

На правах рукописи

Рядинский Даниил Эдуардович



**УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ВЗРЫВНОГО
ДРОБЛЕНИЯ СЛОЖНОСТРУКТУРНЫХ МАССИВОВ
НА КАРЬЕРАХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

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

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2026

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Ишейский Валентин Александрович

Официальные оппоненты:

Тюпин Владимир Николаевич

доктор технических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», кафедра прикладной геологии и горного дела, профессор;

Киркин Александр Павлович

кандидат технических наук, общество с ограниченной ответственностью «Институт Гипроникель», лаборатория геотехники, старший научный сотрудник.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва.

Защита диссертации состоится **10 сентября 2026 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета ГУ.7 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 10 июля 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



АФАНАСЬЕВ
Павел Игоревич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований

Наибольшие объемы добычи полезных ископаемых в России приходится на добычу открытым способом. Буровзрывные работы (далее – БВР) являются первыми в цепочке технологических процессов при добыче полезных ископаемых и в значительной мере определяют экономическую эффективность всего цикла процессов по добыче и переработке полезных ископаемых на предприятии. Затраты на БВР представляют собой значительную долю от общих затрат на добычу.

В области разработки месторождений строительных материалов, в частности, при производстве гранитного щебня, особенно из пород, сложных в морфологическом плане, имеющих неоднородное залегание в массиве, в котором, в пределах одного взрывного блока залегают разнопрочные граниты: серый гранит ($\sigma_{сж} = 165$ МПа, $E = 52,7$ ГПа), красный гранит ($\sigma_{сж} = 154$ МПа, $E = 23,5$ ГПа) и красно-серый гранит ($\sigma_{сж} = 128$ МПа, $E = 19,0$ ГПа) с резко изменчивой трещиноватостью в диапазоне от 0,5 до 2,8 м⁻¹ и блочностью от 0,1 до 1,2 м (далее – сложноструктурные массивы), сложилась устойчивая тенденция получения от 8,5 % до 22% негабаритных фракций (>100 см) по результатам проведения БВР, особенно по первому ряду скважин и линии отрыва, что приводит к снижению производительности горнотранспортного оборудования, увеличению затрат на дробление и повторное взрывание некондиционной горной массы.

Более того, ведение БВР в сложноструктурных массивах осложняется низкой предсказуемостью качественных результатов взрыва. Без внушительного объема статистических данных не представляется возможным получить объективный прогноз фракционного состава и, как следствие, принять соответствующие проектные решения по оптимизации параметров БВР для обеспечения равномерности дробления.

Для оперативного получения геолого-структурных данных о массиве и их последующего использования для проектирования БВР необходимо комбинировать современные технические решения в области получения геолого-структурной информации о взрываемом массиве в связке с физическим обоснованием процесса взрывного

разрушения и последующим внедрением в программные продукты для расчета и подбора необходимых параметров БВР на стадии проектирования.

Это позволит инженеру-технологу принять соответствующие решения, направленные на снижение выхода негабаритных фракций и повышение равномерности гранулометрического состава взорванной горной массы (далее - ВГМ), подобрать и проанализировать геометрические параметры выноса и пространственного расположения скважин с учетом особенностей взрываевого массива для обеспечения наилучшего результата взрывных работ.

Таким образом разработка методологического подхода к оптимизации параметров БВР на основе пространственного расположения первого ряда скважин в сочетании с физическим обоснованием процесса взрывного разрушения сложноструктурных массивов и оперативными методами в области получения геолого-структурной информации о взрываеом массиве, или его части, определяет научную и практическую актуальность диссертационного исследования.

Степень разработанности темы исследования

Вопросам разрушения горных пород энергией взрыва и фрагментации ВГМ были посвящены исследования многих отечественных и зарубежных ученых: Баум Ф. А., Станюкович К. П., Беляев А. Ф., Бейсебаев А. М., Билоконь В.П. Боровиков В. А., Ванягин И. Ф., Демидюк Г.П., Ерофеев И. Е., Казаков Н.Н., Катанов И. Б., Сысоев А. А., Кутузов Б. Н., Легостаев Е. Г., Менжулин М. Г., Мосинец В.Н., Абрамов А.В., Покровский Г.И., Ракишев Б.Р., Суханов А.Ф., Тюпин В. Н., Ханукаев А.Н., Adjiski V., Bamford T., Bar N., Buyer A., Gaich A., Poetsch M., Kong D., Ouchterlony F., Palmstrom A., Rosin, P. and Rammner, E., Roy P. P. и многих других. Несмотря на их значительный вклад в этой области, основной и важнейшей проблемой результата взрывных работ остается неравномерное дробление ВГМ, одной из причин которого является отсутствие оперативного учета горно-геологических и горнотехнических данных о взрываеом массиве при проектировании и прогнозировании результатов взрыва. Особенно остро проблема проявляется при взрывании сложноструктурных массивов, что объясняется наличием резкой изменчивости горно-геологических и горнотехнических данных.

В этой связи появляется необходимость в разработке научно-обоснованного методического подхода к пространственной оптимизации параметров БВР на основе оперативной оценки горно-геологических и горнотехнических данных, приводящих к контролируемому и однородному дроблению массива энергией взрыва с возможностью прогнозирования результата взрыва в части фрагментации.

Предмет исследования: сложноструктурный массив горных пород, сложенный разнопрочными гранитами с различной интенсивностью и ориентацией трещиноватости.

Объект исследования: процесс разрушения сложноструктурных массивов энергией взрыва.

Цель работы: повышение равномерности гранулометрического состава ВГМ при взрывании сложноструктурных массивов на карьерах строительных материалов.

Идея работы: разработка научно-обоснованного методологического подхода к проектированию пространственного расположения взрывных скважин первого ряда на основе индивидуальной оценки линии наименьшего сопротивления по данным цифрового картирования интенсивности трещиноватости, ориентации трещин и блочности пород, слагаемых массив.

Задачи исследования

1. Провести анализ состояния и тенденций развития технологий по управлению качеством и параметрами взрывоподготовки горной массы на карьерах строительных материалов и выявить нерешенные проблемы, связанные с разрушением сложно-структурных массивов энергией взрыва;

2. Систематизировать существующие методики расчета параметров БВР первого ряда скважин и прогнозирования гранулометрического состава ВГМ и выявить их достоинства и недостатки.

3. Разработать методику пространственного расположения скважин первого ряда на основе учета оперативных горно-геологических данных о массиве;

4. Апробировать разработанную методику оптимизации параметров БВР первого ряда скважин с учетом обеспечения равномерного гранулометрического состава ВГМ.

5. Внедрить практические рекомендации на основе разработанной методики для обеспечения равномерного взрывного дробления сложноструктурных массивов.

Научная новизна

1. Установлена линейная зависимость ЛНС скважин первого ряда от интенсивности трещиноватости, показателя хрупкости и предела прочности пород на сжатие.

2. Установлены количественные зависимости эффективного радиуса разрушения от предела прочности пород на сжатие, модуля Юнга, показателя хрупкости и блочности гранитов, определяющие диапазоны значений ЛНС от 3,1 до 5,4 м для скважин первого ряда при взрывании сложноструктурных массивов.

Соответствие паспорту научной специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика по пунктам: 7. Создание на основе цифровых информационных технологий методов, приборов, автоматизированных систем для изучения и контроля свойств горных пород и грунтов, строения и состояния их массивов, а также для прогнозирования динамических процессов и явлений; 9. Развитие теории и разработка способов и средств разрушения и предразрушения горных пород механическими, взрывными, гидравлическими, тепловыми, электрофизическими, комбинированными и другими воздействиями; 10. Воздействие взрывов на массив горных пород, горные выработки, подземные и наземные сооружения, на окружающую среду.

Теоретическая и практическая значимость работы

Методологические подходы разработанной методики определения оптимальных параметров БВР первого ряда скважин для условий карьеров со сложноструктурным строением массива, обеспечивающих снижение выхода негабаритных фракций после взрыва, использованы в деятельности компании ООО «ГЕОМИКС» при разработке системы автоматизированного проектирования БВР в части методов анализа структурных особенностей массива по первому ряду скважин и обнаженной поверхности откоса взрываемого уступа, а

также в деятельности компании АО «Гавриловское КУ» при разработке методики оптимизации параметров БВР с учетом структурных особенностей массива по первому ряду скважин (акты внедрения от 26.05.2025 г. и 11.03.2026 г. соответственно).

Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023683160 «Моделирование 3D поверхности взрывного блока со сложноструктурным строением массива по облаку точек, полученному при съемке с БПЛА», дата публикации 02.11.2023 г.

Методология и методы исследования

При выполнении диссертационного исследования выполнен обзор, анализ и научное обобщение результатов исследований отечественных и зарубежных ученых в области проектирования БВР, методов оценки качества взрывного дробления и методов анализа структурных особенностей массива горных пород. Для определения оптимальных параметров БВР в зависимости от геолого-структурных характеристик массива на карьере АО «Гавриловское КУ» были проведены опытно-промышленные эксперименты. Для установления связей между параметрами БВР и характеристиками разрушения массива, конкретизации теоретических расчетов и прогнозирования влияния геолого-структурных особенностей массива на результаты взрыва было проведено численное моделирование в программном комплексе Ansys Autodyn. Для анализа и интерпретации результатов опытно-промышленных испытаний, статистической обработки данных гранулометрического состава ВГМ были применены математические и статистические методы обработки данных.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Оперативный анализ интенсивности трещиноватости, ориентации трещин и блочности пород, слагаемых массив, на основе данных цифрового картирования откосов взрываемого уступа позволяет подобрать расположение первого ряда скважин относительно свободной поверхности, которое обеспечит разрушение породы, и скорректировать удельный расход для эффективного распределения энергии взрыва в сложноструктурном массиве горных пород.

2. Оценка параметров разрушения сложноструктурного массива горных пород по первому ряду скважин должна основываться на

численном моделировании, учитывающем вариативность предела прочности на сжатие, предела прочности на растяжение, модуля Юнга, блочности пород, слагающих массив, а также детонационных параметров применяемого ВВ.

3. При взрывании сложноструктурных массивов горных пород с резко изменчивой трещиноватостью в диапазоне от 0,5 до 2,8 м⁻¹ и блочностью от 0,1 до 1,2 м повышение равномерности дробления ВГМ достигается посредством пространственного расположения первого ряда скважин на основе учета рациональной линии наименьшего сопротивления, позволяющей эффективно распределить энергию взрыва.

Степень достоверности результатов исследования обеспечивается анализом, сопоставлением и согласованностью с результатами исследований на тему «Управления качеством взрывного дробления сложноструктурных массивов», использованием современных апробированных методов и методик исследований, включая численное моделирование процессов разрушения горных пород в программном комплексе ANSYS Autodyn, проведением опытно-промышленных испытаний на АО «Гавриловское КУ» и удовлетворительной сходимостью результатов опытно-промышленных испытаний и численного моделирования, апробацией математического аппарата в программном комплексе компании ООО «ГЕОМИКС».

Апробация результатов диссертации выполнялась посредством освещения достигнутых результатов диссертационной работы и изложения основных защищаемых положений на 5 международных научно-практических мероприятиях. За последние 3 года принято участие в 4 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 4 международных: XI Форум вузов инженерно-технологического профиля «Технологическая интеграция», (12-16 декабря 2022 г., г. Минск); Международный научный симпозиум «Неделя горняка 2023», (31.01-3.02.2023 г., г. Москва); XIX Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования», (21-28 мая 2023 г., г. Санкт-Петербург); Международный научный симпозиум «Неделя горняка 2024», (29.01-2.02.2024 г., г. Москва); XII Международный научно-практический форум «Инно-

вационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: Безопасное и эффективное освоение месторождений полезных ископаемых» (28 – 30 мая 2025, г., Санкт-Петербург).

Личный вклад автора состоит в проведении анализа отечественных и зарубежных научных источников, посвященных управлению качеством взрывного дробления сложноструктурных массивов, разработке методики исследования, подготовке и проведении полевых исследований в условиях гранитного карьера АО «Гавриловское КУ», проведении численного моделирования и алгоритмизации математической модели в программный код, сборе, анализе и обобщении результатов исследования, формулировании защищаемых положений и выводов. В ходе теоретических и практических исследований были сформулированы методологические подходы к оптимизации параметров БВР с учетом структурных особенностей массива по первому ряду скважин, обеспечивающих равномерность дробления сложноструктурных массивов.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 4 печатных работах, в том числе в 2 статьях – изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях – в изданиях, входящих в международные базы данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 116 наименований, и 3 приложения. Диссертация изложена на 132 страницах машинописного текста, содержит 59 рисунков и 28 таблиц.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю, кандидату технических наук, доценту кафедры взрывного дела Ишейскому Валентину Александровичу, за высококвалифицированное руководство в процессе подготовки и выполнения диссертационного исследования, заведующему кафедрой взрывного дела, кандидату технических наук, доценту Маринину Михаилу Анатольевичу, за помощь и поддержку, оказываемую на всех

этапах подготовки диссертационного исследования, генеральному директору АО «Гавриловское КУ» Магомедову Гаджи Сиражудиновичу за помощь в организации промышленных экспериментов, ученому секретарю диссертационного совета Афанасьеву Павлу Игоревичу и коллективу кафедры взрывного дела за ценные научные советы и рекомендации в процессе подготовки диссертационного исследования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложены актуальность исследования, цель, задачи работы, научная новизна и основные защищаемые положения диссертации.

В первой главе выявлены факторы, определяющие качество дробления при разработке месторождений гранитов: геолого-структурные особенности массива, физико-механические характеристики пород, параметры БВР. Дано описание методов анализа структурных особенностей массива и получения геолого-структурной информации, включая цифровое картирование с использованием БПЛА.

Во второй главе рассмотрены качественные и количественные методики проектирования БВР, выявлены достоинства и недостатки каждой из них, обоснована целесообразность комплексного подхода, сочетающего оперативное получение геолого-структурной информации и расчетное обоснование параметров БВР. Разработана критериальная модель с индивидуальным подбором ЛНС для скважин первого ряда.

В третьей главе представлены результаты численного моделирования в программном комплексе ANSYS Autodyn, на основе которых построены зависимости эффективного радиуса разрушения от физико-механических свойств и структурных особенностей различных типов гранитов.

В четвертой главе представлены результаты опытно-промышленных испытаний разработанной методики на карьере АО «Гавриловское КУ», а также результаты измерения гранулометрического состава ВГМ при применении типового подхода и предложенной методики. Установлено, что при применении методики индивидуального подбора параметров БВР для скважин первого ряда снижается выход негабаритных фракций с 8,5-22% до 2,2-5,8% и повышается

равномерность дробления. Разработаны рекомендации по применению методики на месторождениях строительных материалов.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты диссертационного исследования.

Основные результаты диссертации отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Оперативный анализ интенсивности трещиноватости, ориентации трещин и блочности пород, слагаемых массив, на основе данных цифрового картирования откосов взрываемого уступа позволяет подобрать расположение первого ряда скважин относительно свободной поверхности, которое обеспечит разрушение породы, и скорректировать удельный расход для эффективного распределения энергии взрыва в сложноструктурном массиве горных пород.

В диссертационной работе предложен метод оперативного анализа структурных особенностей массива, основанный на цифровом картировании откосов взрываемого уступа с применением фотограмметрии и построением 3D-аналитических моделей массива.

На первом этапе полевых работ выполнялась съёмка откосов взрываемого уступа при помощи БПЛА по заранее спланированному маршруту с заданными параметрами перекрытия кадров (рисунок 1). Полученные фотоматериалы использовались для построения плотного облака точек поверхности откоса и цифровой модели откоса блока.

На втором этапе выделялись структурные особенности локальных участков взрываемого массива. Для каждого участка откоса определялась интенсивность трещиноватости, характер блочности и доминирующие направления систем трещин. На основе этих данных строились карты плотности трещиноватости и стереографические проекции направлений основных систем трещин (рисунок 2). На примере блока №4 показано, что различные типы гранитов характеризуются различной интенсивностью трещиноватости и направлением падения трещин (таблица 1).

Полученные карты трещиноватости и 3D-модель откоса использовались для расчёта ЛНС для каждого локального участка массива. В работе разработана методика, в которой ЛНС определяется с

учётом предела прочности трещиноватого массива, параметров блочности и мощности отдельных типов пород, слагающих массив вдоль скважин первого ряда (1):

$$W = \frac{0.17 * P_h * r_h * (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu) * \sigma_0 * e^{-0,9 * K_r(w-1)}} \quad (1)$$

где P_h – давление в скважине; r_h – радиус скважины; ν – коэффициент Пуассона; σ_0 – предел прочности нетрещиноватых пород, Па; K_r – показатель хрупкости (отношение предельных деформаций к полной); w – интенсивность трещиноватости, шт/пг.м.

На основе данной формулы и физико-механических свойств гранитов АО «Гавриловского КУ», описанных в таблице 2, были построены графики зависимости ЛНС от интенсивности трещиноватости для каждого типа гранита (рисунок 3). По результатам установленных зависимостей может быть индивидуально подобрана оптимальная ЛНС с учетом интенсивности трещиноватости в области конкретной скважины первого ряда (таблица 3).

Для сложноструктурного массива, сложенного несколькими типами гранитов, вводится критериальная модель, позволяющая определить результирующую ЛНС как функцию ЛНС по каждому типу пород и их мощности в пределах высоты скважины (рисунок 4).

Предложена формула для определения итоговой ЛНС, обеспечивающая разрушение сложноструктурного массива (2):

$$W = \sum_{i=1}^n \left[L_i > \frac{\sum_{j=1}^n (L_j - l_{заб})}{n} \right] \cdot W_i \quad (2)$$

где W – итоговая ЛНС скважинного заряда, при которой массив будет разрушен; n – общее количество типов пород; L_i – суммарная мощность i -ой горной породы или длина скважины, м; $L_{заб}$ – длина забойки, м; W_i – ЛНС для разрушения массива, сложенного породами i ;

Выражение в квадратных скобках равно 1, если условие внутри выполняется.

Таким образом, если условие $L_2 > (L_1 + L_2 - l_{заб}) * 50\%$ выполняется, то выбирается ЛНС – W_2 (Рисунок 4).

Формула 2 представляет собой критериальную модель, которая может быть использована для выбора ЛНС в зависимости от мощности пород, слагающих массив, подлежащий взрыву.

Для учета неоднородности и резкой изменчивости типов гранитов предлагается корректировать выбранное значение ЛНС на поправочный коэффициент сложности K_c , учитывающий характер неоднородности: $K_c = 1.0$ – для массива, сложенного одним типом гранита, или при плавном изменении свойств разных типов гранитов, $K_c = 0.85 - 0.90$ – для массива с резкой контрастной неоднородностью (например, тонкая прослойка красно-серого гранита между мощными слоями серого гранита), $K_c = 1.00 - 1.05$ – для массива с высокой интенсивностью трещиноватости (> 2.0) независимо от типа гранита.

Итоговое значение ЛНС для скважины определяется по формуле (3):

$$W = W_p * K_c \quad (3)$$

На 10 опытных взрывных блоках для всех скважин первого ряда, с учетом их оптимального расположения (ЛНС), был скорректирован удельный расход ВВ. Для преодоления прочностных характеристик различных типов гранитов и обеспечения требуемого радиуса эффективного разрушения удельный расход ВВ корректировался коэффициентами, учитывающими реальные структурные особенности локального участка массива, через который проходит скважина (4):

$$q = 1.25 \frac{\rho C_p}{Q_v} * K_b * K_n * K_{тр} \quad (4)$$

где ρC_p – акустическая жесткость пород; $\frac{кг}{м^3}$; Q_v – потенциальная энергия применяемого ВВ, Дж/кг; K_b – коэффициент блочности: 1.0 для мелкоблочной структуры, 1.2 для среднеблочной структуры, 1.4 для крупноблочной структуры; K_n – коэффициент неоднородности: $1+0.1*(N-1)$, где N – количество различных типов гранитов вдоль оси скважины ($N \geq 2$); $K_{тр}$ – коэффициент трещиноватости: 1.0 при $w \geq 2$; 1.1 при $1 < w < 2$; 1.2 при $w < 1$.

Следует отметить, что в зоне первого ряда скважин, расположенной в пределах зоны заколов от предыдущего массового взрыва, физико-механические свойства массива отличаются от ненарушенного: ρ и C_p снижаются вследствие раскрытия макротрещин и образо-

вания микротрещин. Прямое применение формулы (4) с уменьшенными значениями ρ и C_p может привести к заниженному удельному расходу ВВ для первого ряда скважин, что физически некорректно. Однако, в настоящей работе параметры ρ и C_p определяются по характеристикам породы (ненарушенного образца), а не массива в целом. Влияние нарушенности массива в зоне первого ряда учитывается через корректирующие коэффициенты K_b, K_n, K_{tr} , которые назначаются по результатам цифрового картирования откоса. Кроме того, ключевым механизмом компенсации негативного влияния зоны заколов в предлагаемой методике является уменьшение ЛНС скважин первого ряда до оптимального значения, что обеспечивает более эффективную передачу энергии взрыва в нарушенном массиве.

Таким образом, расчет ЛНС в условиях сложноструктурных массивов должен выполняться индивидуально для каждой скважины первого ряда с учетом интенсивности трещиноватости, характера залегания различных типов гранитов и неоднородности локального участка массива, через который проходит скважина. Сравнение типовой ЛНС, равной 5м, с индивидуально рассчитанными значениями, равными 3,3-5,4 м, показало, что при типовом подходе для ряда участков блока ЛНС оказывается завышенной или заниженной, что приводит к неравномерному гранулометрическому составу ВГМ. Для скважин первого ряда, с индивидуально подобранной ЛНС, необходимо корректировать удельный расход ВВ.

2. Оценка параметров разрушения сложноструктурного массива горных пород по первому ряду скважин должна основываться на численном моделировании, учитывающем вариативность предела прочности на сжатие, предела прочности на растяжение, модуля Юнга, блочности пород, слагающих массив, а также детонационных параметров применяемого ВВ.

Характеристики горных пород сложноструктурного массива карьера АО «Гавриловское КУ» существенно различаются как между серым, красным и красно-серым гранитами, так и внутри каждого типа гранита по мере увеличения трещиноватости и изменения блочности, что обуславливает разные значения их радиусов эффективного дробления (таблица 3). Учесть эту вариативность возможно в рамках численного моделирования, в котором геометрия массива и свойства

пород заданы локально, а процесс распространения волны напряжений и накопления повреждений описывается во времени. Моделирование проводилось в программном комплексе ANSYS Autodyn. Массив горных пород моделировался Лагранжевой сеткой, что позволяет проводить анализ деформаций и повреждений пород, а заряд ВВ и продукты детонации - Эйлеровой сеткой, позволяющей корректно описывать течение газов (рисунок 5).

Геометрическая модель участка блока построена на основе данных цифрового картирования путем воспроизведения реальной формы уступа, положения скважин первого ряда, пространственного распределения серого, красного и красно-серого гранитов и зон с различной блочностью. Каждый тип гранита представлялся отдельным телом с индивидуальными физико-механическими характеристиками, полученными по результатам лабораторных испытаний и анализа литературных данных. Для описания разрушения массива использована модель Риделя–Хиермайера–Тома (RHT), учитывающая трёхосное напряжённое состояние и накопление поврежденности во времени.

Расчетная модель проверена путем сравнения радиальной и тангенциальной компонент напряжений, рассчитанных по методике В.А. Боровикова, И.Ф. Ванягина, и значений, полученных в модели (рисунок 6). Расхождение в значениях радиальных компонент напряжений составило 5%, а в тангенциальных – 10% (таблица 4).

Результатом численных расчётов является распространение параметра поврежденности во времени, что даёт возможность количественно оценивать степень разрушения массива в любой точке вокруг скважины (рисунок 7). Анализ распространения фронта поврежденности позволил определить эффективные радиусы разрушения для серого, красного и красно-серого гранитов при различных значениях ЛНС от свободной поверхности откоса (таблица 3).

Сопоставление результатов численного моделирования с рассчитанными по формулам 1-3 значениями показало высокую сходимость результатов по параметру ЛНС.

Таким образом, при помощи численного моделирования, было установлено, что радиусы разрушения в красно-сером граните на 20-30% превышают радиусы в красном граните, значения которых

превышают радиусы в сером граните на 5-18% при одинаковых параметрах заряда, а в зонах мелкой блочности фронт поврежденности формируется на 30-40% быстрее, чем в крупноблочных зонах. Эти количественные различия не учитываются при проектировании с усредненными значениями ЛНС и подтверждают необходимость ее индивидуального подбора. На основе серии расчетов сформированы рекомендации по значениям ЛНС для различных типов гранитов и их сочетаний.

3. При взрывании сложноструктурных массивов горных пород с резко изменчивой трещиноватостью в диапазоне от 0,5 до 2,8 м⁻¹ и блочностью от 0,1 до 1,2 м повышение равномерности дробления ВГМ достигается посредством пространственного расположения первого ряда скважин на основе учета рациональной линии наименьшего сопротивления, позволяющей эффективно распределить энергию взрыва.

Разработанная методика позволяет по данным цифрового картирования и численного моделирования рассчитывать ЛНС индивидуально для каждой скважины первого ряда с учётом типа гранита, его геолого-структурных характеристик массива, через который пробурены скважины. На основе этих расчётов корректируются координаты устьев, угол наклона и взаимное расположение так, чтобы скважины первого ряда соответствовали радиусам эффективного дробления в соответствующих зонах, в том числе в ослабленных и разнопрочных (рисунок 8).

Разработанная методика заверена на десяти опытно-промышленных блоках карьера АО «Гавриловское КУ» с различными сочетаниями гранитов и различной блочностью. Для каждого блока сформированы два варианта проектного решения: типовой, с неизменной ЛНС равной 5 м и усреднённым удельным расходом ВВ равным 1,1 кг/м³ по всему первому ряду, и оптимизированный, в котором ЛНС варьировалась в диапазоне 3,3-5,4 м, а удельный расход - в диапазоне 0,95–1,15 кг/м³ в зависимости от структуры и прочностных характеристик массива. В оптимизированной схеме скважины первого ряда смещались относительно типового плана таким образом, чтобы каждая из них была расположена в зоне, где рассчитанная рациональная ЛНС обеспечивала формирование зоны разрушения. Пример плана

расположения скважин и фактического и прогнозного гранулометрических составов ВГМ для типового и предлагаемого вариантов соответственно представлены на рисунке 9.

Эффективность пространственного расположения скважин первого ряда оценивалась по гранулометрическому составу взорванной горной массы. Для каждого блока с типовыми параметрами БВР на основе фактических данных калибровались модели Куз-Рам и КСО, после чего строились прогнозные распределения гранулометрического состава для проектов с предлагаемыми параметрами БВР. Опытные взрывы и анализ прогнозных моделей показали, что при типовом расположении скважин первого ряда формируются участки с повышенным средним размером куска и увеличенным выходом негабарита, в то время как при предлагаемом расположении скважин выход негабарита сокращается и совокупный гранулометрический состав ВГМ становится более однородным. На рисунке 9 представлен пример распределения гранулометрического состава ВГМ для типового и предлагаемого вариантов для блока №4.

Экспериментальные результаты показывают, что пространственное расположение скважин первого ряда на основе рациональной ЛНС обеспечивает снижение выхода негабаритной фракции с 8,5-22% до 2,2-5,8%, снижение среднего размера куска с 17-38 см до 21-28 см и ожидаемое сокращение затрат на вторичное дробление составляет 16,2 млн. руб., экономия на взрывчатых веществах (ВВ) составляет 893 тыс. руб. Это подтверждает, что индивидуальный расчет рациональной ЛНС обеспечивает выравнивание радиусов эффективного дробления по фронту уступа и приводит к более равномерному гранулометрическому составу взорванной горной массы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научно-практической задачи – повышению качества дробления ВГМ на карьерах строительных материалов со сложноструктурным строением массива. В результате проведенных исследований разработана методика пространственной оптимизации расположения скважин первого ряда, основанная на цифровом картировании геолого-структурных характеристик массива и численном моделировании процессов взрывного разрушения.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Установлено, что существующие методы проектирования БВР основаны на усредненных параметрах для всего взрываемого блока и не учитывают локальные геолого-структурные характеристики массива, что приводит к неравномерному дроблению, повышению выхода негабаритной фракции до 18-22% и значительным затратам на вторичное дробление. Это определило необходимость разработки методики индивидуального расчета параметров БВР для каждой скважины первого ряда на основе оперативного определения геолого-структурных характеристик локальных участков блока.

2. Разработаны и описаны методики исследования сложно-структурных массивов горных пород и картирования откосов, позволяющие выделять зоны неоднородности и определять количественные характеристики трещиноватости и блочности массива.

3. Предложены формулы для расчета ЛНС, учитывающие характер трещиноватости, блочность и изменение свойств массива по всей глубине скважин первого ряда. Введен калибровочный коэффициент K_c , учитывающий контрастность неоднородности взрываемого массива, позволяющий скорректировать значение расчетной ЛНС с целью обеспечения качественного дробления.

4. Разработана методика профилировки скважин первого ряда на основе данных, полученных при помощи фотограмметрии, позволяющая обеспечить обоснованное назначение координат устьев и углов наклона скважин первого ряда с учетом геометрии уступа и локальных геолого-структурных характеристик массива, что приводит к повышению равномерности дробления во всем объеме взрываемого блока.

5. Выполнено численное моделирование процессов взрывного разрушения в программном комплексе ANSYS Autodyn с использованием модели Риделя-Хиермайера-Тома для гранитов и уравнения состояния Джонса-Уилкинса-Ли для взрывчатого вещества. На основе серии экспериментов определены радиусы эффективного разрушения для различных типов гранитов (серый, красный, красно-серый).

6. Проведены опытно-промышленные испытания разработанной методики на 10 блоках месторождения строительных материалов АО «Гавриловское КУ». Результаты испытаний показали:

- Снижение выхода негабаритной фракции (>100 см) с 8,5-22% до 2,2-5,8%;
- Снижение среднего размера куска с 17-38 см до 21-28 см;
- Оптимизацию удельного расхода ВВ с 1,1 кг/м³ до 0,95-1,15 кг/м³.

Установлено, что наибольший эффект достигается в условиях высокой неоднородности массива, когда один взрываемый блок сложен несколькими типами гранитов с различающимися геолого-структурными характеристиками.

7. Выполнена оценка технико-экономического эффекта от внедрения методики на месторождении АО «Гавриловское КУ». Сокращение затрат на вторичное дробление составляет 16 200 000 рублей, экономия на взрывчатых веществах составляет 893 000 рублей. Общий экономический эффект подтверждает целесообразность внедрения методики в производственную практику.

Разработанная методика пространственного расположения первого ряда скважин на основе учета геолого-структурной информации по откосу для условий карьеров со сложноструктурным строением массива использована в деятельности компании ООО «ГЕОМИКС» при разработке системы автоматизированного проектирования БВР в части методов анализа структурных особенностей массива по первому ряду скважин и обнаженной поверхности откоса взрываемого уступа, а также в деятельности компании АО «Гавриловское КУ» при разработке методики оптимизации параметров БВР с учетом структурных особенностей массива по первому ряду скважин (акты внедрения от 26.05.2025 г. и 11.03.2026 г. соответственно).

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением области применения разработанной методики на карьеры с иными типами сложноструктурных массивов.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Ишейский, В.А. Повышение качества фрагментации взорванной горной массы за счет учета структурных особенностей мас-

сива в расчете линии наименьшего сопротивления скважинных зарядов / В.А. Ишейский, **Д.Э. Рядинский**, Р.А. Рахманов // Научно-технический сборник «Взрывное дело» – 2024 – № 143-100. – С. 36-62.

2. Ишейский, В.А. Оптимизация линии наименьшего сопротивления для скважин первого ряда на основе данных цифрового моделирования структуры взрываемого массива / В.А. Ишейский, **Д.Э. Рядинский**, Р.А. Рахманов, И.А. Аленичев, Г.С. Магомедов // Научно-технический сборник «Взрывное дело» – 2025 – № 148-105. – С. 77-101.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. Ишейский, В.А. Повышение качества фрагментации взорванной горной массы за счет учета структурных особенностей массива при проектировании БВР / В.А. Ишейский, **Д.Э. Рядинский**, Г.С. Магомедов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 9-1. – С. 79–95.

4. Ишейский, В.А. Расчет линии наименьшего сопротивления по первому ряду скважин при взрывании сложноструктурных массивов на основе учета радиусов зон трещинообразования / В.А. Ишейский, **Д.Э. Рядинский**, Г.С. Магомедов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 3. – С. 64–79.

Свидетельство на объект интеллектуальной собственности:

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023683160 Российская Федерация. Моделирование 3D поверхности взрывного блока со сложноструктурным строением массива по облаку точек, полученному при съемке с БПЛА. Заявка № 2023683160: заявл. 19.10.2023; опубл. 02.11.2023 / В. А. Ишейский, **Д. Э. Рядинский**; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 38 КБ.

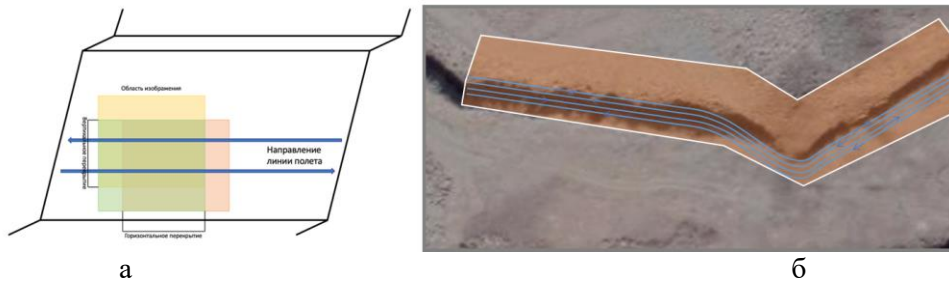


Рисунок 1 - Съемка откоса взрываемого уступа при помощи БПЛА: а - схема перекрытия; б - траектория полета для картирования уступов карьера

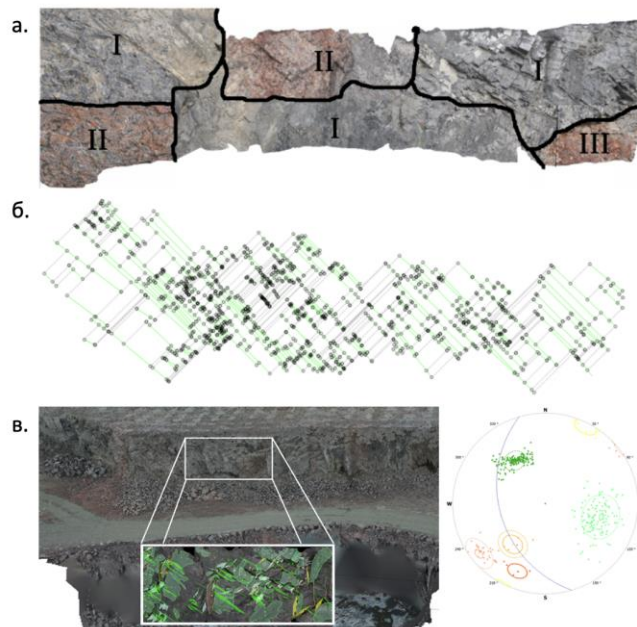


Рисунок 2 – Пример картирования буровзрывного блока №4: а - 3D модель откоса, построенная по данным обработки изображений: I -серый гранит; II -красно-серый гранит; III – красный гранит; б - пример векторного слоя трещин; в - пример картирования откоса

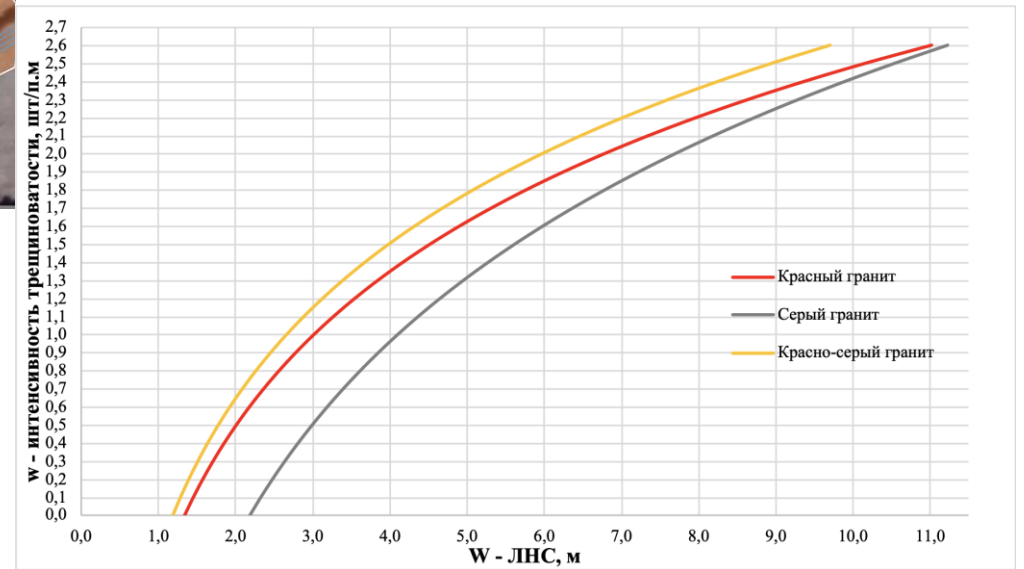


Рисунок 3 - График зависимости ЛНС от интенсивности трещиноватости массива

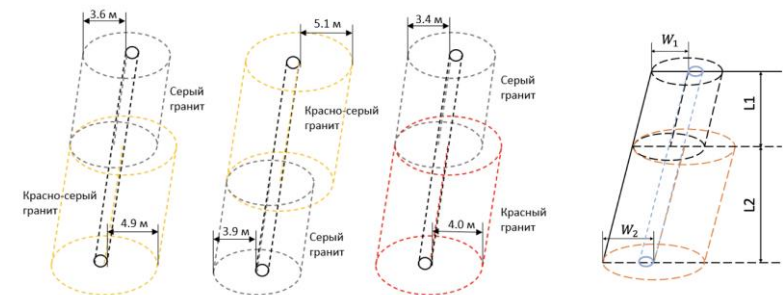


Рисунок 4 – Пример подбора ЛНС для блока №4

Таблица 1 - Результаты оценки трещиноватости откоса буровзрывного блока №4

Набор трещин	Направление падения	Интенсивность трещиноватости
Участок красно-серого гранита	277,63	1,7-1,9
Участок серого гранита	31,43	0,6-1,0
Участок красного гранита	347,21	1,3-1,5

Таблица 2 – Характеристики гранитов АО «Гавриловское КУ»

Гранит	Показатель хрупкости, Кг	Предел прочности		Модуль Юнга, ГПа
		на сжатие, МПа	на растяжение, МПа	
Красный	0,9	154,67	25	23,5
Красно-серый	0,9	128,89	21	19
Серый	0,7	165,06	15,6	52,7

Таблица 4 – Сравнение итоговых значений компонент напряжений

Вариант	σ_r , МПа	σ_φ , МПа
Методика В.А. Боровикова и И.Ф. Ванягина	73,3	42,1
Ansys Autodyn	77,0	46,7
Отклонение	5%	10%

Таблица 3 - Нормальная нагрузка от заряда ВВ для разных типов гранитов и блочности

Тип гранита	Блочность	Рэфф, м	Расчетная ЛНС
Серый гранит	Крупная (>1 м)	3,1–3,4	3,4
	Средняя (0,3–1 м)	3,4–3,7	3,6
	Мелкая (<0,3 м)	3,7–3,9	3,9
Красный гранит	Крупная (>1 м)	3,2–3,6	3,8
	Средняя (0,3–1 м)	3,6–4,0	4,0
	Мелкая (<0,3 м)	4,0–4,4	4,4
Красно-серый гранит	Крупная (>1 м)	4,1–4,6	4,9
	Средняя (0,3–1 м)	4,6–5,0	5,1
	Мелкая (<0,3 м)	5,0–5,4	5,4

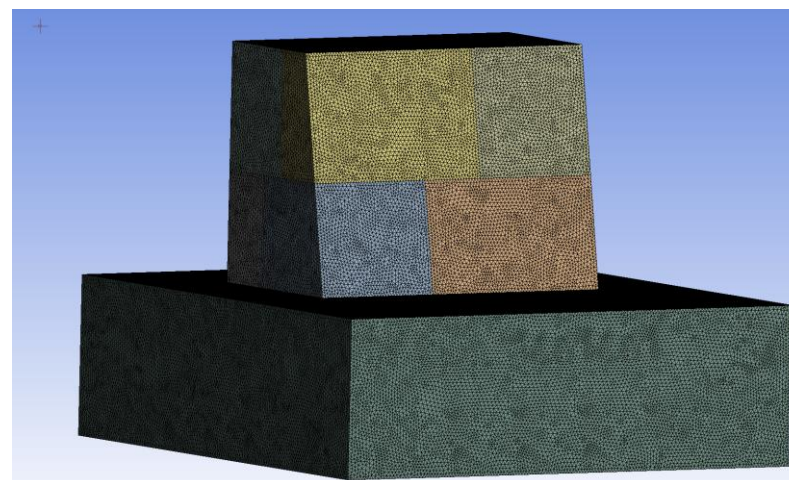


Рисунок 5 – Распределение расчетной сетки модели

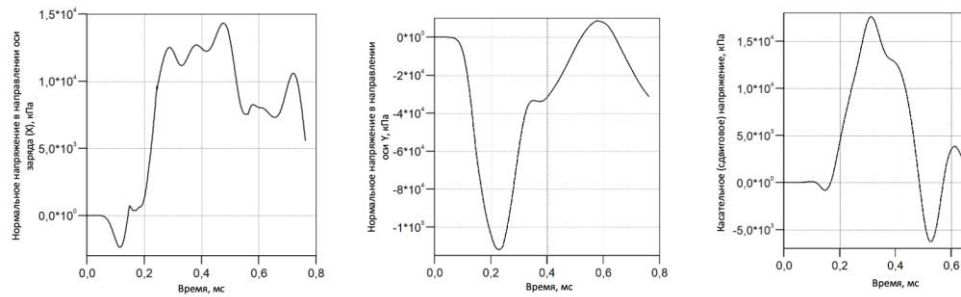


Рисунок 6 – Зависимости компонент напряжений от времени: а- зависимость нормального напряжения в направлении оси заряда (X) от времени; б – зависимость нормального напряжения в направлении оси Y от времени; в – зависимость касательного (сдвигового) напряжения от времени

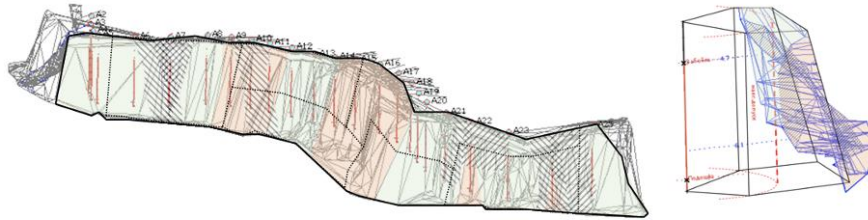


Рисунок 8 - Профилировка скважин первого ряда с учетом структурных особенностей блока №4

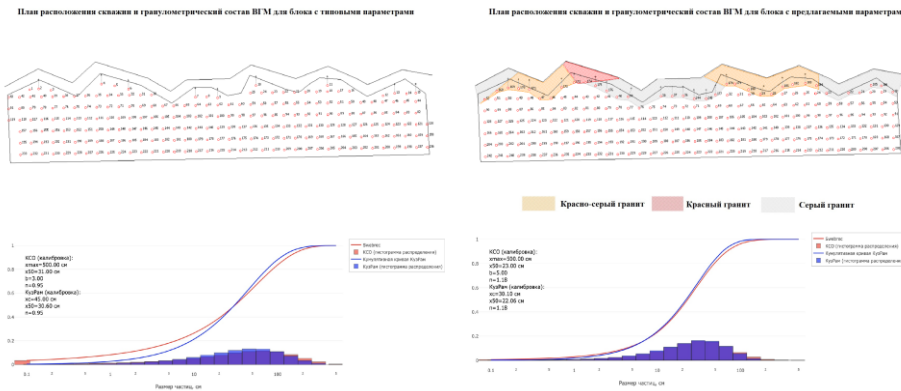


Рисунок 9 – План расположения скважин и гранулометрический состав ВГМ для типового и предлагаемого проектов

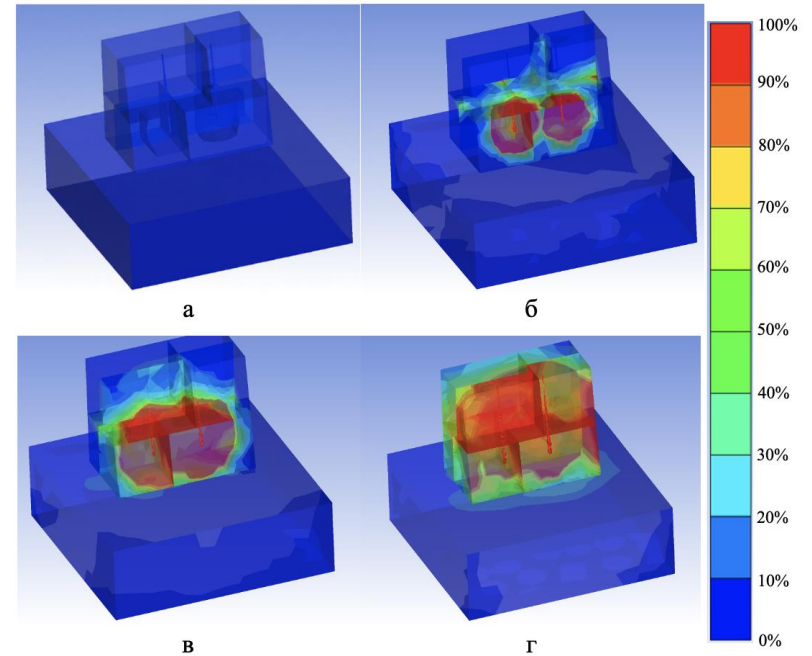


Рисунок 7 - Итоговая 3D модель распространения фронта поврежденности: а – в начальный момент времени 0 мс, б – 1 мс после инициации, в - 2 мс после инициации, г - 3 мс после инициации