



**Верхоланцев Александр Викторович**

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

Специальность 2.8.6

Геомеханика, разрушение пород,  
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Диссертация подготовлена в «Горном институте Уральского отделения Российской академии наук» («ГИ УрО РАН») – филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук (ПФИЦ УрО РАН).

- Научный руководитель: **Дягилев Руслан Андреевич**  
кандидат физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (г. Обнинск).
- Официальные оппоненты: **Викторов Сергей Дмитриевич**  
доктор технических наук, профессор  
главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (г. Москва).
- Куликов Владимир Иванович**  
кандидат физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер Российской академии наук имени академика М.А. Садовского (г. Москва).
- Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук»** (г. Апатиты).

Защита диссертации состоится «22» февраля 2024 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.201.02 при ПФИЦ УрО РАН по адресу: г. Пермь, ул. Сибирская, 78А. С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке и на сайте «ПФИЦ УрО РАН»: <http://www.permsc.ru>.

Автореферат разослан « » 2024 года. Отзывы, заверенные печатью организации, просим направить в двух экземплярах не позднее, чем за 10 дней до защиты диссертации. В отзыве должны быть указаны фамилия, имя, отчество, должность, организация, почтовый адрес, телефон и электронная почта лица, представившего его.

Отзывы необходимо направлять по адресу: 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А, Ученый совет «ГИ УрО РАН». Телефон/факс: (342) 216-75-02.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат технических наук

С. Ю. Лобанов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследований.

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 горно-технических 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 горно-технических 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.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### Глава 1. Состояние изученности вопроса. Цель и задачи исследований

Обзор доступной отечественной и зарубежной литературы показал актуальность проблем, связанных с обеспечением сейсмической безопасности промышленных взрывов. Содержание главы можно изложить кратко в виде основных тезисов:

1. Экспериментальные исследования сейсмичности взрывов натолкнули исследователей на фундаментальную идею расчета интенсивности взрыва через приведенную массу заряда или через *приведенное расстояние*  $R_{ПР}$ , комплексно учитывающих массу ВВ и расстояние до места взрыва. При этом приведенное расстояние можно рассматривать через суммарную ( $Q_{\Sigma}$ ) либо максимальную ( $Q_{max}$ ) массу заряда и количество ступеней замедления ( $N$ ) в соответствии с формулами:

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

$$R_{ПР}(Q_{max}) = R \cdot Q_{max}^{-1/3}. \quad (2)$$

2. Для поиска подходящего критерия сейсмической опасности взрывов выполнено сопоставление последствий при взрывах с величинами амплитуд, скоростей и ускорений колебаний грунтов. Исследования показали наличие прямой связи между величиной скорости колебаний и разрушениями.

3. Анализ частотного состава волнового поля на разных расстояниях от места взрыва и изучение конструкций самих охраняемых объектов (Garevski, 2013; Густов, 2013) позволил сделать вывод об опасности *резонансных эффектов* (дополнительная «раскачка» инженерных сооружений).

4. Уравнение, характеризующее убывание амплитуды сейсмической волны с расстоянием от источника возбуждения, имеет вид:

$$V = aR_{ПР}^{-b}, \quad (3)$$

где  $a$  и  $b$  – эмпирические коэффициенты. Коэффициент  $a$  обычно называют коэффициентом пропорциональности (или коэффициентом сейсмичности), а  $b$  определяет скорость убывания амплитуды с расстоянием. Как показал опыт работы на различных горнодобывающих объектах, корректный прогноз интенсивности сейсмического воздействия невозможен без *точного определения величины коэффициентов  $a$  и  $b$  в конкретных геологических и горнотехнических условиях.*

5. ФНП «Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения» – основной нормативный документ, который используется при проектировании и выполнении БВР непосредственно на производстве. Согласно этому документу, сейсмически безопасное расстояние при одновременном взрывании  $N$  зарядов взрывчатых веществ общей массой  $Q_{\Sigma}$  со временем замедления между взрывами каждого заряда не менее 20 мс, рассчитывается по формуле:

$$r_c = K_r K_c K_b N^{1/4} Q_{\Sigma}^{1/3} \quad (4)$$

где  $K_r$  – коэффициент, зависящий от свойств грунта в основании охраняемого здания (сооружения);  $K_c$  – коэффициент, зависящий от типа здания (сооружения) и характера застройки;  $K_b$  – коэффициент, зависящий от условий взрывания.

6. Результаты экспериментальных исследований взрывов легли в основу «Руководства по анализу опасности аварийных взрывов и определению параметров их механического действия» (РБ Г-05-039-96). Данное руководство предназначено для выполнения инженерных оценок опасности только аварийных взрывов на потенциально опасных объектах, но по факту это единственный в РФ действующий *нормативный документ*, в котором есть величины допустимых скоростей для различных сооружений.

7. Для управления замедлением все активнее используют *системы инициирования (СИ)* без использования электрического тока, позволяющие менять величину замедления в широких пределах. По отношению к сейсмическому действию взрыва использование неэлектрических СИ имеет существенный недостаток – *отклонение фактического времени замедления от номинального (паспортного)*. Информация, полученная в ходе инструментальных наблюдений об отклонениях в работе замедлителей, позволяет дать оценку точности работы СИ и учесть это при построении модели влияния параметров БВР на сейсмический эффект.

8. Эффективность и целесообразность использования *антисейсмических экранов* существенно ограничены быстро меняющейся горнотехнической обстановкой. Использование экранов для реализации сейсмотехнических условий выполнения взрывных работ возможно при отсутствии в геологическом разрезе слоя, служащего *волноводом* сейсмических волн, распространяющихся по такому каналу практически без потерь. Также экраны малоэффективны для низкочастотных колебаний от удаленных источников.

9. Одним из факторов, влияющих на уровень сейсмического воздействия в основании охраняемых сооружений, является *грунтовые условия*. В сейсмологии данное явление широко известно под названием «site effect» (Aki, 1993; Scherbaum, 2003; Asten, 2005). Нормативный способ определения сейсмически безопасных расстояний подразумевает учет влияния грунтовых условий в виде интегрального поправочного коэффициента, без учета возможных вариаций усилений грунтами в спектральной области.

## **Глава 2. Экспериментальные исследования влияния параметров источника и характеристик среды на интенсивность сейсмического воздействия промышленных взрывов**

На фактическую амплитуду сейсмического воздействия конкретного взрыва влияют многие факторы, причем влияние некоторых накладывается друг на друга. Это обстоятельство делает разделение факторов 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 взрывающей породы; направление (порядок) инициирования зарядов взрывающего 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.

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

Регистрация серии взрывов, производимых на гипсовом карьере, позволила оценить влияние таких факторов, как физико-механические свойства взрывающего блока и направление инициирования зарядов. Влияние физико-механических свойств взрывающего массива, которые определяются деформационными свойствами, можно описать следующим образом: взрывы в скальных породах вызывают колебания большей интенсивности, чем взрывы в рыхлых наносах, а при взрывах в обводненных породах наблюдается возрастание амплитуды колебаний по сравнению с аналогичными сухими грунтами.

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 разрушенный этим же взрывом массив). В рассматриваемом эксперименте взрывы с практически идентичными параметрами зарядов проводились на трех разных горизонтах, при этом регистрация сейсмических волн велась в одних и тех же пунктах.

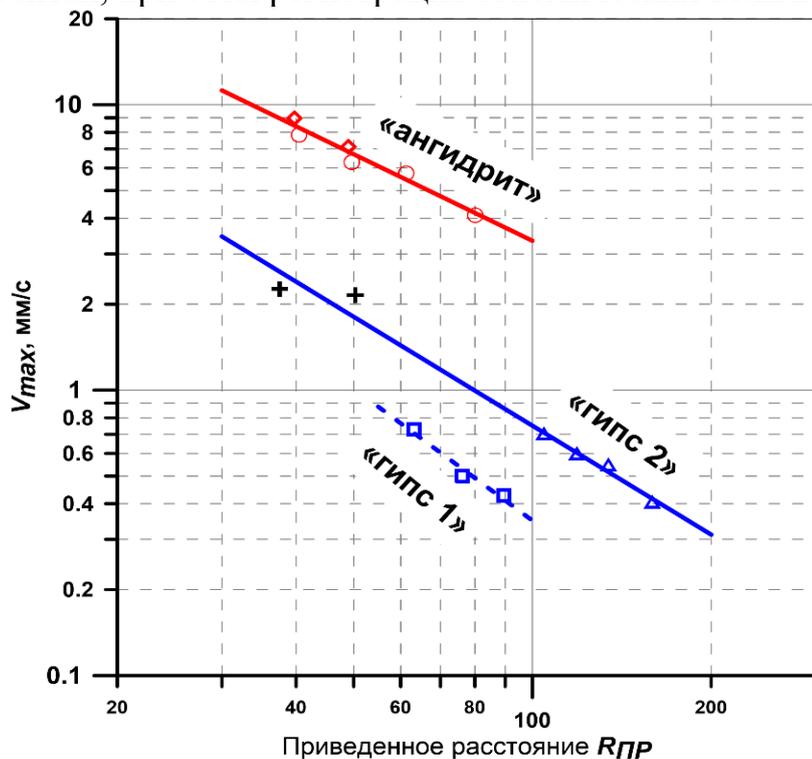


Рис. 1. Зависимость амплитуды сейсмической волны от приведенного расстояния для всех зарегистрированных взрывов

Анализ зависимости амплитуды сейсмической волны от приведенного расстояния позволил установить, что зарегистрированные взрывы делятся на 3 группы (рис. 1), причем на равных приведенных расстояниях величина сейсмического воздействия отличается на порядок. Изучение паспортов (проектов) буровзрывных работ показало, что физико-механические свойства взрывающей породы и направление инициирования зарядов существенно влияют на амплитуду сейсмической волны. Например, к увеличению сейсмического эффекта приводит взрыв блока, сложенного более плотным ангидритом. Минимальный

сейсмический эффект имели взрывы, инициирование зарядов в которых выполнялось в направлении от охраняемого объекта, то есть в порядке от ближнего края к дальнему (график «гипс 1» на рис. 1). Вместе с этим, "средний" эффект наблюдался при взрывах гипсовых пород, и имевших направление инициирования зарядов близкое к направлению к охраняемым объектам (график «гипс 2» на рис. 1).

#### 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. Рассматривая данную группу факторов, нужно подчеркнуть главное обстоятельство: чем большая доля энергии использована в зоне дробления, тем меньше уровень сейсмического воздействия. Эффективность взрыва на дробление напрямую зависит от соответствия параметров БВР геологическим и горнотехническим задачам.

Промышленные ВВ описываются рядом характеристик: теплотой взрыва, объемом образующих газов, скоростью детонации и рядом других. Для обеспечения минимального сейсмического действия БВР необходимо чтобы характеристики ВВ соответствовали свойствам взрывааемых пород и техническим задачам по обеспечению безопасности взрыва. Принимая во внимание, что для ВВ, которые целесообразно применять на конкретном горнодобывающем объекте, характеристики (скорость детонации, теплота взрыва и др.) могут изменяться лишь в относительно небольших диапазонах, 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 среда распространения волн, а также много других случайных факторов, за которыми ожидаемые эффекты могут быть просто не видны. Единственным способом выявить действительный характер влияния типа ВВ является правильно поставленный эксперимент.

Такой эксперимент организован в ходе сейсмического мониторинга на карьере известняка в Башкортостане. Суть его заключалась в измерении сейсмического эффекта от одиночных взрывов с близкими параметрами, но разными типами ВВ. Всего выполнено 4 одиночных взрыва с использованием ярита и 4 взрыва с использованием гранулолота. Чтобы максимально исключить возможность влияния других факторов (расстояние, грунты), измерения сейсмического эффекта проводились в одних и тех же пунктах на разных расстояниях (всего 10 сейсмических станций). Сравнение сейсмического эффекта от разных типов ВВ выполнено как интегрально (через величины измеренных скоростей смещения), так и раздельно по разным частотам (через спектры колебаний). В результате данного эксперимента не выявлено какого-либо значимого влияния типа ВВ на сейсмический эффект.

Для повышения статистической достоверности сделанных выводов привлечены данные о короткозамедленных взрывах (КЗВ) с разным типом ВВ (более 220 взрывов), произведенных за двухгодичный период наблюдений. Сравнение проводилось по интегральному сейсмическому эффекту, зарегистрированному в 4 стационарных пунктах наблюдения, с помощью величины  $dV$ , представляющей собой разницу фактических и ожидаемых скоростей смещения грунта:

$$dV = V_{\text{факт}} - V_{\text{ож.}} \quad (5)$$

Результат, представленный на гистограммах для каждой из 4 сейсмических станций (рис. 2), свидетельствует об отсутствии значимого влияния типа ВВ на сейсмиче-

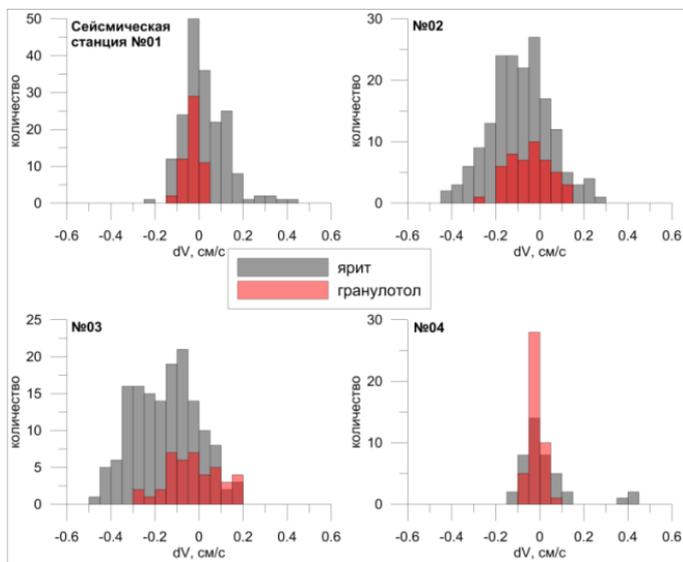


Рис. 2. Гистограммы распределения отклонений сейсмического эффекта от ожидаемых значений для разных типов ВВ

ский эффект. Все отклонения  $dV$  для разных типов ВВ выявленные в долго-временных 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. Таким образом, результаты сравнения интегрального сейсмического эффекта и эффекта в спектральной области для взрывов с разными ВВ, позволили подтвердить предположение об отсутствии статистически значимого влия-

ния типа ВВ с близкими характеристиками на уровень сейсмического воздействия.

В работе (Мосинец, 1976) рассматривается вопрос управления уровнем сейсмического воздействия БВР, при этом минимальный уровень 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 трансформируется в сейсмические волны, вызывая существенное увеличение сейсмического эффекта.

Обеспечение более длительного действия газов на стенки зарядной камеры за счет выбора параметров забойки (величина и качество) позволяет, как следствие, снизить уровень сейсмического воздействия. Управление уровнем сейсмического воздействия БВР за счет перераспределения направления энергии сейсмических колебаний возможно изменением величины перебура – части скважины, расположенной ниже проектной отметки подошвы уступа. В проводимых автором экспериментах не было возможности продемонстрировать влияние факторов величины забойки и перебура, поэтому приведенные выше особенности их влияния представлены с целью получения более полной картины, описывающей сложность и комплексность задачи корректной оценки сейсмического эффекта взрывов. Анализируя условия и способы взрывания, необходимо отметить, что диапазон выбора таких факторов, как тип ВВ, глубина заряда и величина перебура ограничен горнотехническими и экономическими показателями взрыва. Соответственно, возможности модификации этих параметров для управления сейсмическим эффектом минимальны.

Величина интервала замедлений и количество ступеней замедлений – основные параметры КЗВ, оптимальный выбор которых позволяет управлять его дробящим и сейсмическим действием. Необходимо отметить, что даже при удачно подобранной величине замедлений, минимизирующей наложение друг на друга фаз объемных волн, остается вероятность наложения отдельных цугов поверхностных волн, которые могут преобладать в спектре. На характер волновой картины (особенно на продолжительность КЗВ) также существенно влияет количество скважин во взрываемом блоке. Чем больше количество инициируемых скважин, тем длиннее взрыв и тем более низкочастотные волны он возбуждает. Поскольку в частотный состав колебаний существенный вклад вносит фактор резонансных особенностей грунтов, в разных

точках местности волновая картина может быть различна. Поэтому в реальных условиях очень сложно определить стабильные комбинации диапазонов замедлений и количество ступеней замедления, которые обеспечивали бы минимальный уровень сейсмического воздействия для охраняемых объектов, расположенных в различных грунтовых условиях.

Результаты изучения сейсмического воздействия БВР на разных объектах горнодобывающей промышленности подтверждают необходимость приступать к изучению влияния факторов, влияющих на сейсмический эффект, с анализа *корректности работы систем инициирования (СИ)*. Такая необходимость связана с частыми отклонениями паспортных замедлений применяемых СИ от фактических. Нестабильность замечена в работе таких СИ как ИСКРА, КОРШУН и ЭДИЛИН. Анализ работы СИ целесообразно проводить лишь по сейсмическим записям БВР на минимальном удалении от взрываемого блока (забоя) для четкого выделения импульсов от инициации отдельных зарядов и исключения наложения колебаний от разных ступеней. Помимо потенциального снижения эффективности разрешения породы вследствие некорректности работы СИ, из-за наложения ступеней замедления возможно увеличение величины сейсмического воздействия (Верхоланцев, 2014).

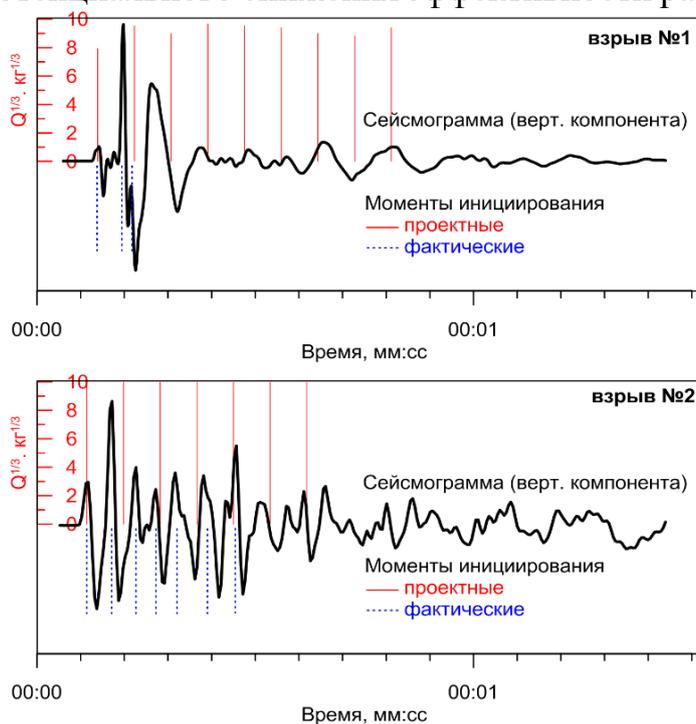


Рис. 3. Сопоставление фактических и проектных времен инициирования

Пример сопоставления сейсмограмм, полученных на небольшом удалении от взрываемого блока, с данными используемых паспортов (проектов) взрывов приведен на рис. 3, где отмечается значительное несоответствие фактических параметров взрыва (а именно интервала замедления между зарядами) проектным значениям. На сейсмических записях взрыва №1, полученных на ближайшем пункте наблюдения, 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.

### Влияние грунтовых условий

Таким образом, для подобных взрывов анализ факторов, влияющих на сейсмический эффект с использованием закона подобия по отношению к максимальной величине одновременно иницируемого заряда  $Q_{max}$ , не представляется возможным.

Значительное влияние на сейсмический эффект может оказывать фактор грунтовых условий. Разная интенсивность колебаний на разных грунтах объясняется различием их физических свойств несмотря на то, что согласно классификации ФНП грунты могут быть отнесены к одной категории. То есть, не смотря на схожий литологический состав в разных точках исследуемой территории, реакция грунтов может существенно отличаться. Амплитуда колебаний в среде обратно пропорциональна ее сейсмической жесткости, представляющей собой произведение скорости объемной волны в грунте (продольной или поперечной) на плотность грунта. Поэтому

возведенные на более плотных скальных породах сооружения страдают значительно меньше, чем на менее плотных рыхлых. Изменение интенсивности сейсмических колебаний на земной поверхности также зависит от глубины залегания грунтовых вод и мощности водонасыщенной толщи. Изменение величины сейсмического воздействия за счет грунтовых условий также связано с эффектами резонансов. Как показано на примере (рис. 4), наличие слоев пониженными упругими модулями может спровоцировать значительное усиление сейсмического эффекта. Кривая резонансных усилений, соответствующая менее плотным грунтам (пунктирная линия), осложнена гармониками с максимумами в районе 3, 6 и 11 Гц, а величины усиления достигают 2-х раз и более. Более высокоскоростной разрез (сплошная линия), верхняя часть которого сложена плотными породами, дает менее интенсивный отклик.

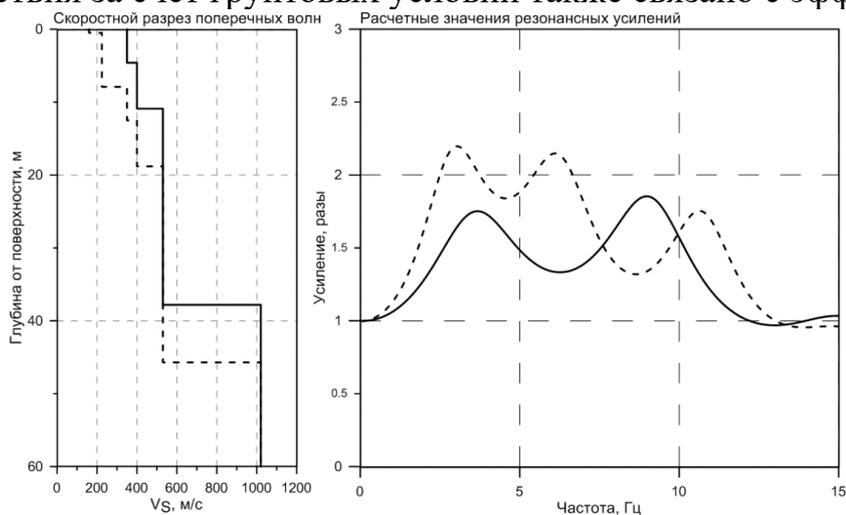


Рис. 4. Скоростные разрезы поперечных волн и соответствующие им резонансные характеристики

но на примере (рис. 4), наличие слоев пониженными упругими модулями может спровоцировать значительное усиление сейсмического эффекта. Кривая резонансных усилений, соответствующая менее плотным грунтам (пунктирная линия), осложнена гармониками с максимумами в районе 3, 6 и 11 Гц, а величины усиления достигают 2-х раз и более. Более высокоскоростной разрез (сплошная линия), верхняя часть которого сложена плотными породами, дает менее интенсивный отклик.

сложена плотными породами, дает менее интенсивный отклик.

### Влияние рельефа местности

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 (Shiann-Jong Lee et al., 2009). Наличие относительно сложных инженерно-геологических условий, характеризующихся большим разнообразием мезоформ различного генезиса, в определенной мере оказывает влияние не только на амплитуду, но и на спектральный состав приходящих сейсмических волн. 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, которое 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. 5), построенную для одного из карьеров Саратовской области. Как видно из приведенной карты, участки

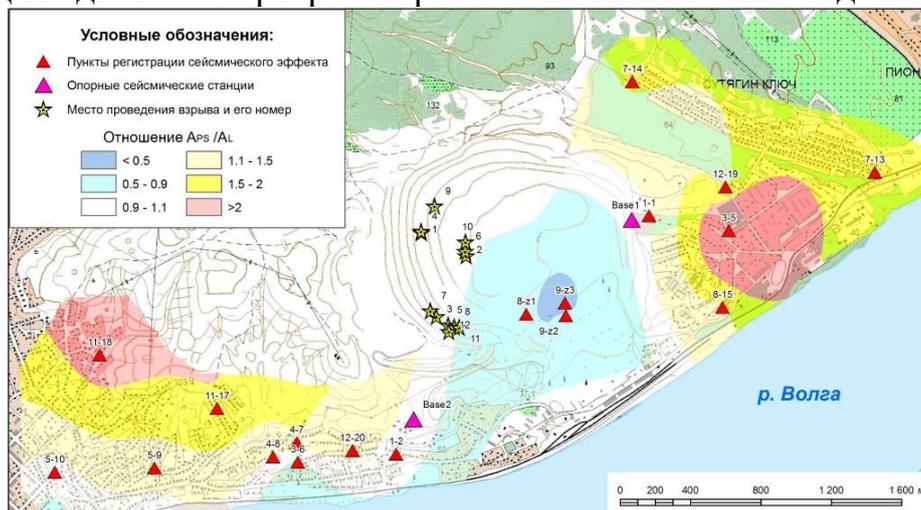


Рис. 5. Карта распределения параметра  $A_{Ps}/A_L$

участки вблизи карьера характеризуются максимальным сейсмическим эффектом, обусловленным влиянием поверхностных волн. 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.

#### 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 (3). Величина эмпирического коэффициента сейсмичности  $a$  колеблется в очень широких пределах и зависит от местных условий инициирования (особенностей технологии БВР). 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. Для определения параметров регрессии вида (3) специалисты, занимающиеся сейсмикой взрывов, используют метод наименьших квадратов, с помощью которого аппроксимируются полученные в ходе инструментальных измерений скорости смещения. Разброс фактических значений также зависит от многообразия и сложности горнотехнических и инженерно-геологических условий.

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

Интенсивность сейсмического воздействия в конкретном пункте зависит также от скорости затухания сейсмических волн, которая определяется не только влиянием перечисленных факторов, но и состоянием массива на пути распространения от места взрыва к охраняемому объекту. Определение сейсмически безопасных расстояний с помощью регламентированных формул в общем случае предполагает прохождение сейсмических волн от места взрыва до охраняемого объекта по сравнительно однородному массиву. Но каждый массив горных пород имеет своё напряженно-деформированное состояние и характеризуется вертикальной и латеральной неоднородностью. В подобной ситуации сейсмические волны при распространении могут образовывать сложную интерференционную картину, что приводит к значительным вариациям их амплитуды с расстоянием.

#### 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 (3). 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 крайне сложно, то подход раздельного выявления их влияния посредством множества специальных экспериментов представляется весьма затратным и практически трудно реализуемым. Более перспективной 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 все факторы, оказывающие влияние на сейсмический эффект, разделить на три группы:

- известные факторы, которые можно точно измерить;
- неизвестные факторы, которые можно зафиксировать или обеспечить их неизменность в серии экспериментов;
- 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 надо 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 (3) среди прочих измерений предлагается проводить замеры 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 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 ( $R_{пр.норм}$ ) и нормированных амплитуд ( $A_{норм}$ ), представляющих собой отношения приведенных расстояний ( $R_{пр.и}$ ) и измеренных амплитуд ( $A_{и}$ ) к таковым на опорном пункте ( $R_{пр.о}$  и  $A_{о}$ ):

$$R_{пр.норм} = \frac{R_{пр.и}}{R_{пр.о}}, \quad (6)$$

$$A_{норм} = \frac{A_{и}}{A_{о}}. \quad (7)$$

Используя отношение двух выражений вида (3) для рядового пункта измерения и для опорного пункта, легко получить следующее выражение:

$$A_{норм} = R_{пр.норм}^{-b}, \quad (8)$$

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 натурных измерений показал, что использование нормированных значений значительно повышает устойчивость определения коэффициента  $b$ : величина среднеквадратического отклонения  $\sigma$  нормированных амплитуд (графики  $a, б, в$  на рис. 6) от аппроксимирующей функции до 2 раз ниже, чем для исходных измерений (графики  $г, д, е$  на рис. 6).

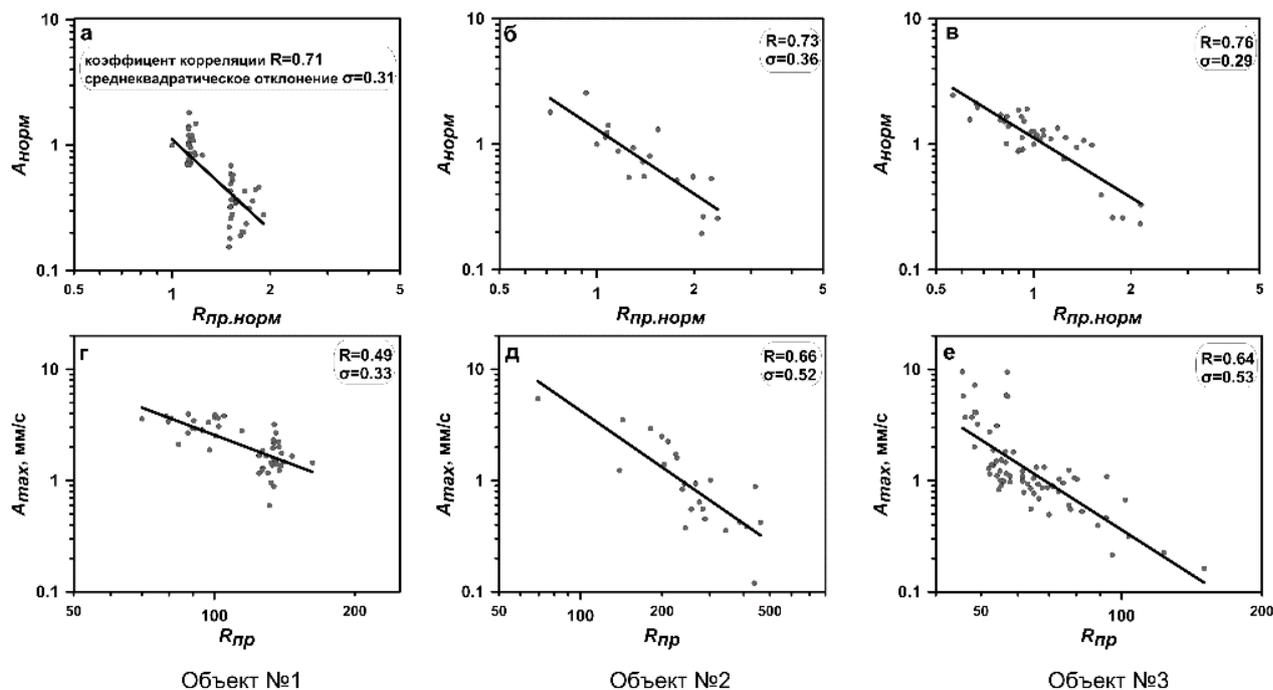


Рис. 6. Сравнение зависимостей нормированных амплитуд от нормированных приведенных расстояний (а, б, в) с аналогичными зависимостями без нормирования скорости смещения грунта и приведенных расстояний (г, д, е) для разных объектов

Коэффициент взаимной корреляции  $R$  нормированных данных становится выше. Определив таким образом коэффициент  $b$ , можно, используя уже не нормированные, а исходные величины скоростей и приведенных расстояний, рассчитать величину коэффициента сейсмичности  $a$  (Верхоланцев, 2014). 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.

**И научное положение:** *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.*

### Глава 3. Оценка и учет влияния грунтовых условий (резонансных характеристик грунта) на интенсивность сейсмического воздействия

Следующим шагом к выполнению надежного прогноза сейсмического эффекта является изучение и учет грунтовых условий. Более информативные и надежные прогнозные оценки будут давать подходы к изучению грунтовых условий, учитывающие спектральный состав колебаний. Этот аспект актуален в случае необходимости совместного исследования резонансных характеристик грунтов и охраняемых зданий и

сооружений. В рамках предложенного комплекса инструментальных измерений предлагается реализовать совокупность трех спектральных способов изучения грунтовых условий на охраняемой территории:

1. Статистический способ оценки усилений.

2. Способ, основанный на получении скоростного разреза в приповерхностной толще сейсмическими методами с последующим аналитическим расчетом спектральных характеристик грунтов.

3. Способ Накамуры (метод *HVSR – Horizontal to Vertical Spectral Ratio*), базирующийся на расчете *H/V*-спектров по 3-компонентным записям микросейсмических колебаний.

Использование нескольких способов мотивировано возможной разницей в абсолютных величинах усилений грунтов, полученных этими способами. При наличии сети стационарных пунктов наблюдения грунтовые усиления в них также возможно получить статистическим способом.

В основе *статистического способа оценки усилений* лежит предложенный выше подход с использованием опорной сейсмической станции. Его суть в том, что, избавившись посредством нормировки от влияния случайных факторов источника, можно считать, что разброс нормированных значений от аппроксимирующей функции (рис.6а, 6б, 6в), главным образом, будет обусловлен влиянием грунтов, причем именно в том диапазоне частот, для которого конкретные грунты более избирательны.

Интегральную количественную оценку коэффициента усиления на исследуемых пунктах  $K_{\Gamma}$  можно выполнить по формуле:

$$K_{\Gamma} = \frac{A_{и}}{A_{о}} \left( \frac{R_{пр.о}}{R_{пр.и}} \right)^{-b}, \quad (9)$$

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. В случае, когда необходимо получить характеристики грунта в спектральной области, можно вместо максимальных амплитуд  $A_{и}$  и  $A_{о}$  подставить в формулу (9) спектры колебаний  $S_{и}$  и  $S_{о}$  в интересующем диапазоне частот. Главное преимущество такой оценки грунтовых условий в том, что данный способ является прямым, так как основан на регистрации именно тех колебаний, степень воздействия которых оценивается. Во время апробации данного подхода, на основе экспериментальных работ проведен анализ надежности получаемых величин усиления грунтами и выполнена оценка повторяемости 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 усилений

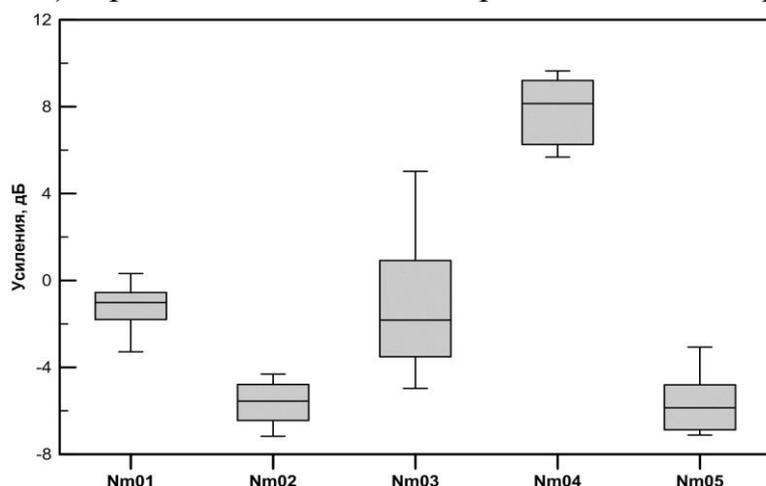


Рис. 7. Распределение оценок усилений грунтами для 5 пунктов регистрации серии из 10 взрывов

для 5 экспериментальных пунктов представлены на рис. 7. Усами на графике отмечены диапазоны полученных оценок усилений грунтами, а вертикальный размер каждого блока соответствует интерквартильному размаху, который характеризует 50% распределение полученных величин. На рисунке видно, что, не смотря на большой разброс оценок в отдельных пунктах, определяемые усиления

статистически достаточно устойчивы ( $>3\sigma$ ), что говорит об их значимости. Достоинством интегральной оценки усиления грунтами через максимальные амплитуды сейсмического воздействия является отсутствие необходимости сопоставлять частотный состав генерируемых взрывом сейсмических волн с частотными характеристиками исследуемого грунта, поскольку определение усиления выполняется по максимальным амплитудам скоростей смещений, которые, по сути, являются результатом наложения характеристик грунтов на спектральные особенности источника. Однако необходимо понимать, что оценки усиления грунтами, будучи полученными относительно опорной станции, имеют не абсолютные значения, так как содержат в себе грунтовые усиления в пункте размещения самой опорной станции. Применение вышеописанного способа расчета усиления на всей исследуемой площади может быть несколько ограничено, так как реализация требует либо одновременного использования большого количества сейсмических станций, либо последовательную взаимную увязку серии взрывов, что увеличивает время исследований.

В связи с этим, для изучения усиления колебаний за счет грунтовых условий оптимальным представляется следующая комбинация. Вышеописанный расчет отклонений фактических значений амплитуд от ожидаемых (статистический способ) выполняется для всех пунктов регистрации взрывов. 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*, *DeepSoil* или аналогичных, которые симулируют прохождение сейсмических волн через исследуемую толщу и сравнивают характеристики сейсмических сигналов на входе и на выходе. На участках исследуемой территории, где не осуществляют регистрацию взрывов, изучение грунтовых условий выполняют способом Накамуры, наиболее «легким» с позиции как технологии измерений, так и методики обработки полученных данных.

Сравнение карт фактических усиления (статистический способ) с картами, рассчитанными способом Накамуры, заверенным аналитическими расчетами, показывает высокую степень сходства. Пример одного из таких сравнений представлен на рис. 8.

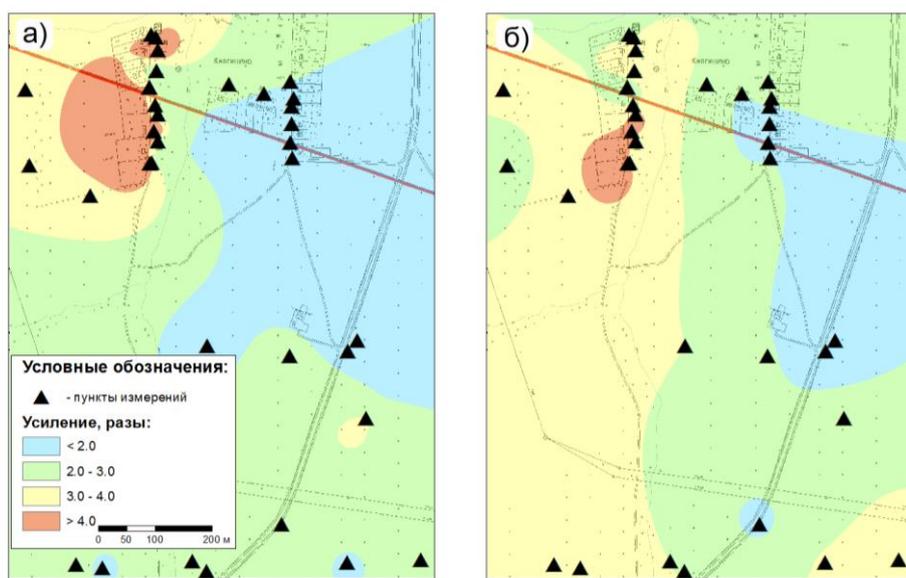


Рис. 8. Сравнение карт пространственного распределения усиления полученных разными способами: а) по отклонениям измеренных фактических амплитуд от средних ожидаемых, б) способом Накамуры

Организация наблюдений каждым из способов на одном (опорном) или нескольких контрольных пунктах позволяет выполнить увязку между собой полученных оценок, делая их более достоверными. После увязки и объединения результатов, полученных разными подходами, строится итоговая карта пространственной изменчивости коэффициентов резонансного усиления грунтами.

**II научное положение: 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.**

#### **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 диссертации, 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

$$V_{пр} = aR_{пр}^{-b} \prod_i k_i, \quad (10)$$

описывающей влияние основных (эмпирический коэффициент сейсмичности  $a$ , показатель затухания волн  $b$ , приведенное расстояние  $R_{пр}$ ) и ряда дополнительных факторов  $k_i$ . 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. Владея 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 увеличение глубины скважин/шпуров и т.д.);
- при изменении горно-геологической обстановки места ведения БВР.

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 5 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 (Сапожников, 2015). 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 усилений 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 (Меньшиков, 2016) 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 (Fáh et al., 2001; Nakamura, 1989);

- для калибровки (заверки) результатов, полученных способом Накамуры, на части пунктов необходимо проводить изучение скоростного строения верхней толщии пород, по которому далее выполнять аналитический расчет усилений грунтов в спектральной области с использованием программных пакетов *DeepSoil* (Hashash, 2012),

*ProShake* (Idriss, Sun, 1992) или аналогичных. Один из вариантов изучения скоростного строения верхней толщи массива является метод *SASW* (Xia et al., 1999), основанный на анализе частотно-скоростной дисперсии поверхностных волн. Расположение пунктов наблюдений должно выбираться с учетом априорной информации о физико-механических свойствах изучаемых грунтов (обычно – данные бурения разведывательных скважин).

Описанные подходы в том или ином виде прошли тестирование на нескольких предприятиях, ведущих добычу сырья буровзрывным способом. Предложенный комплекс прошел апробацию в рамках НИР по разработке рекомендаций для оптимизации параметров БВР с целью снижения сейсмического эффекта взрывов. Главной целью НИР на одном из объектов была реализация достоверного прогноза сейсмического воздействия при ведении БВР в неблагоприятных условиях (высокая обводненность массива, значительная неоднородность среды распространения волн), когда сейсмическое воздействие приближается к максимально допустимым величинам. Проверка прогноза осуществлялась соответствием расчетных параметров колебаний фактическим посредством инструментального контроля колебаний в нескольких пунктах наблюдения в ходе серии тестовых взрывов. В результате использования комплексной методики инструментальных измерений и обработки данных получено 92% соответствие прогнозных оценок в пределах заданной Заказчиком погрешности.

***III научное положение: 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 обеспечивающей достоверный прогноз величины сейсмического эффекта.***

## 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. Результаты натурных измерений демонстрируют, 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. Диапазон изменения 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 влияния грунтов 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. Апробация метода прогнозирования величины сейсмического воздействия взрывных работ на поверхностные здания и сооружения показала его эффективность при решении поставленных задач.

### **Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:**

#### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:**

1. Verkholtantsev, A.V. Features of assessing seismic effects of blasting operations / A.V. Verkholtantsev, D.Y. Shulakov, R.A. Dyagilev // *Gornyi Zhurnal*. – 2019. – № 5. – pp. 29-36 DOI: 10.17580/gzh.2019.05.05
2. Мониторинг сейсмического воздействия взрывов на карьере "Шахтау" / А. В. Верхоланцев, Р. А. Дягилев, Д. Ю. Шулаков, А. В. Шкурко // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2019. – № 2. – С. 59-69. – DOI 10.15372/FTPRPI20190207.
3. Верхоланцев, А. В. Оценка сейсмического влияния буровзрывных работ на здания и сооружения / А. В. Верхоланцев, Д. Ю. Шулаков // *Геофизика*. – 2014. – № 4. – С. 40-45.

4. Цифровой сейсмический регистратор "Ермак-5". Опыт разработки и внедрения / П. Г. Бутырин, Ф. Г. Верхоланцев, А. В. Верхоланцев, Д. Ю. Шулаков // Сейсмические приборы. – 2018. – Т. 54. – № 2. – С. 5-23. – DOI 10.21455/si2018.2-1.

#### **Прочие публикации:**

5. Complex technique of assessment of seismic effects of blasting / A. V. Verkholantsev, D. Y. Shulakov, Ph. G. Verkholantsev, P. G. Butyrin // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018 : Conference proceedings, Albena, Bulgaria, 02–08 июля 2018 года. – Albena, Bulgaria: Общество с ограниченной ответственностью СТЕФ92 Технолоджи, 2018. – P. 715-722. – DOI 10.5593/sgem2018/1.1/S05.090.

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

7. Верхоланцев, А. В. Сравнительная оценка основных методов сейсмического микрорайонирования / А. В. Верхоланцев // Стратегия и процессы освоения георесурсов : Материалы ежегодной научной сессии Горного института УрО РАН по результатам НИР в 2009 г., 19-23 апр. 2010 г. / Горный ин-т Уральского отд-ния РАН. – Пермь : Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, 2010. – С. 171-173.

8. Верхоланцев, А. В. Многофакторная оценка сейсмического воздействия взрывов / А. В. Верхоланцев // Стратегия и процессы освоения георесурсов : Сборник научных трудов. – Пермь : Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, 2013. – С. 200-203.

9. Шулаков, Д. Ю. Практические аспекты обеспечения сейсмической безопасности при буровзрывных работах / Д. Ю. Шулаков, Р. А. Дягилев, А. В. Верхоланцев // Проблемы безопасности и эффективности освоения георесурсов в современных условиях : Материалы научно-практической конференции, посвященной 25-летию Горного института УрО РАН и 75-летию основателя и первого директора института члена-корреспондента РАН Аркадия Евгеньевича Красноштейна, Пермь, 05–07 июня 2013 года / Горный институт УрО РАН. – Пермь: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, 2014. – С. 94-100.

10. Верхоланцев, А. В. Апробация методики оценки сейсмического влияния БВР на здания и сооружения / А. В. Верхоланцев // Стратегия и процессы освоения георесурсов : сборник научных трудов / ГИ УрО РАН. – Пермь : Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, 2014. – С. 206-209.

11. Верхоланцев, А. В. Способы учета грунтовых условий при оценке сейсмического воздействия БВР / А. В. Верхоланцев // Стратегия и процессы освоения георесурсов : Сборник научных трудов / Главный редактор А.А. Барях. – Пермь : Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, 2015. – С. 201-203.

12. Верхованцев, А. В. О необходимости учета влияния грунтовых условий при оценке сейсмического воздействия взрывных работ / А. В. Верхованцев // Шестнадцатая уральская молодежная научная школа по геофизике : сборник научных материалов, Пермь, 16–20 марта 2015 года. – Пермь: Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, 2015. – С. 72-77.
13. Верхованцев, А. В. Методика оценки грунтовых условий / А. В. Верхованцев // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных : Материалы Десятой Международной сейсмологической школы, Новханы, 14–18 сентября 2015 года / Геофизическая служба РАН, Республиканский центр сейсмологической службы при Национальной академии наук Азербайджана. – Новханы: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизическая служба Российской академии наук, 2015. – С. 63-65.
14. 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, Чолпон-Ата, Кыргызстан, 12–16 сентября 2016 года. – Чолпон-Ата, Кыргызстан: Федеральный исследовательский центр "Единая геофизическая служба Российской академии наук", 2016. – С. 84-87.
15. 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 : сборник научных трудов. – Пермь : Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, 2016. – С. 188-190.
16. 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, Алматы, Казахстан, 11–15 сентября 2017 года. – Алматы, Казахстан: Федеральный исследовательский центр "Единая геофизическая служба Российской академии наук", 2017. – С. 79-81.

---

Сдано в печать 20 декабря 2023 г.  
Формат 60x84-16. Тираж 100 экз.

Отпечатано сектором НТИ  
«ГИ УрО РАН»  
614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А