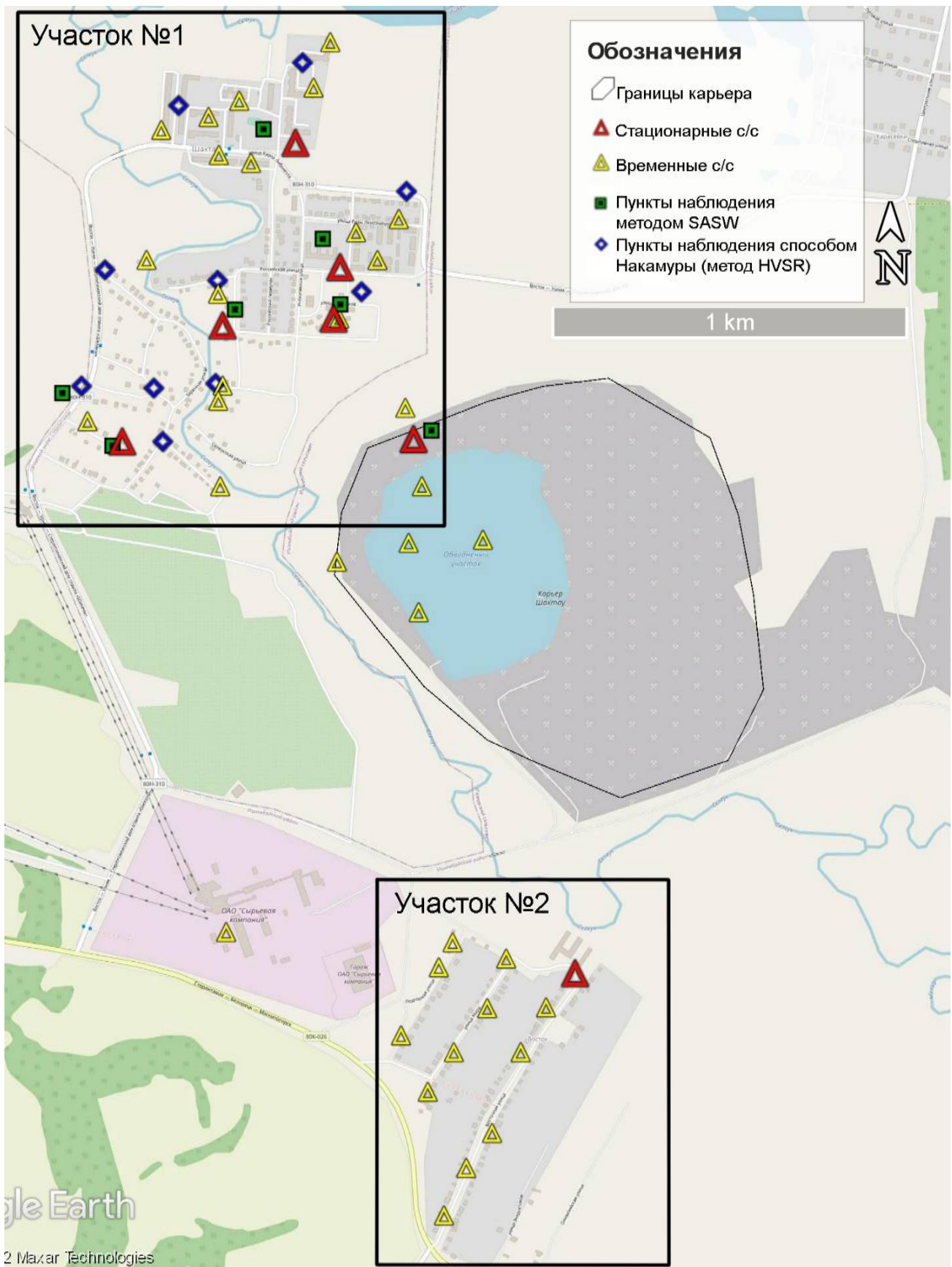


Рис. 4.2. Схема расположения пунктов наблюдения в районе карьера

Для решения поставленной задачи и постоянного контроля уровня сейсмического воздействия, на территории соседних с карьером населенных

пунктов, было установлено несколько стационарных сейсмических станций на базе трехкомпонентных датчиков MTSS-1003 и регистраторов Байкал-8. Общая схема расположения пунктов наблюдения приведена на рис. 4.2.

Местоположения сейсмических станций на исследуемой территории выбирались в соответствии с требованиями, изложенными в гл. 4.1, с учетом азимута и удаленности от источника таким образом, чтобы была возможность получать информацию в широком диапазоне расстояний и учитывать азимутальную анизотропию затухания волн. Часть сейсмических станций располагалась в основании охраняемых инженерных сооружений. Наличие пунктов наблюдения в непосредственной близости к месту ведения взрывных работ обусловлено необходимостью контроля применяемых систем инициирования. Также выполнена регистрация взрывов одиночных скважин на разных расстояниях с последующим моделированием короткозамедленных взрывов для оценки влияния величины интервала замедления.

Кроме наблюдений в стационарных пунктах, часть измерений выполнялась во временных пунктах аналогичным оборудованием. Дополнительно для изучения влияния грунтовых условий и получения резонансных характеристик колебаний грунта были проведены измерения способом Накамуры (метод *HVSR*) и методом спектрального анализа поверхностных волн *SASW*.

Большое количество пунктов наблюдения и взрываемых блоков (в том числе специально организованных взрывов одиночных скважин), проведенных за двухгодичный период наблюдения (2016-2017 гг.), позволило получить значительный объем фактического материала в широком диапазоне эпицентральных расстояний. Общая для всей охраняемой территории зависимость скорости смещения от приведенного расстояния по данным всех взрывов представлена на рис. 4.3. Величины показателя затухания  $b$ , как и коэффициента сейсмичности  $a$ , скорректированы путем нормирования измеренных амплитуд и приведенных расстояний к таковым на опорном пункте (см. гл. 2).

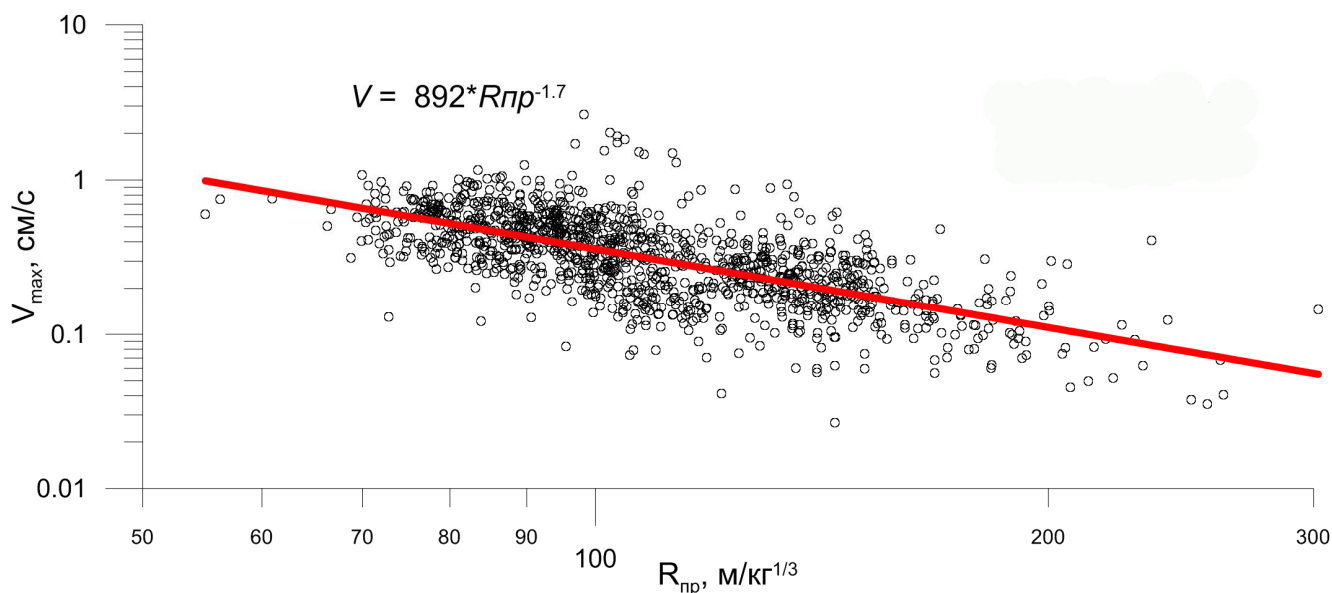


Рис. 4.3. Зависимость скорости смещений от приведенного расстояния в условиях исследуемой территории

Как видно из приведенного рисунка, точки образуют почти равномерное распределение в диапазоне приведенных расстояний от 70 до 160 м/кг<sup>1/3</sup>. Менее представительны данные в диапазоне от 160 до 300 м/кг<sup>1/3</sup>, однако это не является критичным, так как такие приведенные расстояния характеризуются относительно слабым уровнем сейсмического воздействия. Также можно заметить, что приведенное расстояние рассчитывалось через максимальную массу одиночного заряда.

Допустимые нагрузки для охраняемых инженерных сооружений были определены согласно «Руководства по анализу опасности аварийных взрывов и определению параметров их механического действия» (РБ Г-05-039-96). Результаты инструментального контроля не выявили превышения допустимых величин. Но для некоторых охраняемых инженерных сооружений зарегистрированные максимальные скорости смещения в их основании приблизились к допустимым величинам. Это обстоятельство подтвердило актуальность изучения влияния параметров БВР и грунтовых условий на охраняемой территории.

В условиях данного объекта изучалось влияние нескольких факторов. Среди них рассматривались тип ВВ, величина интервалов замедления и количество скважин в блоке. Для анализа использовался параметр  $dV$ , описанный в главе 2

настоящей работы. На рис. 4.4 приведены гистограммы распределения параметра  $dV$ , построенные для различных наборов данных, в которых переменной является только анализируемый фактор. Сравнение полученных пар распределений для типа ВВ, интервалов замедления и количества скважин в блоке говорит об отсутствии статистически значимого влияния рассматриваемых факторов. Отклонения  $dV$  для разных наборов, выявленные в долговременных пунктах наблюдения, имеют незначительные величины. При этом максимумы распределения самих отклонений  $dV$  практически совпадают. Незначительный сдвиг в сторону завышения ожидаемых (прогнозных) величин наблюдается лишь для распределений  $dV$  (рис. 4.4в), характеризующих взрывы в блоках, в которых количество скважин  $\leq 10$ .

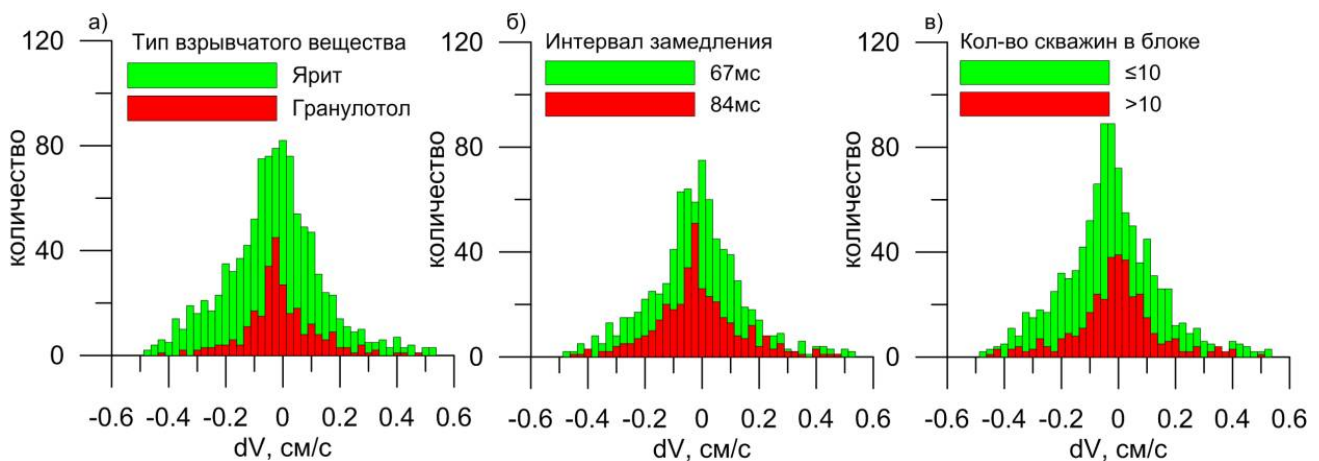


Рис. 4.4. Гистограммы распределения отклонений сейсмического эффекта от ожидаемых значений для разных типов ВВ (а), интервалов замедлений (б) и количества скважин в взрываемом блоке (в)

Единственным значимым фактором в данных условиях, как и ожидалось, оказался коэффициент латеральной изменчивости грунтовых условий  $k_{gr}(x,y)$ . Как показали наблюдения, грунты оказывают значительное влияние на уровень сейсмического воздействия на изучаемой территории, несмотря на схожий литологический состав в разных точках исследуемой территории. Изучение спектральных (резонансных) характеристик грунтов на объекте выполнялось с использованием предложенного в главе 4.1 комплекса подходов. Полученная в итоге карта пространственного распределения усиления грунтами (рис. 4.5) на охраняемой территории в диапазоне преобладающих частот (2-17 Гц) позволяет

сделать вывод о существенной латеральной изменчивости грунтовых условий: значения  $K_{gr}(x,y)$  изменяется в пределах 0.6 – 2.2.

Предложенный комплекс исследований позволил выполнять прогноз максимальной скорости смещения в произвольной точке местности исследуемой территории с высокой надежностью. Проверка точности прогноза выполнялась в ходе нескольких серий тестовых взрывов, проведенных в разных частях карьера. Контрольные пункты измерения сейсмического эффекта заранее не были известны.

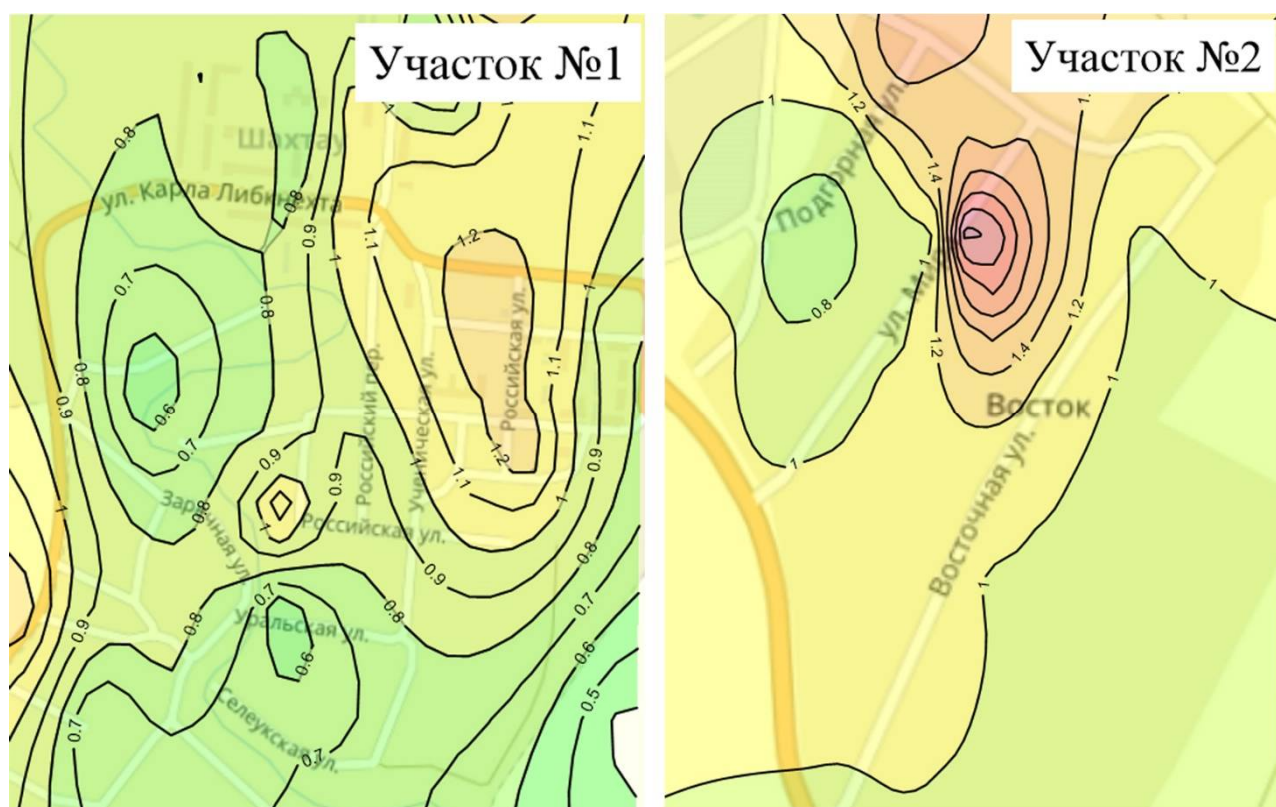


Рис. 4.5. Карта пространственной изменчивости коэффициентов резонансного усиления грунтами на двух участках для сейсмических воздействий в диапазоне 2-17 Гц

Реализация предложенной модели прогнозирования сейсмического воздействия взрывов представлена на рисунке 4.6. На рисунке сплошной линией показана средняя зависимость затухания волн, полученная без учета спектрально избирательного влияния грунтовых условий и без использования опорной точки. Скорректированная зависимость (по опорной точке) совместно с информацией о латеральной изменчивости грунтовых условий позволила более корректно подойти к вопросу прогнозирования амплитуды сейсмической волны в



произвольной точке. В результате эксперимента был достигнут 92% уровень соответствия прогнозных оценок в пределах заданной погрешности, установленной заранее ( $\pm 0.2$  см/с для диапазона расстояний 300-1000 м и  $\pm 0.1$  см/с на расстояниях 1000-1500 м).

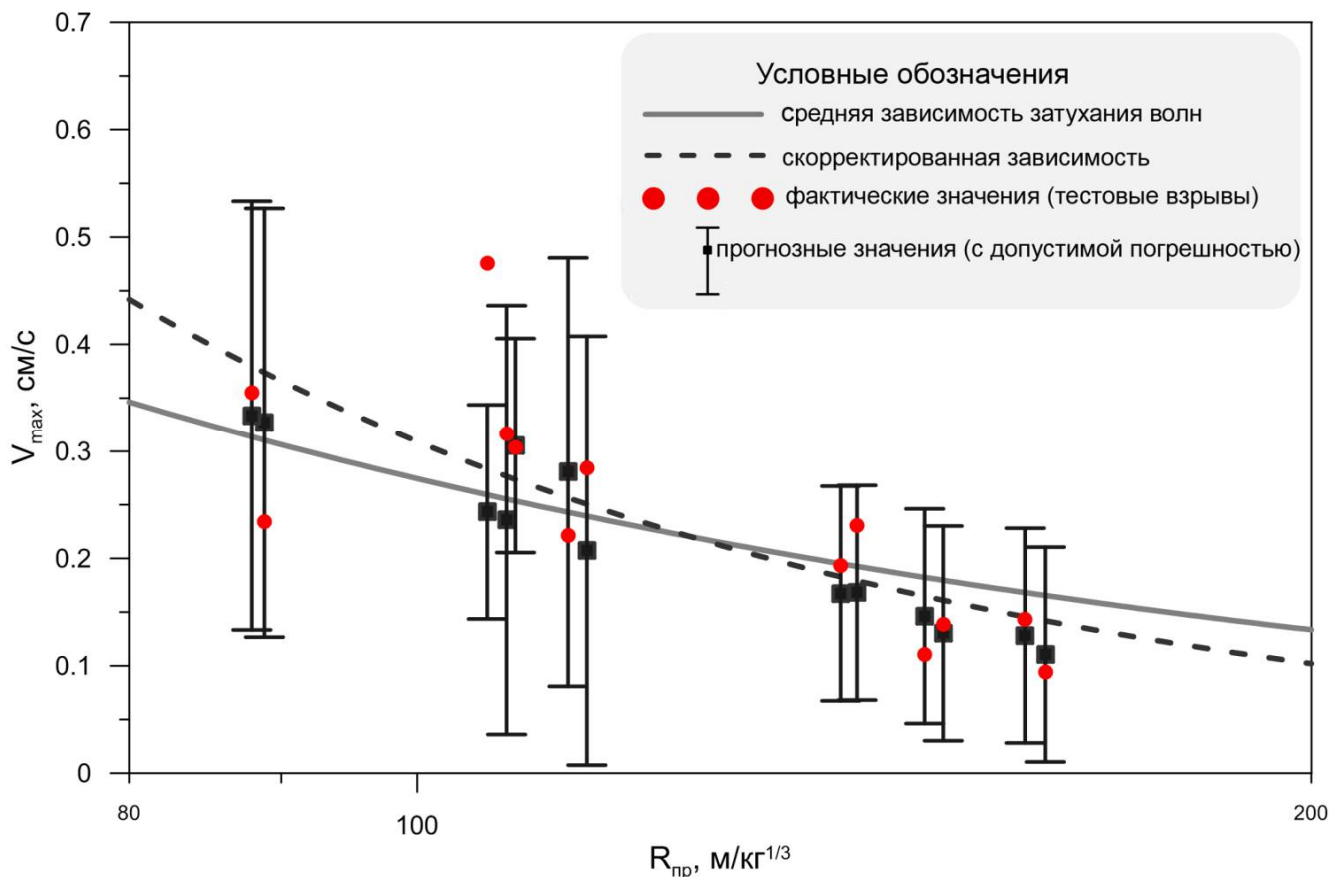


Рис. 4.6. Результаты прогноза сейсмического воздействия взрывов, реализованного с помощью предложенной модели (пояснения в тексте)

Результаты сравнения прогнозных оценок, полученных после внедрения метода прогнозирования, для точек в пространстве, где было зарегистрировано 3 и более взрывов, представлены в таблице 4.1. Взрывы производились в разных частях карьера, станции располагались на различных удалениях. Как можно заметить, средняя ошибка прогноза, выполненного стандартным подходом, почти всегда превышает ошибку прогноза взрыва (в среднем в 3 раза), выполненного с учетом влияния грунтовых условий. При этом вариации отклонений фактических величин от прогнозных сохранились на том же уровне.

Таким образом, предложенный метод прогнозирования величины сейсмического воздействия взрывных работ, основанный на выявлении

спектрально значимого влияния основных факторов, определяющих интенсивность сейсмического воздействия, позволил уменьшить ошибку прогноза величины сейсмического эффекта ( $V_{\Sigma}$ ) по сравнению с традиционным подходом: в среднем ошибка уменьшилась в 3 раза, а в отдельных случаях в 10 раз и более. Приведенные результаты свидетельствуют об эффективности предложенного метода прогнозирования амплитуды сейсмической волны, особенно в условиях, когда нормативные подходы могут давать значительные ошибки.

Таблица 4.1

Сравнение прогнозных оценок, полученных разными подходами

Номер объекта	Коэффициент усиления	Кол-во взрывов	Диапазон расстояний, м	Стандартный подход		Предлагаемый метод	
				Средняя ошибка прогноза, см/с	Стандартное отклонение прогноза, см/с	Средняя ошибка прогноза, см/с	Стандартное отклонение прогноза, см/с
1	1.5	3	546-660	0.12	0.2	0.05	0.12
2	0.62	3	786-945	0.10	0.03	0.01	0.03
3	0.92	3	491-721	0.03	0.07	0.002	0.07
4	0.89	3	1047-1165	0.03	0.04	0.01	0.03
5	0.74	3	538-692	0.10	0.07	0.01	0.05
6	1.27	3	808-937	0.05	0.07	0.02	0.08
7	1.89	3	673-796	0.22	0.01	0.04	0.02
8	1.11	105	1023-1428	0.05	0.11	0.03	0.11
9	1.12	133	546-954	0.05	0.19	0.005	0.19
10	1.16	131	1032-1448	0.05	0.1	0.02	0.1
11	1.2	135	660-1074	0.08	0.14	0.01	0.14
12	1.13	4	668-870	0.07	0.28	0.04	0.28
13	1.1	4	1173-1372	0.11	0.15	0.06	0.15
14	1	4	880-1090	0.09	0.14	0.09	0.14
15	1.34	4	801-998	0.14	0.22	0.04	0.22
<b>По всем объектам:</b>				<b>0.09</b>	<b>0.12</b>	<b>0.03</b>	<b>0.12</b>

#### 4.4. Выводы

По результатам апробации метода прогнозирования величины сейсмического воздействия взрывных работ на поверхностные здания и сооружения были сделаны следующие выводы:

1. Возможность управления сейсмическим эффектом взрывных работ во многом ограничена горнотехническими и экономическими показателями БВР. Поэтому для обеспечения продуктивной и безопасной разработки месторождения, а также минимизации вредного влияния сейсмике взрывов на охраняемые инженерные сооружения, крайне важным является корректный прогноз величины сейсмического воздействия на охраняемые объекты.

2. Предложена комплексная модель прогноза сейсмического воздействия взрывов с учетом влияния параметров: источника волн (масса и тип ВВ, интервал замедления и др.), среды распространения волн (расстояние, скорость затухания), пункта приема волн (грунтовые условия, рельеф местности).

3. Разработан метод прогнозирования величины сейсмического воздействия взрывных работ на поверхностные здания и сооружения, включающий комплекс инструментальных измерений (регистрация взрывов, изучение грунтовых условий), обработку полученных данных и интерпретацию результатов обработки.

4. Для изучения усилений колебаний за счет грунтовых условий и объяснения особенностей пространственного распределения сейсмического эффекта на изучаемой территории в рамках комплекса инструментальных измерений предложено реализовывать совокупность трех спектральных способов изучения грунтов.

5. Выполненная апробация метода прогнозирования величины сейсмического воздействия взрывных работ на поверхностные здания и сооружения показала его эффективность при решении поставленных задач.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные и практические результаты диссертационной работы сводятся к следующему:

1. Выполнена регистрация и анализ волновых форм наземных и подземных взрывов на различных горнодобывающих объектах. На основе результатов этих измерений изучено влияние параметров источника и среды на величину сейсмического воздействия промышленных взрывов.

2. Инструментальные измерения взрывов показали, что способ определения сейсмически безопасных расстояний по Федеральным нормам и правилам в области промышленной безопасности «Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения», учитывает не все факторы, которые влияют на амплитуду сейсмического воздействия. Натурные измерения показали, что диапазоны изменений условий взрывания, свойств грунта в основании здания, а также степени вреда воздействий на различные типы сооружений гораздо шире, чем представлено в ФНП.

3. Область использования факторов, связанных с параметрами БВР, для управления уровнем сейсмического воздействия существенно ограничена горнотехническими показателями взрыва и другими техническими особенностями производства и не позволяет в полной мере регулировать уровень сейсмического воздействия. В связи с этим, для соблюдения безопасности ведения взрывных работ важен корректный прогноз уровня сейсмического воздействия.

4. Опыт наблюдений выявил большое значение фактора грунтовых условий. На примерах показано, что традиционный способ учета фактора грунтовых условий в нормативных документах в области сейсмической безопасности в виде одиночного интегрального коэффициента может давать большую ошибку в расчете сейсмически безопасного расстояния, исчисляемую разами.

5. Выполнено сравнение резонансных характеристик исследуемых грунтов, полученных инструментальными (метод регистрации взрывов, метод регистрации микросейсм), теоретическими (метод расчета резонансных характеристик по скоростному разрезу) и экспериментальными (метод *HVSR*)

методами. Сделаны выводы о перспективности их использования в рамках комплекса инструментальных измерений для решения задачи прогнозирования сейсмического воздействия взрывных работ.

6. Разработана и прошла тестирование на объектах с различными инженерно-геологическими условиями собственная модификация метода спектрального анализа поверхностных волн (*SASW*).

7. Предложен статистический способ оценки усилений за счет грунтовых условий, основанный на регистрации нескольких взрывов в одних и тех же пунктах. Выполненная апробация доказала объективность оценок, получаемых статистическим способом.

8. Разработан подход с использованием интегральной оценки отдельной группы трудноучитываемых факторов со значительной случайной составляющей через точное измерение и фиксирование других параметров взрыва. Способ компенсации случайных факторов с использованием опорной сейсмической станции позволяет повысить надежность прогноза уровня воздействия за счет более надежного определения параметров затухания и возможности прямой оценки усиления колебаний грунтами.

9. Разработан метод прогнозирования величины сейсмического воздействия взрывных работ на поверхностные здания и сооружения, включающий комплекс инструментальных измерений (регистрация взрывов, изучение грунтовых условий), обработку полученных данных и интерпретацию результатов обработки.

10. Выполненная апробация метода прогнозирования величины сейсмического воздействия взрывных работ на поверхностные здания и сооружения показала его эффективность при решении поставленных задач.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авершин С.Г. Деформационные свойства и устойчивость горных пород при сейсмическом действии взрыва / С.Г. Авершин, В.Н. Мосинец В.Н. - Фрунзе: ИНТИ Кирг. ССР, Фрунзе, 1967. - 22 с.
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. - N 12. - С. 256-266.
3. Адушкин В.В. Взрывы и землетрясения на территории Европейской части России / В.В. Адушкин, А.А. Маловичко. - М.: ГЕОС, 2013. - 384 с.
4. Адушкин В.В. Геоэкологические последствия массовых химических взрывов на карьерах / В.В. Адушкин, А.А. Спивак, С.П. Соловьев, Л.М. Перник, С.Б. Кишкина // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. - 2000. - N 6. - С. 554-563.
5. Адушкин В.В. Подземные взрывы / В.В. Адушкин, А.А. Спивак. - М.: Наука, 2007. - 578 с.
6. Аки К. Количественная сейсмология: теория и методы / К. Аки, П. Ричардс. - М.: Мир, Т.1, 1983. - 520 с.
7. Алешин А.С. О влиянии обводненности грунтов на результаты сейсмического микрорайонирования / А.С. Алешин, Е.В. Пиоро // Инженерные изыскания. - 2015. - N 4. - С. 34-40.
8. Алешин А.С. Основы континуальной теории сейсмического микрорайонирования / А.С. Алешин // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. - 2015. - N 5. - С. 18-26.
9. Аносов Г.И. Оценка сейсмической устойчивости учебного корпуса № 3 Российского государственного университета им. И. Канта с применением методики Накамура / Г.И. Аносов, М.В. Дробиз, О.А. Коновалова, Д.С. Сотников, В.Я. Чугаевич // Вестник Камчатской региональной организации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. - 2010. - N 15. - С. 223-231.
10. Антипов В.В. Современные неразрушающие методы изучения инженерно-геологического разреза / В.В. Антипов, Офрихтер В.Г. // Вестник

Пермского национального исследовательского политехнического университета.  
Строительство и архитектура. - 2016. - Т.7. - N 2. - С. 37-49.

11. Аптикаев Ф.Ф. Оценка сейсмической опасности и сейсмического риска / Ф.Ф. Аптикаев, В.Г. Гитис, Г.Л. Кофф, Н.И. Фролова. - М.: ОИФЗ РАН, 1997. - 54 с.

12. Аптикаев Ф.Ф. Сейсмические колебания при землетрясениях и взрывах / Ф.Ф. Аптикаев. - М.: Наука, 1969. - 104 с.

13. Аптикаев Ф.Ф. Уточнение корреляций между уровнем макросейсмического эффекта и динамическими параметрами движения грунта / Ф.Ф. Аптикаев, Н.В. Шебалин. // Вопросы инженерной сейсмологии, выпуск 29. - 1988. - С. 98-108.

14. Архипов В.Н. Механическое действие ядерного взрыва / В.Н. Архипов, В.А. Борисов, А.М. Будков и др. - М.: Физматлит, 2003. – 326 с.

15. Баркан Д.Д. Сейсмозрывные волны и действие их на сооружения / Д.Д. Баркан. - М.: Стройиздат, 1946. - 76 с.

16. Барон К.А. Техника и технология взрывных работ в США / К.А. Барон, В.Х. Кантор. - М.: Недра, 1989. - 350 с.

17. Богацкий В.Ф. Охрана инженерных сооружений и окружающей среды от вредного действия промышленных взрывов / В.Ф. Богацкий, А.Г. Фридман. - М.: Недра, 1982. - 162 с.

18. Богацкий В.Ф. Сейсмическая безопасность при взрывных работах / В.Ф. Богацкий, В.Х. Пергамент. - М.: Недра, 1978. - 128 с.

19. Боровиков В.А. Закономерности затухания волн напряжений при прохождении через трещину / В.А. Боровиков, И.Ф. Ванягин, Б. Лайхансурэн, В.П. Беляцкий // Взрывное дело №85/42 - М.: Недра, 1983. - С. 52-60.

20. Брюн Д. Сейсмические волны и строение земной коры в районе Канадского щита. Строение Земли по поверхностным сейсмическим волнам / Д. Брюн, Д. Дорман. - М: Мир, 1965. - 304 с.

21. Верхованцев А.В. Апробация методики оценки сейсмического влияния БВР на здания и сооружения / А.В. Верхованцев // Стратегия и процессы освоения георесурсов : сборник научных трудов / ГИ УрО РАН. - 2014. - С. 206-209.

22. Верхованцев А.В. Влияние локальных факторов на результаты сейсмического микрорайонирования / А.В. Верхованцев // Седьмая Международная научно-практическая конференция-конкурс “ГЕОФИЗИКА-2009”. - 2009. – С. 118-119.

23. Верхованцев А.В. Использование дисперсионных кривых поверхностных волн для изучения грунтовых условий в рамках работ по СМР / А.В. Верхованцев // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XII Международной сейсмологической школы. - Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН. - 2017. - С.79-81.

24. Верхованцев А.В. Контроль сейсмического воздействия БВР по результатам круглогодичного мониторинга / А.В. Верхованцев // Стратегия и процессы освоения георесурсов. Сборник научных трудов. Вып.15. - Пермь: Горный институт УрО РАН. - 2017. - С. 203-205.

25. Верхованцев А.В. Методика оценки грунтовых условий / А.В. Верхованцев // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Десятой Международной сейсмологической школы. - Обнинск: ГС РАН. - 2015. - С. 63-65.

26. Верхованцев А.В. Методы сейсмического микрорайонирования / А.В. Верхованцев, Д.Ю. Шулаков // Геология в развивающемся мире: материалы I Всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с элементами молодежной научной школы: в 2 т. Т. 1. - Пермь: ПГУ. - 2010. - С. 131-134.

27. Верхованцев А.В. Многофакторная оценка сейсмического воздействия взрывов / А.В. Верхованцев // Стратегия и процессы освоения георесурсов. Сборник научных трудов. Вып.11. - Пермь: Горный институт УрО РАН. - 2013. - С. 200-203.

28. Верхованцев А.В. О необходимости проведения прямых инструментальных измерений сейсмического эффекта буровзрывных работ для конкретных условий / А.В. Верхованцев // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XI Международной сейсмологической школы. - Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН. - 2016. - С. 84-87.



29. Верхованцев А.В. О необходимости учета влияния грунтовых условий при оценке сейсмического воздействия взрывных работ / А.В. Верхованцев // XVI уральская молодежная школа по геофизике: Сборник науч. материалов. - Пермь: Горный институт УрО РАН. - 2015. - С. 72-77.

30. Верхованцев А.В. Оценка опасности сейсмического воздействия взрывных работ в карьере на близлежащие жилые поселки / А.В. Верхованцев, Т.В. Верхованцева // XII уральская молодежная научная школа по геофизике: Сборник науч. материалов. - Пермь: Горный институт УрО РАН. - 2011. - С. 49-53.

31. Верхованцев А.В. Оценка оптимальности технологии буровзрывных работ по фактору сейсмического воздействия на здания, подрабатываемые шахтой ОАО «КНАУФ ГИПС НОВОМОСКОВСК» / А.В. Верхованцев // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. научн. тр. Вып.14. - Пермь: Горный институт УрО РАН. - 2016. - С. 188-190.

32. Верхованцев А.В. Оценка сейсмического влияния буровзрывных работ на поверхностные здания и сооружения / А.В. Верхованцев, Д.Ю. Шулаков // Геофизика. - 2014. - N 4. - С. 40-45.

33. Верхованцев А.В. Оценка устойчивости влияния локальных факторов на результаты сейсмического микрорайонирования, полученных разными методами регистрации микросейсм / А.В. Верхованцев // Стратегия и процессы освоения георесурсов. Материалы ежегодной научной сессии Горного института УрО РАН по результатам НИР в 2008 г. - Пермь: Горный институт УрО РАН. - 2009. - С. 158-160.

34. Верхованцев А.В. Применение спектрального анализа поверхностных волн в рамках работ по СМР / А.В. Верхованцев // XVIII Уральская молодежная школа по геофизике: Сборник науч. материалов. - Пермь: Горный институт УрО РАН. - 2017. - С. 28-31.

35. Верхованцев А.В. Результаты сейсмического микрорайонирования, полученные методами регистрации взрывов микросейсм / А.В. Верхованцев // XI Уральская молодежная научная школа по геофизике. Сборник докладов. - Екатеринбург: ИГф УрО РАН. - 2010. - С. 49-52.

36. Верхованцев А.В. Современный подход к оценке сейсмического воздействия взрывных работ / А.В. Верхованцев // XIV Уральская молодежная научная школа по геофизике. Сборник докладов. - Пермь: Горный институт УрО РАН. - 2013. - С. 41-45.
37. Верхованцев А.В. Способы учета грунтовых условий при оценке сейсмического воздействия БВР / А.В. Верхованцев // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. научн. тр. Вып.13. - Пермь: Горный институт УрО РАН. - 2015. - С. 201-203.
38. Верхованцев А.В. Сравнительная оценка основных методов сейсмического микрорайонирования / А.В. Верхованцев // Стратегия и процессы освоения георесурсов. Материалы ежегодной научной сессии Горного института УрО РАН по результатам НИР в 2009 г. - Пермь: Горный институт УрО РАН. - 2010. - С. 171-173.
39. Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике / И.А. Викторов. - М: Наука, 1966. - 168 с.
40. Вильчинский В.Б. Методы снижения интенсивности сейсмических и ударных воздушных волн при проведении взрывных работ на горных предприятиях Норильска: автореф. дисс. на соиск. уч. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук / Вильчинский Владислав Борисович. - Санкт-Петербург, 2009. - 20 с.
41. Власов О. Е. Основы расчета дробления горных пород взрывом / О.Е. Власов, С.А. Смирнов. - М.: Изд-во АН СССР, 1963. - 148 с.
42. Влияние грунтов на интенсивность сейсмических колебаний / под ред. С.В. Медведева // Вопросы инженерной сейсмологии. - М.: Наука, 1973. - Вып. 15. - 206 с.
43. Вознесенский Е.А. Динамическая неустойчивость грунтов / Е.А., Вознесенский. - М.: УРСС Эдиториал, 1999. - 263 с.
44. ГОСТ Р 52892-2007 Вибрация и удар. Вибрация зданий. Измерение вибрации и оценка ее воздействия на конструкцию. - М.: Стандартинформ, 2007. - 32 с.
45. ГОСТ Р 57546-2017 Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности. – М.: Стандартинформ, 2017. - 32 с.

46. 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. 15. - N 3-2. - С. 626-630.

47. Густов С.В. Зависимость частотных характеристик сейсмических волн от параметров массовых взрывов / С.В. Густов, Л.В. Суровицкий // Взрывное дело. - 2013. - N 109-66. - С. 257-266.

48. Доманов В.П. Мониторинг сейсмического воздействия на охраняемые объекты при производстве массовых взрывов, проводимых на разрезах Кузбасса / В.П. Доманов, И.В. Машуков // Вестник научного центра по безопасности в угольной промышленности ВостНИИ. - 2013. - N 1-1. - С. 60-64.

49. Дягилев Р.А. Локальный эффект усиления грунтов при сейсмическом микрорайонировании: методы оценки и их сравнение / Р.А. Дягилев, Ю.В. Баранов, Ф.Г. Верхованцев // Горное Эхо. - 2006. - N 4 (26). - С. 30-36.

50. Дягилев Р.А. Микросейсмическое районирование / Р.А. Дягилев Р.А., Д.А. Маловичко. - Пермь: Перм. ун-т, 2007. - 90 с.

51. Егизбаев М.К. Сейсмическое воздействие взрыва на инженерные сооружения и массив горных пород / М.К. Егизбаев, В.Л. Выходцев, В.А. Артемов, Е.Ю. Виноградова, С.В. Щербич // Записки Горного института. - 2007. - N 171. - С. 185-188.

52. Еманов А.Ф. Резонансные свойства верхней части разреза / А.Ф. Еманов, А.А. Красников, А.А. Бах [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2008. – Т. 11, № 1. – С. 26-36.

53. Еманов А.Ф. Сейсмический эффект промышленных взрывов в Западной Сибири и наведенная сейсмичность / А. Ф. Еманов, А. А. Еманов, А. В. Фатеев [и др.] // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2018. – Т. 45, № 4. – С. 5-24.

54. Ершов И.А. Использование инструментальных данных о слабых землетрясениях для микрорайонирования / И.А. Ершов // Сейсмическое микрорайонирование. - М.: Наука, 1977. - С. 144-151.

55. Ершов И.А. О влиянии обводненности грунтов на интенсивность сейсмического воздействия / И.А. Ершов, Е.В. Попова // Эпицентральная зона землетрясений. Вопросы инженерной сейсмологии. - М.: Наука, 1978. - Вып.19. - С. 117-140.
56. Ершов И.А. О плотности сейсмической энергии колебаний грунта при взрывах / И.А. Ершов, С.В. Медведев // Труды ИФЗ АН СССР. - М., 1964. - N 33 (200). - С. 50-58.
57. Жукова С.А. Анализ влияния массовых взрывов и обводненности на активизацию сейсмических событий с  $E > 10^7$  Дж Хибинского массива / С.А. Жукова, Ю.В. Федотова // Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: Сборник научных трудов. - Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет. - 2017. - С. 245-251.
58. Заалишвили В.Б. Зависимость спектральных характеристик сейсмических волн от строения верхней части разреза / В.Б. Заалишвили // Геология и геофизика Юга России. - 2014. - N 4. - С. 15-44.
59. Заалишвили В.Б. Физические основы сейсмического микрорайонирования / В.Б. Заалишвили. - М.: ОИФЗ РАН, 2000. - 367 с.
60. 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.
61. Ипатов Ю.П. Влияние крупных промышленных взрывов на устойчивость ответственных сооружений и объектов в зонах повышенной сейсмической и геодинамической активности / Ю.П. Ипатов, Ю.В. Баранов, Д.А. Маловичко // Региональный конкурс РФФИ-Урал. Результаты научных исследований, полученные за 2002 г. Аннотационные отчеты. - Пермь: ПНЦ УрО РАН, 2003. - С. 258-261.
62. Канасевич Э.Р. Анализ временных последовательностей в геофизике / Э.Р. Канасевич. - М.: Недра, 1985. - 300 с.

63. Касымов С.М. Инженерно-геологическая основа детального сейсмического районирования и микрорайонирования / С.М. Касымов. - Ташкент: Фан, 1979. - 224 с.
64. 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. - N 2. - С. 3-18.
65. Кириллов Ф.А. Инструкция по обследованию сейсмического действия взрывов на сооружения / Ф.А. Кириллов, С.В. Медведев, В.М. Шамин // Вопросы инженерной сейсмологии. Вып. 6. (Труды ИФЗ АН СССР, N 21 (188)). - М.: Изд-во АН СССР, 1962. - С. 118-122.
66. 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. 48-56.
67. Козырев С.А. Оценка взаимодействия скважинных зарядов при различных интервалах замедлений между ними / С. А. Козырев, В. Н. Камянский, И. А. Аленичев // Взрывное дело. - 2017. - № 117-74. - С. 60-75.
68. Козырев С.А. Управление дробящим и сейсмическим действием взрывов при подземной разработке мощных рудных месторождений в условиях высокого горного давления : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Козырев Сергей Александрович. - Апатиты, 1996. - 365 с.
69. Кондратьев О.К. Сейсмические волны в поглощающих средах / О.К. Кондратьев. - М.: Недра, 1986. - 176 с.
70. Корепанов В.В. Сезонные изменения собственных частот колебаний зданий на свайном фундаменте. / В.В. Корепанов, Р.В. Цветков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. - 2014. - N 2. - С. 153-167.
71. Костюченко В.Н. И исследование эффективности экранов для защиты от сейсмического действия взрыва / В.Н. Костюченко, С.В. Кондратьев, Г.Г. Кочарян // Взрывное дело. - 1983. - N 85/42. - С. 115-123.
72. Криворучко Н.И. О некоторых проблемах сейсмобезопасности взрывных работ на карьерах / Н.И. Криворучко // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты: сборник материалов VII

Международной научно-практической конференции. - Новосибирск: ЦРНС, 2013. - С. 83-87.

73. Куликов В.И. Сейсмическое действие Камбаратинского взрыва / В.И. Куликов, М.Б. Эткин // Взрывное дело. - 2013. - N 110-67. - С. 147-164.

74. Кутузов Б.Н. Взрывное и механическое разрушение горных пород / Б.Н. Кутузов. - М.: Недра, 1973. - 312 с.

75. Кутузов Б.Н. Взрывные работы: Учебник для техникумов / Б.Н. Кутузов. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Недра, 1988. - 383 с.

76. Кутузов Б.Н. Справочник взрывника: в 2-х ч. Ч. I. Общие сведения по взрыванию / Б.Н. Кутузов. - М.: Издательство «Горное дело», ООО «Киммерийский центр», 2014. - 216 с.

77. Лангефорс У. Современная техника взрывной отбойки горных пород / У. Лангефорс, Б. Кильстрем. - М.: Недра, 1968. - 284 с.

78. Левшин А.Л. Поверхностные и каналовые сейсмические волны / А.Л. Левшин. - М.: Наука, 1973. - 176 с.

79. Маловичко Д.А. Восстановление скоростного разреза по поверхностным волнам / Д.А. Маловичко // Материалы научной сессии Горного института УрО РАН по результатам НИР в 2001 г. - Пермь: ГИ УрО РАН. - 2002. - С.33-37.

80. Матвеев И.Ф. Влияние массовых взрывов на состояние крепи горных выработок на Таштагольском месторождении / И.Ф. Матвеев // Горный информационно-аналитический бюллетень. - М.: МГГУ, 2004. - N 9. - С. 334-338.

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. - N 2 (12). - С. 4-8.

82. Медведев С.В. Сейсмика горных взрывов / С.В. Медведев. - М.: Недра, 1964. - 188 с.

83. Мельник Г.В. Регулирование спектра сейсмоколебаний при короткозамедленном взрывании / Г.В. Мельник. В кн.: Взрывное дело, №85/42. - М.: Недра, 1983. - С.48-52.

84. Мельников Н.В. Энергия взрыва и конструкция заряда / Н.В. Мельников, Л.Н. Марченко. - М.: Недра, 1964. - 164 с.
85. Меньшиков П.В. Определение детонационных характеристик гранулитов и эмульсионных ВВ, изготавливаемых в условиях горных предприятий / П.В. Меньшиков, В.А. Сеницын, А.С. Маторин, А.А. Котяшев, В.Г. Шеменев // Горный информационно-аналитический бюллетень. - М.: МГГУ, 2010. - N 7. - С. 298-301.
86. Меньшиков П.В. Методика определения фактических интервалов замедлений для рациональных параметров сетки скважин с использованием системы электронного взрывания «DAVEYTRONIC» / П.В. Меньшиков, В.А. Сеницын, В.Г. Шеменев // Успехи современного естествознания. - 2016. - N 3. - С. 183-189.
87. Меньшиков П.В. Определение детонационных характеристик гранулитов и эмульсионных ВВ, изготавливаемых в условиях горных предприятий / П.В. Меньшиков, В.А. Сеницын, А.С. Маторин, А.А. Котяшев, В.Г. Шеменев // Горный информационно-аналитический бюллетень. - М.: МГГУ, 2010. - N 7. - С. 298-301.
88. Механический эффект подземного взрыва / В.Н. Родионов и др. - М.: Недра, 1971. - 224 с.
89. Миндели Э.О. Комплексное исследование действия взрыва в горных породах / Э.О. Миндели, Н.Ф. Кусов и др. М.: Недра, 1978. - 253 с.
90. Миронов П.С. Взрывы и сейсмотехника сооружений / П.С. Миронов. - М.: Недра, 1973. - 168 с.
91. Мосинец В.Н. Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах / В.Н. Мосинец. - М.: Недра, 1976. - 271 с.
92. Мосинец В.Н. Особенности сейсмического действия взрывов на карьере с мягкими покрывающими породами / В.Н. Мосинец, Э.А. Григорьянц, А.И. Тетерин. В кн.: Взрывное дело, №85/42. - М.: Недра, 1983. - С.137-150.
93. Мурзинов И.М. Направление в развитии технологии ведения буровзрывных работ по пути повышения эффективности и безопасности горных работ / И.М. Мурзинов // Горный информационно-аналитический бюллетень. - М.: МГГУ, 2002. - N 1. - С. 83-84.

94. Мурин К.М. Забойка как фактор повышения эффективности и безопасности ведения взрывных работ / К.М. Мурин // Горный информационно-аналитический бюллетень. - М.: МГГУ, 2011. - N 4. - С. 390-395.
95. Нефедов М.А. Исследование формирования и распространения сейсмических волн при массовых взрывах на карьерах: автореф. дис. канд. техн. наук: 15.05.03 / Нефедов Михаил Александрович. -Ленинград, 1977. - 22 с.
96. Новиньков А.Г. Анализ преобладающих частот колебаний при массовых взрывах на горных предприятиях / А.Г. Новиньков, С.И. Протасов // Взрывное дело. - 2015. - N 114-71. - С. 295-308.
97. Новиньков А.Г. Сейсмическая безопасность подземных горных выработок при ведении взрывных работ на земной поверхности / А.Г. Новиньков, С.И. Протасов, П.А. Самусе // Безопасность труда в промышленности. - 2018. - N 8. - С. 64-68.
98. 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 Кузбасского государственного технического университета. - 2012. – N 5. - С. 115-121.
99. 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. - N 5. - С. 74-89.
100. Петров Н.Г. Короткозамедленное взрывание в шахтах / Н.Г. Петров. - М.: Недра, 1964. - 270 с.
101. Покровский Г.К. Действие удара и взрыва в деформируемых средах / Г.К. Покровский, И.С. Федоров. - М.: Промстройиздат, 1957. - 276 с.
102. Пучков Л.А. Техника и технология взрывных работ в современных условиях. Основные проблемы и причины их возникновения, направления совершенствования / Л.А. Пучков // Труды Всероссийской конференции “О состоянии взрывного дела в РФ” 28-30 мая 2002 г. - М.: Изд-во МГГУ. - 2002. - С.18-23.



103. Рассказов И.Ю. Сеть сейсмического мониторинга Стрельцовского рудного поля / И.Ю. Рассказов, Ю.В. Федотова, Б.Г. Саксин // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: Труды Седьмой научно-технической конференции, Петропавловск-Камчатский, 29 сентября – 05 2019 года / Ответственный редактор Д.В. Чебров. – Петропавловск-Камчатский: Федеральный исследовательский центр "Единая геофизическая служба Российской академии наук". - 2019. - С. 99-106.

104. РБ Г-05-039-96 Руководство по анализу опасности аварийных взрывов и определению параметров их механического действия. - М.: НТЦ ЯРБ Госатомнадзора России, 2000. - 45 с.

105. Роганов В.Ю. Оценка точности определения статических поправок поперечных волн в верхней части разреза по кривым дисперсии поверхностных волн Рэлея / В.Ю. Роганов // Технологии сейсморазведки. - 2013. - N4. - С. 49-55.

106. РСН 60-86. Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Нормы производства работ. - М.: Госстрой РСФСР, 1987. - 17 с.

107. РСН 65-87. Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Технические требования к производству работ. - М.: Госстрой РСФСР, 1988. - 14 с.

108. Рубцов В.К. Исследование дробимости горных пород взрывом на карьерах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.00.00 / Рубцов Владимир Константинович. М., 1971. - 34 с.

109. 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. N1. - С. 19-24.

110. Садовский М.А. Избранные труды: Геофизика и физика взрыва / Отв. ред. В.В. Адушкин. - М.: Наука, 1999. - 334 с.

111. Садовский М.А. О сейсмическом действии подземных взрывов / М.А. Садовский, В.Н. Костюченко // Докл. АН СССР, 1974. - Т. 215. N5. - С. 1097-1100.

112. Садовский М.А. Простейшие приемы определения сейсмической опасности массовых взрывов / М.А. Садовский. - М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1946. 29 с.
113. Сапожников А.И. Особенности колебаний зданий и сооружений при динамических воздействиях различной природы / А.И. Сапожников // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. - 2015. - N1 (192). - С. 27-32.
114. Славский Б.В. Влияние горно-геологических условий на сейсмичность промышленных взрывов на карьере Кондорского ГОКа/ Б.В. Славский, В.Н. Захаров, В.А. Александров // Взрывное дело. - М.: Недра, 1983. - N85/42. - С. 150-154.
115. Соболев В.В. Технология и безопасность выполнения взрывных работ (краткий курс лекций): учебник / В.В. Соболев. - Д.: Национальный горный университет, 2008. - 164 с.
116. Совмен В.Кцире. Сейсмическая безопасность при взрывных работах: учебное пособие / В.К. Совмен, Б.Н. Кутузов, А.Л. Марьясов, Б.В. Эквист, А.В. Токаренко. - М.: Горная книга, 2012. - 228 с.
117. СП 14.13330.2018 (актуализированная версия СНиП II-7-81\*) Строительство в сейсмических районах. - М.: Минстрой России, 2018. - 117 с.
118. СП 283.1325800.2016 Объекты строительные повышенной ответственности. Правила сейсмического микрорайонирования. М.: Минстрой России, 2016. - 17 с.
119. Тинслен Э. Замеры колебаний при взрыве / Э. Тинслен, П. Инд // Разрушение и механика горных пород. - М.: Госгориздат, 1962. - С. 158-178.
120. Фадеев А.Б. Дробящее и сейсмическое действие взрывов на карьерах / А.Б. Фадеев. - М.: Недра, 1972. - 133 с.
121. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности “Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения” [Электронный ресурс] Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_161521/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_161521/). – Загл. с экрана.

122. Ханукаев А.Н. Физические процессы при отбойке горных пород взрывом / А.Н. Ханукаев. - М.: Недра, 1974. - 224 с.
123. Ханукаев А.Н. Энергия волн напряжений при разрушении пород взрывом / А.Н. Ханукаев. - М.: Госгортехиздат, 1962. - С.47-104.
124. Цейтлин Я.И. Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов / Я.И. Цейтлин, Н.И. Смолий. - М.: Недра, 1981. - 192 с.
125. Черных Е.Н. Сейсмическое воздействие массовых взрывов на объекты карьера при знакопеременных температурах массива / Е.Н. Черных, Г.В. Шубин, Б.Н. Заровняев // Взрывное дело. - 2017. - N118-75. - С. 227-237.
126. Шулаков Д.Ю. Использование скважинных датчиков для повышения регистрационных возможностей локальных сейсмических сетей / Д.Ю. Шулаков // Стратегия и процессы освоения георесурсов: Сборник научных трудов / Главный редактор А.А. Барях. - Пермь: Горный институт Уральского отделения Российской академии наук. - 2018. - С. 173-176.
127. Эквист Б.В. Обоснование и разработка методов повышения безопасности сейсмического проявления короткозамедленного взрывания на горных предприятиях: диссертация ... доктора технических наук: 05.26.03 / Эквист Борис Владимирович. - М., 2009. - 44 с.
128. Экомасов С.П. Сейсмический эффект взрыва конденсированных взрывчатых веществ и газовых смесей / С.П. Экомасов // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. - 2006. - N1. - С. 62-66.
129. Эткин М.Б. Взрывные работы в энергетическом и промышленном строительстве. Научно-практическое руководство / М.Б. Эткин, А.Е. Азаркович. - Москва : Издательство Московского государственного горного университета, 2004. - 318 с.
130. Ak H. The effect of discontinuity frequency on ground vibrations produced from bench blasting: A case study / H. Ak, A. Konuk // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. - 2008. - N28 (9). - pp. 686-694.
131. Aki K. Local site effects on weak and strong ground motion / K. Aki // Tectonophysics. - 1993. - N218(1-3). - pp. 93-111.
132. Asten M.W. Blind comparisons of shear-wave velocities at closely spaced sites in San Jose, California: U.S. Geological Survey Open-File Report 2005-1169

[Электронный ресурс] / M.W. Asten, D.M. Boore. 2005. Режим доступа: <http://pubs.usgs.gov/of/2005/1169>.

133. Athanasopoulos G.A. Effect of soil stiffness in the attenuation of Rayleigh-wave motions from field measurements / G.A. Athanasopoulos, Pelekis // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. - 2000. - Vol. 19, Iss. 4. - pp. 277-288.

134. Bansah K.J. / K.J. Bansah, K. Arko-Gyimah, B.A. Kansake, N.K. Dumakor-Dupey // Mitigating Blast Vibration Impact / 4 UMaT Biennial International Mining and Mineral Conference. - 2016. - pp. 30.

135. Bonnefoy-Claudet S. The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies / S. Bonnefoy-Claudet, F. Cotton, P.-Y. Bard // A literature review. Earth Sci Rev. -2004. - N79. - pp. 205–227.

136. BS 6472-2:2008. Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings. Part 2: Blast-induced vibration. - BSI, 2008. - 19 p.

137. Chen G. Analysis of ground vibrations caused by open pit production blasts - A case study / G. Chen, S.L. Huang // Fragblast. - 2001. - N 5 (1-2). - pp. 91-107.

138. Crandell F. I. Ground Vibrations Due to Blasting and its Effect upon Structures / F. I. Crandell // Journal Bosion Society Civ. Engineers, Jf4. - 1949. - pp. 22-30.

139. Duval W.I. Reviews of Criteria for Estimation Damage to Residences From Blasting Vibrations / W.I. Duval, D.E. Fogelson. - US Bureau of Mines, RI-5968. - 1962. – 19 p.

140. Elnashai S. Fundamentals of Earthquake Engineering: From Source to Fragility, 2nd Edition / S. Elnashai, L. Di Sarno. - John Wiley & Sons, 2015. - 494 p.

141. Fah D. A theoretical investigation of average H/V ratios / D. Fah, F. Kind, D. Giardini // Geophysical Journal International. - 2001. - Vol. 145. - N2. - pp. 535-549.

142. Harder S.H. The relative effect of explosive charge configuration on seismic amplitudes. / S.H. Harder, K.C. Miller // Monitoring Research Review: Ground-Based Nuclear Explosion Monitoring Technologies. - 2011. - pp. 467-472.

143. Hashash Y.M.A. DEEPSOIL 4.0, User Manual and Tutorial / Y.M.A. Hashash, D.R. Groholski, C. A. Phillips, D. Park, M. Musgrove. - 2011. - 98 p.

144. Haskell N.A. The dispersion of surface waves in multilayered media / N.A. Haskell // Bulletin of the Seismological Society of America. - 1953. - V. 43. - pp. 17-34.
145. Hendron A. J. Engineering of rock blasting on civil projects / A. J. Hendron // Structural and Geotechnical Mechanics. A Volume Honoring NM Newmark, Prentice-Hall, Englewood Clis, NJ, USA. - 1977. - pp. 242.
146. Idriss I.M. SHAKE91: A computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits / I.M. Idriss // User's Guide. - University of California. - 1992. - 13 p.
147. IS-6922. Criteria for Safety and Design of Structures Subjected to Underground Blast. Bureau of Indian Standards. - ISI Bull, 1973. - 13 p.
148. Johansson C.H. Detonics of high explosives / C.H. Johansson, P.A. Persson // London and New York: Academic Press. - 1970. – 40 p.
149. Kramer S. L. Geotechnical earthquake engineering / S.L. Kramer. - Prentice Hall, New Jersey. - 1996. - 653 p.
150. Langefors U. The Modern Technique of Rock Blasting / U. Langefors, B. Kihlstrom. - New York, Wiley, 1987. - 438 p.
151. Malbasic V. Determination of seismic safety zones during the surface mining operation development in the case of the “Buvac” open pit / V. Malbasic, L. Stojanovic, Minerals. - 2018. - vol.8, N.2. – 71 p.
152. Malovichko A.A. Active-passive array surface wave inversion and comparison to borehole logs in Southeast missouri / A.A. Malovichko, N.L. Anderson, D.A. Malovichko [et al.] // Journal of Environmental and Engineering Geophysics. - 2005. - Vol. 10. - N3. - pp. 243-250.
153. Mikhailova N.N. Some Correlation Relations be-tween Parameters of Seismic Motions / N.N. Mikhailova, F.F. Aptikaev // J. of Earthquake Prediction Research. - 1996. - Vol. 5. - № 5. - pp. 257-267.
154. Morris G. Damage to Structures by Ground Vibrations Due to Blasting / G. Morris, R. Westwater // Mine Quar. Eng. - 1953. - 116 p.
155. Nakamura Y. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground / Y. Nakamura // QR RTRI. - 1989. - vol. 30. - pp. 25-33.

156. Nazarian, S. In situ shear wave velocities from Spectral Analysis of Surface Waves / S. Nazarian, K.H. Stokoe // Proceedings of the 8th World Conference on Earthquake Engineering, Prentice-Hall, Inc. New Jersey: Englewood Cliffs. - 1984. - V. III. - pp. 31-38.
157. Newmark N. M. A Method of Computation for Structural Dynamics / N. M. Newmark // J. Geotech. Eng. Division. - 1959. - 85. - pp. 67-94.
158. ProShake Ground Response Analysis Program. Version 1.1. User's Manual. - Washington, USA, 1998. - 54 p.
159. Rodi W.L. A fast, accurate method for computing group-velocity partial derivatives for Rayleigh and Love modes / W.L. Rodi, P. Glover, T.M.C. Li, S.S. Alexander // Bull. Seism. Soc. of Am., 1960. -V.65. – pp. 1105-1114.
160. Rosenthal M.F. Blasting Guidance Manual. Directive System Office of Surface Mining Reclamation and Enforcement / M.F. Rosenthal, G.L. Morlock // US Department of Interior. - March 1987. - 201 p.
161. Scherbaum, F. Determination of shallow shear wave velocity profiles in the Cologne, Germany area using ambient vibrations / F. Scherbaum, K. Hinzen, M. Ohrnberger // Geophys. J. Int. - 2003. - V. 152. - pp. 597-612.
162. Schnabel P.B. SHAKE – A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites / P.B. Schnabel, J. Lysmer, H.B. Seed // Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERC-72/12. - Berkeley: University of California, 1972.
163. Shiann-Jong L. Effect of Topography on Seismic-Wave Propagation: An Example from Northern / Taiwan L. Shiann-Jong, D. Komatitsch, H. Bor-Shouh, T. Jeroen // Bulletin of the Seismological Society of America. - 2009. - Vol. 99, No. 11, - pp. 314-325.
164. Uysal O. Effect of barrier holes on blast induced vibration / O. Uysal, , K. Erarslan, M.A. Cebi, H. Akcakoca // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. - 2008. - 45 (5), pp. 712-719.
165. Verkholtantsev A.V. Monitoring of Earthquake Loads from Blasting in the Shakhtau Open Pit Mine / A.V. Verkholtantsev, R.A. Dyagilev, D.Y. Shulakov, A.V. Shkurko // Journal of Mining Science. - 2019. - Vol. 55. - N2. - pp. 229-238.

166. Wang W. Leng. Effect of free face numbers of blasting vibration in rock blasting / Wang, W. Leng, Z. Lu W. // *Mine and Metallurgical Engineering*. - 2018. - N38. - pp. 17-22.
167. Wathelet M. Array performances for ambient vibrations on a shallow structure and consequences over Vs inversion / M. Wathelet, D. Jongmans, M. Ohrnberger, S. Bonnefoy-Claudet // *Journal of Seismology*. - 2008. - 12, pp. 1-19.
168. Xia J. Estimation of near-surface velocity by inversion of Rayleigh waves / J. Xia, R.D. Miller, C.B. Park // *Geophysics*. - 1999. - v.64, - N3. - pp. 691-700.
169. Yang R. A model for near and far-field blast vibration based on multiple seed waveforms and transfer functions / R. Yang, D.S. Scovira, 36th Conf. Explosives and Blasting Technique, Orlando, Florida: International Society of Explosives Engineers. - 2010. - Vol. 2. - 223 p.
170. Yuvka S. The effect of the number of holes on blast-induced ground vibrations / S. Yuvka, S. Beyhan, O. Uysal // *Environmental Earth Sciences*. - 2017. - 76(17). - pp. 620-624.
171. Zhang Z.X. Rock fracture and blasting: theory and applications / Z.X. Zhang. Elsevier, Oxford. - 2016. – 140 p.