



## РАЗРАБОТКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-11-177>

УДК 622.235

**Влияние скорости детонации взрывчатых веществ на степень предразрушения горной породы при взрыве**

С. В. Хохлов , Ю. И. Виноградов , В. А. Маккоев ✉, З. А. Абиев

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ s215079@stud.spmi.ru

**Аннотация**

На многих карьерах по добыче строительного камня присутствует проблема повышенного выхода отсева после всех стадий дробления и измельчения, которая приводит к снижению экономической эффективности горных предприятий. Мелкая фракция образуется вследствие измельчения предразрушенной горной массы. Уменьшение интенсивности и размеров зон предразрушения приведет к решению поставленной проблемы. Для определения влияния детонационных свойств взрывчатых веществ на величину структурного ослабления массива, были проведены исследования по измерению скорости детонации, напряжений, возникающих при взрыве в массиве и лабораторные исследования микротрещиноватости методом рентгеновской компьютерной микротомографии. Размеры зон предразрушения с ростом скорости детонации с 2 до 5,2 км/с увеличиваются с 33 до 77 радиусов заряда. Зависимость количества вновь образованных взрывом микродефектов от скорости детонации взрывчатых веществ (ВВ) принимает вид экспоненты для ближней зоны и линейна для дальних от взрыва расстояний. По данным проведенных экспериментов, на ближних расстояниях (10R) плотность наведенной микротрещиноватости  $N$  находится в пределах  $\approx 5$  тыс. шт/см<sup>3</sup>, а с ростом скорости детонации увеличивается до  $\approx 13,8$  тыс. шт/см<sup>3</sup>. На средних (40R) и дальних (70R) расстояниях значение  $N$  растет с  $\approx 750$  до  $\approx 2400$  шт/см<sup>3</sup> и с 0 до  $\approx 200$  шт/см<sup>3</sup> соответственно. Применяя ВВ с пониженной скоростью детонации, можно снизить «излишнее» воздействие на массив и тем самым уменьшить интенсивность предразрушения в зоне регулируемого дробления при взрыве. В результате исследования получены количественные параметры интенсивности и размеров зон предразрушения, что является дополнением предшествующих работ по качественному определению предразрушения.

**Ключевые слова**

предразрушение, дробление на щебень, напряжения при взрыве, микротрещина, плотность трещин, скорость детонации, выход мелочи

**Для цитирования**

Khokhlov S.V., Vinogradov Yu.I., Makkoev V.A., Abiyev Z.A. Effect of explosive detonation velocity on the degree of rock pre-fracturing during blasting. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(3):85–96. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-11-177>

## MINERAL RESOURCES EXPLOITATION

Research paper

**Effect of explosive detonation velocity on the degree of rock pre-fracturing during blasting**

S. V. Khokhlov , Yu. I. Vinogradov , V. A. Makkoev ✉, Z. A. Abiyev

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

✉ s215079@stud.spmi.ru

**Abstract**

At many quarries for the extraction of building stone there is a problem of increased output of fines after all stages of crushing and grinding, which leads to a decrease in the economic performance of mining enterprises. The fine fraction is formed by the crushing/grinding of prefractured rock mass. Reducing the intensity and size of the prefracture zones will lead to a solution to the problem at hand. To determine the effect of explosive detonation properties on the degree of structural weakening of a rock mass, studies were conducted to measure the detonation velocity, stresses generated by a blast in the rock mass, as well as laboratory studies of microfracturing by X-ray computer microtomography. The size of the prefracture zones increases from 33 to 77 charge radii with increasing the detonation velocity from 2 to 5.2 km/s. The dependence of the number of microdefects (microfractures) generated by a blast on the velocity of explosive detonation takes the form



of an exponent for the near zone and is linear for the distances far from the blast. According to the data of the experiments conducted at short distances (10R), the density of induced microfracturing  $N$  is within  $\approx 5$  thousand pcs/cm<sup>3</sup>, and with increasing the detonation velocity it increases to  $\approx 13.8$  thousand pcs/cm<sup>3</sup>. At medium (40R) and long (70R) distances,  $N$  increases from  $\approx 750$  to  $\approx 2,400$  pcs/cm<sup>3</sup> and from 0 to  $\approx 200$  pcs/cm<sup>3</sup>, respectively. Using explosives with a reduced detonation velocity allows reducing the “surplus” impact on a rock mass and thus reducing the intensity of prefracture in the zone of controlled crushing during a blast. The study allowed obtaining quantitative parameters of the intensity and size of the prefracture zones, which compose the supplement to findings of historical studies on qualitative determination of prefracture.

### Keywords

prefracture, crushing to rubble, blast stresses, microfracture, fracture density, detonation velocity, fines yields

### For citation

Khokhlov S.V., Vinogradov Yu.I., Makkoev V.A., Abiyev Z.A. Effect of explosive detonation velocity on the degree of rock pre-fracturing during blasting. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(3):85–96. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-11-177>

## Введение

Сегмент производства нерудных материалов на российском рынке является неотъемлемой частью горной отрасли. Щебень – наиболее широко используемый продукт добычи и переработки нерудных строительных материалов, который используется для дорожного строительства, производства железобетонных изделий (ЖБИ), производства товарного бетона, прокладки и ремонта ж/д путей и др.

За последние годы объемы производства щебня достигают 22 млн м<sup>3</sup> в год [1, 2]. Экономическая эффективность горных предприятий по производству щебеночной продукции напрямую зависит от объемов кондиционных фракций произведенного щебня, что опирается в вопрос качества продукции [3–5].

Проблема повышенного выхода некондиционной мелкой фракции при дроблении взорванной горной массы существует при производстве щебня и на данный момент [6]. До 30% объема конечного продукта уходит в отсеб, что приводит к уменьшению объемов кондиционных фракций и нерациональному природопользованию [7], которое отражается ростом площадей отсебных отвалов [8–10].

При измельчении материала в дробилках отсеб образуется при переработке предразрушенной взрывом горной массы [11], поскольку структурно ослабленные фрагменты с повышенной плотностью микротрещин имеют сниженные прочностные характеристики и при относительно малых воздействиях склонны рассыпаться на мелкие куски [12, 13].

Изменение детонационных характеристик взрывчатых веществ (ВВ) оказывает непосредственное влияние на размеры зон и степень предразрушения. Результаты проведенных ранее экспериментов [14] показывают, что с увеличением скорости детонации ВВ увеличивается зона предразрушения, в которой происходят изменения упругих и прочностных характеристик свойств массива горных пород с расстоянием от заряда ВВ.

Исходя из того что предразрушение это накопление микродефектов в среде, то дополнение подхода к определению трещиноватости и микротрещиноватости на основе многостадийной модели разрушения [15] приводит к необходимости изучения количественных параметров микротрещинообразования как функции от скорости детонации.

Цель работы заключается в определении зависимости количественного показателя плотности микротрещин от скорости детонации ВВ, которая влияет на величину напряжений, возникающих в горной породе при взрыве. Предложена соответствующая методика установления этой зависимости. Исследование необходимо для определения количественных параметров предразрушения и размеров зоны структурного ослабления.

## 1. Теория вопроса

При взрывном дроблении скальных пород образуется зона волнового предразрушения [16], в пределах которой возрастает наведенная микротрещиноватость. Накопление микродефектов в объеме как массива, так и отдельно рассматриваемого после взрыва куска горной массы приводит к структурному ослаблению породы и снижению ее прочности [11, 12]. Зона предразрушения получает преимущественное развитие в скальных породах, что неблагоприятно влияет на экономическую эффективность добычи строительного камня.

Рассматривая структурное ослабление прочности массива или отдельных кусков горной массы на различных расстояниях от взрыва, в качестве базовой модели разрушения горных пород используется многостадийная модель разрушения твердых тел. В соответствии с этой моделью каждый вновь образованный дефект в массиве предопределяется наличием более мелких дефектов. На первом этапе идет процесс случайного квазиравномерного накопления нарушений первого порядка. Стоит отметить, что массив горных пород вне зависимости от структурных характеристик всегда является анизотропной средой [17]. Неоднородность среды, как и наличие локальных разностей во внутренних нагрузках массива, приводит к тому, что на втором этапе формируются области высокой концентрации дефектов первого порядка. На заключительном этапе стадии, когда концентрация дефектов первого порядка превышает критический пороговый уровень, идет слияние нарушений, что приводит к образованию дефектов второго порядка [15]. Накопление дефектов происходит до момента разрушения – разделения исследуемого фрагмента на 2 и более кусков.

Зона структурного ослабления ограничивается областью наведенных взрывом микротрещин [18]. А наведение этих микротрещин (волновое предразрушение) зависит от величины напряжений, возникающих в горной породе [19].

Разрушение породы главным образом зависит от энергии волн напряжения [20], распространяющихся в среде [21, 22]. Одной из важнейших волновых характеристик, влияющих на величину напряжения, является импульс взрыва, который предопределяет все последующие фазы развития взрыва: деформацию породы, ее дробление и перемещение горной массы. Влияние взрывного импульса на характер разрушения рассмотрено в работах [23, 24].

Результат проведенных ранее исследований с взрыванием эталонного ВВ типа Аммонит № 6ЖВ [25] показал, что зависимость скорости смещения горной массы на различных расстояниях при взрыве от относительного расстояния имеет вид степенной функции (рис. 1). При этом стоит отметить, что работы были выполнены в условиях железистых кварцитов Оленегорского карьера.

Понятие предразрушения касается не только части массива, находящейся за зоной регулируемого дробления, а также и отдельных фрагментов горной породы после взрыва из зоны дробления. Это важно, поскольку эти куски имеют наведенную взрывом микротрещиноватость, которая способствует структурному ослаблению прочности этих кусков, и, как следствие, повышается выход некондиционных фракций при дроблении взорванной горной массы на щебень.

Определение зависимости величины структурного ослабления массива от напряжений, вызванных взрывом, позволит определить размеры зоны предразрушения и интенсивность трещинообразования.

## 2. Методы исследований

При определении параметров предразрушения горной породы был использован метод натурального эксперимента для определения напряжений, возникающих в горной породе при взрыве и для измерения скорости детонации ВВ. Метод лабораторных исследо-

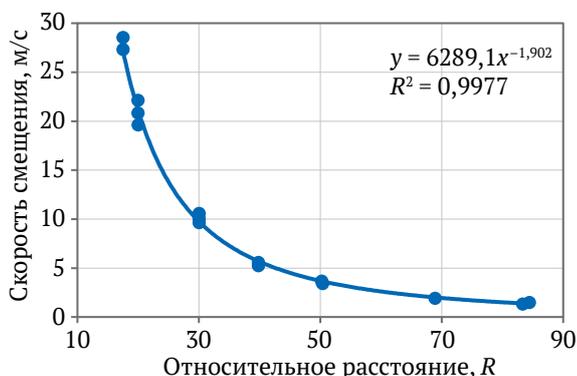


Рис. 1. График зависимости скорости смещения горной массы от относительного расстояния [составлено авторами]

ваний применялся для изучения природы образования микротрещин. Методы статистической обработки данных и анализа были применены для определения размеров зон предразрушения, а также для обработки данных и интерпретации [26], сопоставления результатов исследования.

### 2.1. Измерение напряжений

Измерение напряжений в горной породе, возникающих при взрыве на различных расстояниях с целью получения сведений о характере волновых процессов при взрывных работах, было осуществлено косвенным методом, посредством проведения экспериментальных взрывов с регистрацией ускорений смещения частиц горной массы измерительными преобразователями. Замер ускорений был проведен по известной методике [27–29] с взрыванием зарядов ВВ – Аммонита № 6ЖВ, Гранулита РП и Эмульсолита А-20 с регистрацией показаний ускорений смещения частиц массива на трех относительных расстояниях от взрыва – 10, 40 и 70 радиусов заряда.

Работы проводились на карьере по добыче известняка. Схема расположения скважин для каждого взрыва представлена на рис. 2. Оранжевым обозначена взрывная скважина, синим отмечены измерительные скважины для размещения датчиков. Приведенное расположение скважин обеспечивает точность измерений за счет отсутствия дополнительных границ раздела сред от взрывной скважины до каждого из датчиков.

Каждый акселерометр был закреплен на уровне центра заряда ВВ. Датчики были закреплены в скважинах алебастром с добавлением буровой мелочи для создания среды, максимально близкой по условиям к массиву.

Перевод ускорений в напряжения осуществлялся посредством интегрирования значений ускорения в значения скорости. Скорость учитывается при расчете звукового давления или напряжения. Звуковое давление представляется в виде разности между мгновенным давлением на пути распространения волны и собственно статическим. Волна напряжений в каждой точке волнового поля распространяется подобно скорости смещения частиц в этой же точке.

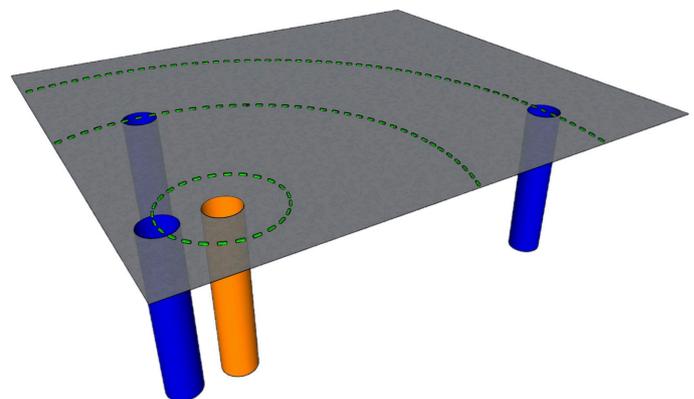


Рис. 2. Схема расположения скважин [составлено авторами]



Связующим параметром между давлением и скоростью смещения является волновое сопротивление среды или ее акустическая жесткость [30]. Приведенные параметры связаны между собой соотношением:

$$\frac{P}{U} = \rho C, \quad (1)$$

где  $P$  – звуковое давление, Па (МПа);  $U$  – скорость смещения частиц, м/с;  $\rho C$  – акустический импеданс.

Связь между напряжениями, возникающими в горной породе и скоростью смещения при воздействии сейсмозрывной волны, устанавливается с помощью метода пересчета данных о массовых скоростях на параметры возникающих напряжений произведением расчета напряжения в горной породе по формуле:

$$\sigma_0 = \rho_0 C_p U_x, \quad (2)$$

где  $\sigma_0$  – напряжения, возникающие в горной породе (давление сейсмозрывной волны), МПа;  $\rho_0$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $C_p$  – скорость распространения продольной волны в массиве, м/с;  $U_x$  – скорость смещения породы в измеряемых пределах, м/с.

## 2.2. Измерение скорости детонации

При проведении полевых экспериментов, скорость детонации при каждом взрыве была измерена оборудованием компании MREL, а именно DataTrap II VoD Recorder. Измерение проводилось резистивным методом, при котором прибор измеряет и записывает величину электрического сопротивления специального зондового кабеля, уменьшающегося по мере распространения детонационной волны в заряде. Измерительный кабель представляет собой специальный коаксиальный кабель с центральной жилой и экранированием. Кабель размещается по всей длине скважины до начала зарядки. Обязательным условием является натянутое состояние кабеля при зарядке ВВ для исключения недостоверных результатов.

Регистрация значений сопротивления линии осуществляется с частотой 2,5 МГц. С известным собственным сопротивлением измерительного кабеля 10,8 Ом/м, штатное программное обеспечение осуществляет построение графика зависимости расстояния (м) от времени (мс). Пример графика приведен на рис. 3.

Скорость детонации определяется по следующей формуле:

$$D = \frac{\Delta l}{\Delta t}, \quad (3)$$

где  $D$  – скорость детонации, м/с;  $\Delta l$  – расстояние между концами средней линии замера на графике, м;  $\Delta t$  – разница значений времени, соответствующих взятым значениям расстояния, с.

Резистивный метод измерения скорости детонации взрывчатых веществ можно использовать при измерении скорости распространения детонационных волн в ВВ в том случае, если величина ударного импульса, воздействующего на кабель будет больше учетверенного значения коэффициента динамической вязкости материала внутренней изоляционной оболочки измерительного кабеля [31]. Данное условие соблюдается при правильном расположении кабеля по протяженности столба заряда ВВ.

## 2.3. Определение размеров зон предразрушения и степени микротрециноватости

После обустройства технологических и взрывных скважин в соответствии с методикой проводилось бурение инженерно-геологических скважин с отбором проб (керн) горной массы [32] до проведения взрывных работ, а затем после. Отбор проб до и после взрыва был произведен со скважин, находящихся на относительном расстоянии 40 и 70 радиусов заряда, а также на промежуточных расстояниях. Извлеченные образцы были доставлены в лаборатории для проведения дальнейших лабораторных испытаний.

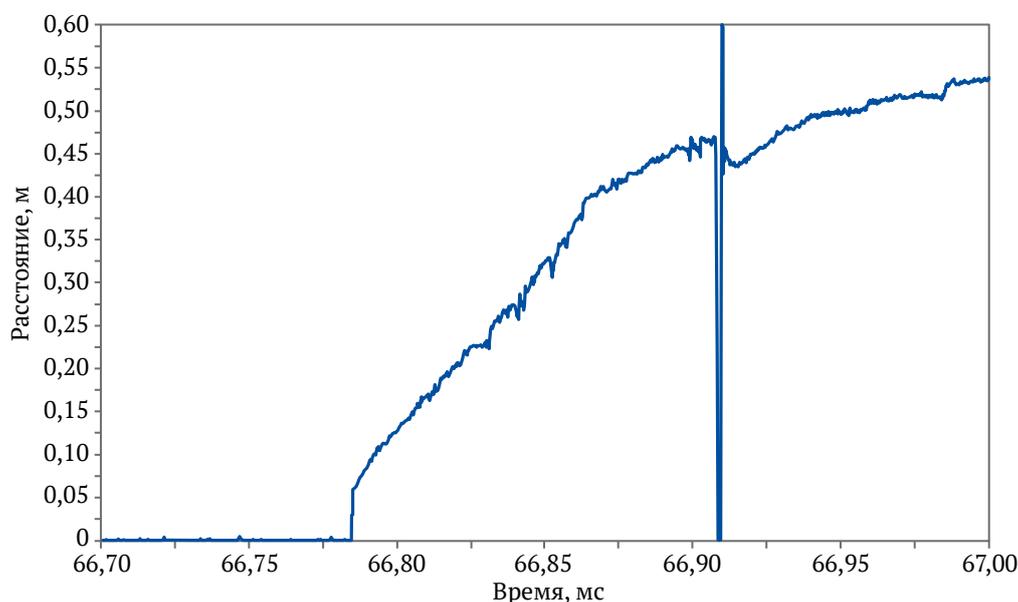


Рис. 3. График зависимости расстояния от времени при измерении скорости детонации [составлено авторами]

Для определения величины давления (напряжения) в горной породе, необходимого для начала накопительной стадии – образования микротрещин, использовался метод анализа акустической эмиссии (АЭ). Метод АЭ обеспечивает время регистрации с минимальной задержкой [33], что способствует получению достоверных данных по началу образования микротрещин. Подход хорошо себя зарекомендовал не только при статических испытаниях [34, 35], но также и при динамической нагрузке образцов [36, 37].

В процессе механического разрушения образцов горной породы отличительной особенностью является стадийность разрушения [38]. В неоднородном материале, которым является порода, закономерность смены стадий обусловлена прогрессией уровня дефекта согласно многостадийной концепции разрушения [39]. Исследователи [38, 40] различают 4 стадии деформирования образцов: I – начальная, при которой закрывается часть имеющихся дефектов; II – стадия линейных деформаций, на которой заново раскрываются «схлопнувшиеся» дефекты и образуются новые дефекты первого порядка; III – стадия упругопластических деформаций, при которых происходит интенсификация процесса формирования дефектов первого порядка (микротрещин) и начинается образование дефектов второго порядка; IV – стадия предразрушения, которая обусловлена накоплением макротрещин и предшествует разрушению образца [40].

В приведенном ключе стадия предразрушения отличается от понятия предразрушения в нашем исследовании, поскольку определяется с точки зрения начала неизбежного разрушения образца. В нашем же исследовании предразрушенная порода рассматривается как структурно ослабленная.

В породах типа мрамор, известняк и гранит активность эмиссии, свидетельствующая о начале процесса образования микротрещин, появляется при давлении 15–38% от предела прочности породы на одноосное сжатие [40]. Близкие значения приводятся другими авторами [41], которые демонстрируют величину порядка 25–30% от предела прочности на одноосное сжатие. Изменение состояния образца в соответствии со снижением скорости продольных волн начинается при напряжениях 10–15 МПа [42].

Примем минимальное значение 15% от разрушающего давления для начала формирования микротрещин.

Если качественное определение наличия микротрещин необходимо для определения размеров зоны волнового предразрушения, то количественный параметр необходим для обоснования степени предразрушения, которая определяется интенсивностью трещинообразования, что есть концентрация микротрещин на определенный объем ( $\text{см}^3$ ).

Метод рентгеновской компьютерной микротомографии [43] был применен для получения количественных характеристик микротрещиноватости образцов. Реконструкция бинарных моделей рентгеновских изображений позволила осуществить пересчет микротрещин на объем материала [44]. Для проведения данного исследования был использован томограф SkyScan 1173, а данные были обработаны в специализированном программном обеспечении.

Данные по рентгеновской компьютерной микротомографии представлены в виде набора сечений по каждому образцу. Материал снимался со всего объема образца с частотой слоя 20 мкм. Так как разрешающая способность оборудования позволяет определить микротрещины с минимальной длиной 50 мкм, а средний размер зерна известняка составляет порядка 0,2 мм [45, 46], то было учтено количество только межзеренных и трансгранулярных микротрещин. Концентрация трещин была определена через их плотность – количество видимых микротрещин на единицу площади, после чего был осуществлен пересчет в плотность трещин как их количество на единицу объема ( $\text{шт}/1 \text{ см}^3$ ).

### 3. Результаты

При взрывании зарядов ВВ были измерены ускорения смещения горной массы на различных расстояниях и скорость детонации при каждом взрыве. Средняя скорость детонации для Гранулита, Аммонита и Эмульсолита составила 2000 м/с, 4330 м/с и 5215 м/с соответственно.

Для расчета напряжений были учтены следующие показатели:  $\rho_0$  – плотность материала,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $C_p$  – скорость распространения продольной волны в массиве, м/с;  $U_x$  – скорость смещения породы в измеряемых пределах [30]. Скорость смещения частиц горной массы рассчитывалась с учетом разницы времени нарастания фронта волны напряжения от расстояния.

Как показано на рис. 4, зависимость напряжений при взрыве в горной породе от относительного расстояния, обозначаемого величиной радиуса заряда ВВ,

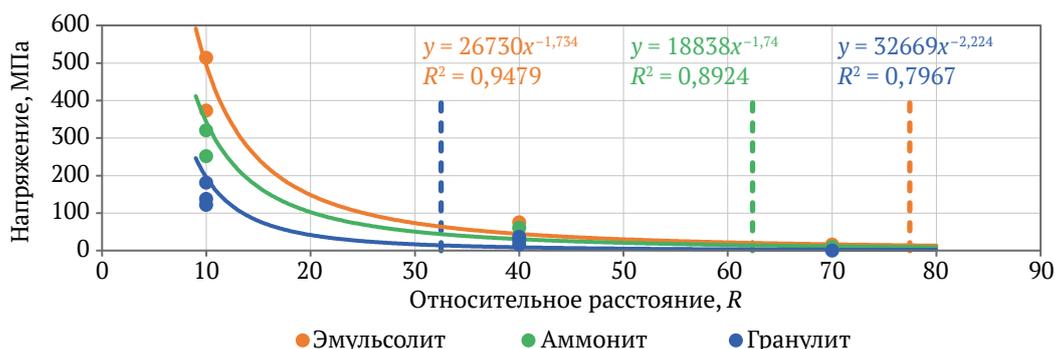


Рис. 4. График зависимости напряжений от расстояния [составлено авторами]

принимает вид степенной функции. Вертикальными линиями на графике обозначены границы зон образования микротрещин (зон предразрушения), которые находятся в пределах от 33 (для Гранулита) до 77 (для Эмульсолита) радиусов заряда. Эти границы определены исходя из величин напряжений (давления волны напряжения), представленных на графике, в соответствии с пределом прочности породы на одноосное сжатие 95 МПа. Максимальное зарегистрированное напряжение на 10 радиусах заряда – 515 МПа, а минимальное на 70 радиусах заряда – 0,4 МПа.

Зависимость времени нарастания импульса ускорения от расстояния приведена на рис. 5.

Образцы, изъятые до и после взрыва, были просканированы для получения объемной модели и последующего расчета плотности трещин. Результаты реконструкции бинарных моделей рентгеновских изображений образцов представлены на рис. 6.

Метод пересчета микротрещин позволил определить разницу их плотности до и после взрыва. На рис. 7 представлен пример обработки (определения количественных данных плотности микротрещин).

Согласно данным эксперимента до взрыва средняя плотность трещин составляла 1678 шт/см<sup>3</sup>. При-

веденное значение было принято за относительный ноль. Зависимость плотности микротрещин  $N$  от напряжений  $\sigma$ , возникающих в породе, представлена на рис. 8 и определяется выражением:

$$N = 35,389\sigma - 195,49. \quad (4)$$

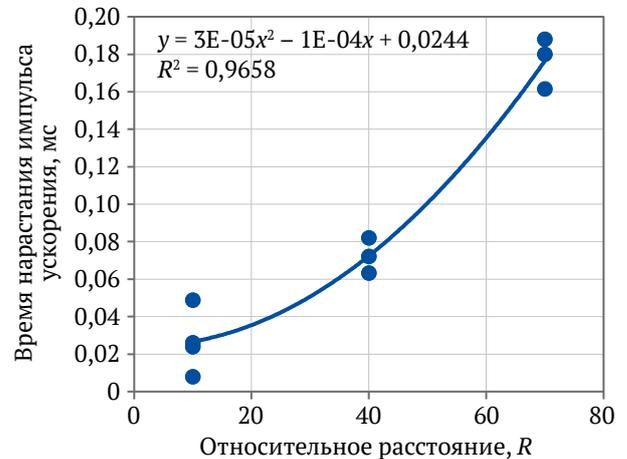


Рис. 5. График зависимости времени нарастания импульса ускорения от расстояния [составлено авторами]

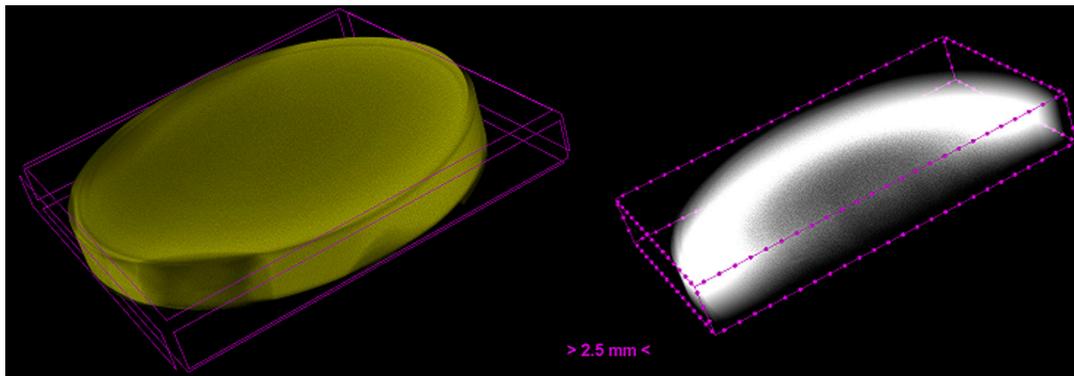


Рис. 6. Объемная модель образца [составлено авторами]

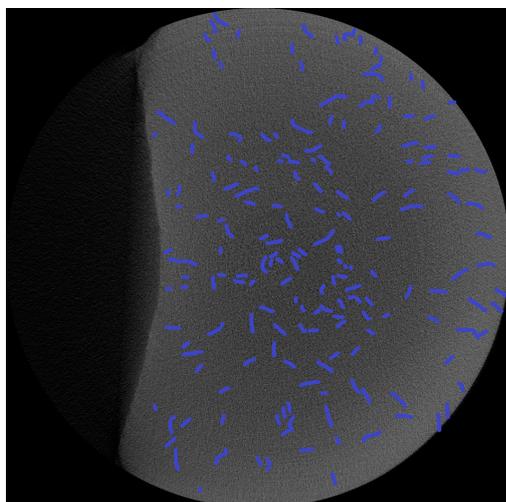


Рис. 7. Микротрещины на образце, изъятые после взрыва на относительном расстоянии 40R (отмечена синим) [составлено авторами]

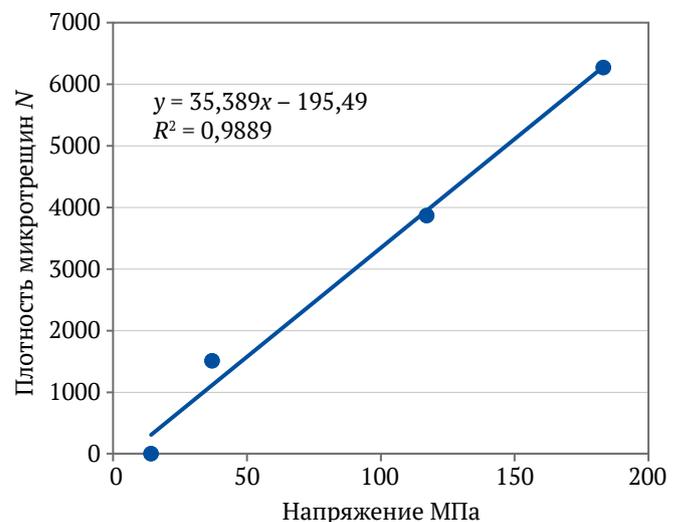


Рис. 8. График зависимости количества трещин в породе от напряжений [составлено авторами]

По полученным данным на рис. 9–11 составлены графики зависимости плотности образованных взрывом микротрещин от скорости детонации в породе типа известняк для различных относительных расстояний.

#### 4. Обсуждение

Полученные зависимости представлены по значениям взрывов Аммонита № 6ЖВ, Гранулита РП и Эмульсолита А-20 для горной породы типа известняк с пределом прочности на одноосное сжатие 95 МПа. Были использованы различные типы ВВ со скоростью детонации, отличающейся минимум на 20% для возможности объективного сравнения полученных результатов.

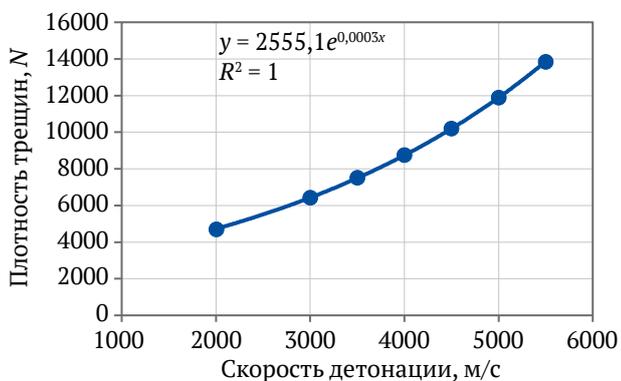


Рис. 9. График зависимости количества трещин от скорости детонации на 10R [составлено авторами]

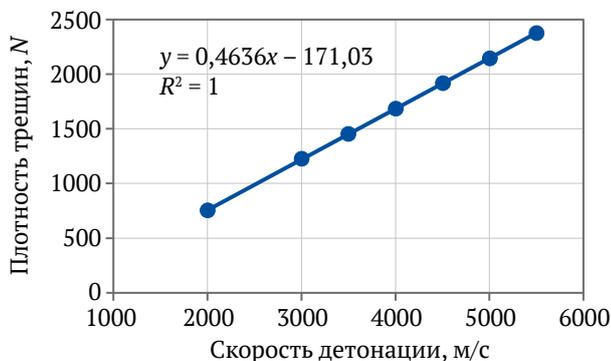


Рис. 10. График зависимости количества трещин от скорости детонации на 40R [составлено авторами]

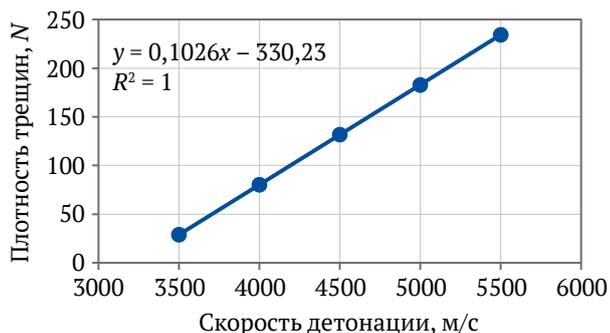


Рис. 11. График зависимости количества трещин от скорости детонации на 70R [составлено авторами]

Зависимость напряжений в породе, вызванных взрывом, от относительного расстояния для каждого типа ВВ имеет вид степенной функции, что согласуется с полученными ранее другими авторами данными. Граница зоны предразрушения при взрывании Эмульсолита находится на 77 радиусах заряда от взрывной скважины и уменьшается до 33 радиусов при взрывании Гранулита, что подтверждает факт влияния скорости детонации ВВ на размеры зон предразрушения. За пределами этих границ не наблюдается наведенной взрывом микротрещиноватости, о чем свидетельствуют результаты лабораторных исследований по определению плотности микротрещин на различных расстояниях. Этот факт обуславливает качественное определение предразрушения в массиве известняка, но большая часть исследования посвящена количественному определению плотности микротрещин в пределах зон разрушения и предразрушения.

На малых расстояниях (10 радиусов заряда) функции зависимости напряжений и плотности трещин от скорости детонации ВВ имеют экспоненциальный вид, а на средних и дальних (40 и 70 радиусов) – зависимость линейная. Это может говорить о том, что скорость детонации ВВ оказывает наибольшее воздействие на предразрушение породы преимущественно на ближних расстояниях. При этом с увеличением расстояния увеличивается и время нарастания импульса напряжения. Высокоамплитудный импульс напряжения малой продолжительности способствует переизмельчению породы на ближних расстояниях, но с отдалением от взрыва волна напряжения выполаживается, что ведет к более качественному дроблению с точки зрения добычи строительного камня.

Определение количественного показателя микротрещиноватости породы необходимо для расчета степени волнового предразрушения как массива целиком, так и отдельных кусков после взрыва. Безусловно, накопление микродефектов носит стохастический характер, но прослеживается нарастание плотности микротрещин во всем объеме образцов. Полученная зависимость плотности микротрещин от возникающих в породе напряжений от взрыва имеет линейный вид. В работах [47–50] было определено, что величина напряжений от взрыва влияет на величину структурного ослабления рассматриваемого фрагмента, что объясняется ростом плотности трещин. Но в приведенных исследованиях авторы не рассматривали количественные показатели трещиноватости, а значит, результаты настоящего исследования являются дополнением предшествующих работ.

Естественная микротрещиноватость также влияет на прочностные свойства породы [51], но в данной работе был рассмотрен вопрос волнового предразрушения породы взрывом. Плотность естественных микротрещин учитывалась как относительный ноль, поскольку существующие в породе микродефекты до взрыва влияют на параметры волны напряжений в породе, а эти параметры были изменены фактически.



### Заключение

При отработке скальных пород на щебень наведенная взрывом микротрещиноватость оказывает негативное воздействие на качество конечного продукта.

Приведены результаты экспериментальных исследований по определению качественных и количественных параметров предразрушения горной породы при взрыве. Так, при увеличении скорости детонации ВВ с 2 до 5,2 км/с зона предразрушения увеличивается с 33 до 77 радиусов заряда. Зависимость количества вновь образованных микродефектов от скорости детонации ВВ принимает вид экспоненты для ближней зоны и линейна для дальних расстояний от взрыва. По данным проведенных экспериментов на ближних расстояниях (10R) плотность наведенной микротрещиноватости  $N$  находится в пределах  $\approx 5$  тыс. шт/см<sup>3</sup>, а с ростом скорости детонации увеличивается до  $\approx 13,8$  тыс. шт/см<sup>3</sup>. На средних (40R) и дальних (70R) расстояниях значение  $N$  растет с  $\approx 750$  до  $\approx 2400$  шт/см<sup>3</sup> и с 0 до  $\approx 200$  шт/см<sup>3</sup> соответственно.

Установлено, что наибольшее влияние на форму и длительность взрывного импульса оказывает скорость детонации ВВ. С уменьшением скорости детонации уменьшается и пиковое давление головной части импульса, увеличивается длительность его нарастания, а низкоамплитудный импульс большой длительности способствует более качественному дроблению горной массы с наименьшим эффектом предразрушения.

Применяя ВВ с пониженной скоростью детонации, можно снизить «излишнее» воздействие на массив и тем самым уменьшить интенсивность предразрушения в зоне регулируемого дробления при взрыве. Это объясняется тем, что отдельные куски после взрыва будут в меньшей степени ослаблены и в результате выход отсева при дроблении скальных горных пород на щебень должен быть уменьшен.

В дальнейшем планируется рассмотрение других способов влияния на величину структурного ослабления породы в пределах зоны разрушения.

### Список литературы / References

1. Ахтямов В. Ф., Хафизова Э. Н. Влияние отходов нерудного производства на свойства тяжелых бетонов. *Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии*. 2018;15(2):261–268. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-2-261-268>  
Akhtyamov V.F., Khafizova E.N. Influence of technological non-metallic production wastes on heavy weight concrete properties. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2018;15(2):261–268. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-2-261-268>
2. Хафизова Э. Н., Ахтямов В. Ф., Панченко Ю. Ф., Панченко Д. А. Мелкодисперсная составляющая отсева горных пород в тяжелых цементных бетонах. *Инновации и инвестиции*. 2019;(9):261–266. URL: <https://www.innovazia.ru/upload/iblock/398/gxovlpzi12czrbffn0jydg9ks8se85k/%E2%84%969%202019.pdf>  
Khafizova E.N., Akhtyamov V.F., Panchenko I.F., Panchenko D.A. Micro-fine component of stone screening dust in heavy weight cement concrete. *Innovation & Investment*. 2019;(9):261–266. (In Russ.) URL: <https://www.innovazia.ru/upload/iblock/398/gxovlpzi12czrbffn0jydg9ks8se85k/%E2%84%969%202019.pdf>
3. Самуков А. Д. Комплексная переработка отходов щебеночных производств. *Экология и промышленность России*. 2019;23(7):15–19. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-7-15-19>  
Samukov A.D. Complex recycling of crushed aggregates waste. *Ecology and Industry of Russia*. 2019;23(7):15–19. (In Russ.) <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-7-15-19>
4. Ding X., Ao Z., Li X. et al. The mechanism of plugging open-pit mine cannon holes and the modification of plugging materials. *Sustainability*. 2023;15(5):4257. <https://doi.org/10.3390/su15054257>
5. Молдован Д. В., Чернобай В. И., Ястребова К. Н. Влияние композитного материала в конструкции забойки на ее работоспособность. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(9–1):110–121. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_91\\_0\\_110](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_110)  
Moldovan D.V., Chernobay V.I., Yastrebova K.N. The influence of composite material in the stemming design on its operability. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(9–1):110–121. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_91\\_0\\_110](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_110)
6. Кахаров З. В., Исломов А. С. Бетоны с заполнителями из продуктов дробления вторичного бетона. *Вестник науки*. 2023;3(5):820–825.  
Kakharov Z.V., Isломov A.S. Concretes with aggregates from secondary concrete crushing products. *Vestnik Nauki*. 2023;3(5):820–825. (In Russ.)
7. Корнев А. В., Спицын А. А., Коршунов Г. И., Баженова В. А. Обеспечение пылевзрывобезопасности подземных горных выработок в угольных шахтах: методы и современные тенденции. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(3):133–149. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_3\\_0\\_133](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_3_0_133)  
Kornev A.V., Spitsyn A.A., Korshunov G.I., Bazhenova V.A. Preventing dust explosions in coal mines: Methods and current trends. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(3):133–149. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_3\\_0\\_133](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_3_0_133)
8. Шамаев М. К., Тоштемуров У. Т. Добыча щебня и требования предъявляемые к их качеству. *Ta'lim va Rivojlanish Tahlili*. 2022;2(10):131–137.  
Shamaev M.K., Toshtemirov U.T. Extraction of crushed stone and requirements for their quality. *Analytical Journal of Education and Development*. 2022;2(10):131–137. (In Russ.)
9. Ганина А. С., Студенок Г. А. Утилизация отходов песка из отсева дробления при производстве щебня. В: *Материалы международной научно-практической конференции «Уральская горная школа – ре-*



- зионам». Екатеринбург, 11 апреля 2022 г. Екатеринбург: Уральский государственный горный университет; 2022. С. 390–391.
- Ganina A.S., Studenok G.A. Disposal of waste sand from crushing undersizes (fines) in the production of crushed stone. In: *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Ural Mining School – for Regions"*. Ekaterinburg, April 11, 2022. Ekaterinburg: Ural State Mining University Publ.; 2022. Pp. 390–391. (In Russ.)
10. Коршунов Г.И., Каримов А.М., Магомедов Г.С., Тюлькин С.А. Снижение аэротехногенного воздействия респираторной фракции пыли на персонал карьера при проведении массовых взрывов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(7):132–144. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_7\\_0\\_132](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_7_0_132)  
Korshunov G.I., Karimov A.M., Magamedov G.S., Tyulkin S.A. Reduction of respirable dust-induced impact on open pit mine personnel in large-scale blasting. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(7):132–144. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_7\\_0\\_132](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_7_0_132)
  11. Каменева Е.Е., Аминов В.Н., Шукин П.О. Постановка проблемы разработки и научного обоснования технологий дезинтеграции вскрышных и вмещающих горных пород различных генетических типов для получения строительного щебня. В: *Результаты исследований процессов дезинтеграции прочных горных пород с целью снижения энергозатрат и выпуска дополнительной продукции при переработке и обогащении руд и техногенного сырья. Сборник научных трудов*. Петрозаводск: ООО «VERSO»; 2016. С. 3–5.  
Kameneva E.E., Aminov V.N., Shchukin P.O. Definition of the problem of development and scientific substantiation of technologies for disintegration of overburden and host rocks of different genetic types to obtain building crushed stone. In: *Findings of Research on the Processes of Disintegration of Strong Rocks in Order to Reduce Energy Consumption and Produce Additional Products in the Processing and Beneficiation of Ores and Technogenic Raw Materials*. Collection of scientific papers. Petrozavodsk: VERSO LTD Publ.; 2016. Pp. 3–5. (In Russ.)
  12. Tan N., Yang R., Tan Z. Influence of complicated faults on the differentiation and accumulation of in-situ stress in deep rock mass. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2023;30(5):791–801. <https://doi.org/10.1007/s12613-022-2528-y>
  13. Kovalevich S., Zyryanov I., Chernobay V. Experience of drilling-and-blasting in diamond fields in Yakutia. *Journal of Mining Science*. 2023;58:953–965. <https://doi.org/10.1134/S1062739122060102>
  14. Кочанов А.Н. Изучение параметров зон предразрушения массива как основа совершенствования технологии взрывных работ. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 1996;(5):49–52.  
Kochanov A.N. Study of parameters of rock mass prefracture zones as a basis for the improvement of blasting technology. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 1996;(5):49–52. (In Russ.)
  15. Герман В.И. Прогноз обрушений на рудниках по данным сейсмического мониторинга. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2014;(2):99–109.  
German V.I. Rock failure prediction in mines by seismic monitoring data. *Journal of Mining Sciences*. 2014;(2):99–109. (In Russ.)
  16. Молдован Д.В., Чернобай В.И., Соколов С.Т., Баженова А.В. Конструктивные решения запираания продуктов взрыва во взрывной полости. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(6–2):5–17. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_62\\_0\\_5](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_62_0_5)  
Moldovan D.V., Chernobay V.I., Sokolov S.T., Bazhenova A.V. Design concepts for explosion products locking in chamber. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(6–2):5–17. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_62\\_0\\_5](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_62_0_5)
  17. Господариков А.П., Трофимов А.В., Киркин А.П. Оценка деформационных характеристик хрупких горных пород за пределом прочности в режиме одноосного сервогидравлического нагружения. *Записки Горного института*. 2022;256:539–548. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.87>  
Gospodarikov A.P., Trofimov A.V., Kirkin A.P. Evaluation of deformation characteristics of brittle rocks beyond the limit of strength in the mode of uniaxial servohydraulic loading. *Journal of Mining Institute*. 2022;256:539–548. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.87>
  18. Кочанов А.Н., Одинцев В.Н. Теоретическая оценка радиуса области предразрушения пород при камуфлетном взрыве. *Взрывное дело*. 2015;(113/70):41–54.  
Kochanov A.N., Odintsev V.N. Teoretical estimation of microfractured area radius after camouflet explosion. *Explosion Technology*. 2015;(113/70):41–54. (In Russ.)
  19. Менжулин М.Г., Шишов А.Н., Парамонов Г.П., Уваров А.Н. Кинетика накопления наведенной трещиноватости в гранитах под действием взрывных нагрузок. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 1999;(1):143–146.  
Menzhulin M.G., Shishov A.N., Paramonov G.P., Uvarov A.N. Kinetics of accumulation of induced fracturing in granite under the action of blast loads. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 1999;(1):143–146. (In Russ.)
  20. Коршунов В.А., Павлович А.А., Бажуков А.А. Оценка сдвиговой прочности горных пород по трещинам на основе результатов испытаний образцов сферическими инденторами. *Записки Горного института*. 2023;262:606–618. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.16>  
Korshunov V.A., Pavlovich A.A., Bazhukov A.A. Evaluation of the shear strength of rocks by cracks based on the results of testing samples with spherical indentors. *Journal of Mining Institute*. 2023;262:606–618. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.16>



21. Wei M., Dai F., Liu Y., Jiang R. A fracture model for assessing tensile mode crack growth resistance of rocks. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2023;15(2):395–411. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.03.001>
22. Аленичев И.А., Рахманов Р.А. Исследование эмпирических закономерностей сброса горной массы взрывом на свободную поверхность уступа карьера. *Записки Горного института*. 2021;249:334–341. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.3.2>  
Alenichev I.A., Rakhmanov R.A. Empirical regularities investigation of rock mass discharge by explosion on the free surface of a pit bench. *Journal of Mining Institute*. 2021;249:334–341. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.3.2>
23. Кабетенов Т., Юсупов Х.А., Рустемов С.Т. Определение рациональных параметров скважинной отбойки с учетом времени действия взрывного импульса. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2015;(2):75–81.  
Kabetenov T., Yusupov Kh.A., Rustemov S.T. Rational parameters of blasting, considering action time of explosion-generated pulse. *Journal of Mining Sciences*. 2015;(2):75–81. (In Russ.)
24. Боровиков В.А., Андреев А.А., Ефремовцев Н.Н. Особенности детонации гранулитов, включая малоплотные полистиролсодержащие составы. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2007;6(3):53–62.  
Borovikov V.A., Andreev A.A., Efremovtsev N.N. Features of detonation of granulites including low-density polystyrene-containing compositions. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2007;(6–3):53–62. (In Russ.)
25. Виноградов Ю.И., Артемов В.А. Влияние диаметра заряда на коэффициент полезного действия взрыва. *Записки Горного института*. 2012;198:170–173.  
Vinogradov Y.I., Artemov V.A. Blasting charge diameter influence on the blasting efficiency. *Journal of Mining Institute*. 2012;198:170–173. (In Russ.)
26. Вальков В.А., Виноградов К.П., Валькова Е.О., Мустафин М.Г. Создание растров высокой информативности по данным лазерного сканирования и аэрофотосъемки. *Геодезия и картография*. 2022;83(11):40–49. <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2022-989-11-40-49>  
Valkov V.A., Vinogradov K.P., Valkova E.O., Mustafin M.G., Creating highly informative rasters based on laser scanning and aerial photography data. *Geodesy and Cartography*. 2022;83(11):40–49. (In Russ.) <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2022-989-11-40-49>
27. Должиков В.В., Рядинский Д.Э., Яковлев А.А. Влияние интервалов замедления на амплитуды волн напряжений при изучении модели взрыва системы скважинных зарядов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(6–2):18–32. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_62\\_0\\_18](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_62_0_18)  
Dolzhikov V.V., Ryadinsky D.E., Yakovlev A.A. Influence of deceleration intervals on the amplitudes of stress waves during the explosion of a system of borehole charges. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(6–2):18–32. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_62\\_0\\_18](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_62_0_18)
28. Артемов В.А. и др. Влияние соотношения глубины заложения заряда и массы ВВ на параметры сейсмозврывных волн в ближней зоне взрыва. *Взрывное дело*. 2009;(101/58):303–307.  
Artemov V.A., Vinogradova E.Yu., Vinogradov Yu.I., Gendler S.G. Influence of parity between depth of charge placing and weight of explosive on seismoblast waves parameters in near zone of explosion. *Explosion Technology*. 2009;(101/58):303–307. (In Russ.)
29. Меньшиков П.В., Синицын В.А., Шеменев В.Г. Определение основных детонационных характеристик взрывчатых веществ с помощью измерительного оборудования DATATRAP II DATA/VOD RECORDER. *Проблемы недропользования*. 2016;(4):112–120. <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2016.04.112>  
Menshikov P., Sinizyn V., Shemenov V. Main detonation characteristics of explosives determination using the DATATRAP II DATA/VOD RECORDER measuring equipment. *Problems of Subsoil Use*. 2016;(4):112–120. (In Russ.) <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2016.04.112>
30. Конурин А.И., Еременко А.А., Филиппов В.Н. Особенности оценки состояния массива горных пород при промышленных взрывах и геодинамических явлениях. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017;(7):153–160.  
Konurin A.I., Eremenko A.A., Filippov V.N. Assessment features for rock mass conditions under production blasting and geodynamic events. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2017;(7):153–160. (In Russ.)
31. Иляхин С.В., Маслов И.Ю., Брагин П.А. Элементарная теория измерительного кабеля при резистивном методе измерения скорости детонации взрывчатых веществ. *Известия Уральского государственного горного университета*. 2019;(4):104–108. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-4-104-108>  
Ilyakhin S.V., Maslov I. Yu., Bragin P.A. Elementary theory of a measuring cable with a resistive method for measuring velocity of detonation of an explosive. *News of the Ural State Mining University*. 2019;(4):104–108. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-4-104-108>
32. Родионов В.А., Карпов Г.Н., Лейсле А.В. Методологический подход к оценке взрывопожароопасных свойств сульфидсодержащих полиметаллических руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(6–1):198–213. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_61\\_0\\_198](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_61_0_198)  
Rodionov V.A., Karpov G.N., Leisle A.V. Methodological approach to the need to assess the explosion and fire hazard properties of sulfide-containing polymetallic ores. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(6–1):198–213. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_61\\_0\\_198](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_61_0_198)
33. Dong L., Zou W., Li X. et al. Collaborative localization method using analytical and iterative solutions for microseismic/acoustic emission sources in the rockmass structure for underground mining. *Engineering Fracture Mechanics*. 2019;210:95–112. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.01.032>



34. Потокин А.С., Пак А.К. Исследования акустической и электромагнитной эмиссий при одноосном сжатии образцов скальных горных пород. *НаукоСфера*. 2020;(11–2):86–91. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4309468>  
Potokin A.S., Pak A.K. Study of acoustic and electromagnetic emissions under uniaxial compression of hard rock samples. *Naukosfera*. 2020;(11–2):86–91. (In Russ.) <https://doi.org/10.5281/zenodo.4309468>
35. Rodríguez P., Celestino T.B. Application of acoustic emission monitoring and signal analysis to the qualitative and quantitative characterization of the fracturing process in rocks. *Engineering Fracture Mechanics*. 2019;210:54–69. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.06.027>
36. Бехер С.А., Попков А.А. Временные характеристики потока сигналов акустической эмиссии при развитии трещин в стекле при ударном нагружении. *Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашикова*. 2019;22(1):62–71. <https://doi.org/10.22213/2413-1172-2019-1-62-71>  
Bekher S.A., Popkov A.A. Temporal characteristics of the flow of acoustic emission signals in the development of cracks in glass under shock loading. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*. 2019;22(1):62–71. (In Russ.) <https://doi.org/10.22213/2413-1172-2019-1-62-71>
37. Hu X., Su G., Chen G. et al. Experiment on rockburst process of borehole and its acoustic emission characteristics. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2019;52:783–802. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1613-z>
38. Ghasemi S., Khamehchiyan M., Taheri A. et al. Crack evolution in damage stress thresholds in different minerals of granite rock. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2020;53:1163–1178. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01964-9>
39. Du K., Li X., Tao M., Wang Sh. Experimental study on acoustic emission (AE) characteristics and crack classification during rock fracture in several basic lab tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2020;133:104411. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104411>
40. Шкуратник В.Л., Новиков Е.А., Ошкин Р.О. Экспериментальное исследование термостимулированной акустической эмиссии образцов горных пород различных генотипов при одноосном нагружении. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2014;(2):69–76.  
Shkuratnik V.L., Novikov E.A., Oshkin R.O. Experimental analysis of thermally stimulated acoustic emission in various-genotype rock specimens under uniaxial compression. *Journal of Mining Sciences*. 2014;(2):69–76. (In Russ.)
41. Опарин В.Н., Усольцева О.М., Семенов В.Н., Цой П.А. О некоторых особенностях эволюции напряженно-деформированного состояния образцов горных пород со структурой при их одноосном нагружении. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2013;(5):3–19.  
Oparin V.N., Usol'tseva O.M., Semenov V.N., Tsoi P.A. Evolution of stress–strain state in structured rock specimens under uniaxial loading. *Journal of Mining Sciences*. 2013;(5):3–19. (In Russ.)
42. Викторов С.Д., Кочанов А.Н., Одинцев В.Н. Предразрушение горных пород как стадия процесса разрушения при квазистатическом и динамическом нагружении. *Записки горного института*. 2007;171:153–157.  
Viktorov S.D., Kochanov A.N., Odintsev V.N. Pre-destruction of rocks as a stage of fracture process under quasi-static and dynamic loading. *Journal of Mining Institute*. 2007;171:153–157. (In Russ.)
43. Пономарев А.А., Заватский М.Д. Методы применения компьютерной микротомографии в геологии. *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ*. 2015;(3):31–35. <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2015-3-31-35>  
Ponomarev A.A., Zavatsky M.D. Methods of application of computer microtomography in geology. *Oil and Gas Studies*. 2015;(3):31–35. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2015-3-31-35>
44. Котелева Н.И., Вальнев В.В., Королев Н.А. Технология дополненной реальности как средство технического обслуживания оборудования металлургических производств. *Цветные металлы*. 2023;(4):14–23. <https://doi.org/10.17580/tsm.2023.04.02>  
Koteleva N.I., Valnev V.V., Korolev N.A. Augmented reality as a means of metallurgical equipment servicing. *Tsvetnye Metally*. 2023;(4):14–23. <https://doi.org/10.17580/tsm.2023.04.02>
45. Веттегрень В.И., Куksenко В.С., Щербakov И.П. Механизм и динамика разрушения горных пород под влиянием механического удара и электрического разряда. *Физика Земли*. 2016;(5):134–149. <https://doi.org/10.7868/S0002333716040116> (Trans. ver.: Vettegren V.I., Kuksenko V.S., Shcherbakov I.P. The mechanism and dynamics of rock fracture upon mechanical impact and electric discharge. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2016;52(5):754–769. <https://doi.org/10.1134/S106935131604011X>)  
Vettegren V.I., Kuksenko V.S., Shcherbakov I.P. The mechanism and dynamics of rock fracture upon mechanical impact and electric discharge. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2016;52(5):754–769. <https://doi.org/10.1134/S106935131604011X> (Orig. ver.: Vettegren V.I., Kuksenko V.S., Shcherbakov I.P. The mechanism and dynamics of rock fracture upon mechanical impact and electric discharge. *Fizika Zemli*. 2016;(5):134–149. <https://doi.org/10.7868/S0002333716040116>)
46. Яшунский Ю.В. и др. Аутигенный калиевый полевой шпат из известняков верхнего карбона Московской области. *Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический*. 2016;91(6):49–61.  
Yashunsky Yu. V., Novikov I.A., Shkurskii B.B. et al. Authigenic potassium feldspar from upper carboniferous limestone of Moscow Region. *Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Geological Series*. 2016;91(6):49–61. (In Russ.)



47. Кочанов А.Н., Одинцев В.Н. Волновое предразрушение монолитных горных пород при взрыве. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2016;(6):38–48.  
Kochanov A.N., Odintsev V.N. Wave pre-destruction of solid rocks under blasting. *Journal of Mining Sciences*. 2016;(6):38–48. (In Russ.)
48. Кочанов А.Н. Некоторые результаты исследований в области взрывного разрушения горных пород. В: *Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр: сборник статей 5-й конференции Международной научной школы академика РАН К.Н. Трубецкого*. Москва, 14–18 ноября 2022. М.: ИПКОН РАН; 2022. С. 112–115.  
Kochanov A.N. Some research results in the field of blasting rock rupture. In: *Problems and Prospects of Integrated Development and Conservation of Earth's Subsoil. Collection of articles from the 5<sup>th</sup> Conference of the International Scientific School of K.N. Trubetskoy, Academician of the Russian Academy of Sciences*. Moscow, November 14–18, 2022. Moscow: IPCON RAS; 2022. Pp. 112–115. (In Russ.)
49. Шевкун Е.Б., Лещинский А.В., Лысак Ю.А., Плотников А.Ю. Взрывное рыхление пород на карьерах с большими замедлениями. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(10):29–41. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-10-0-29-41>  
Shevkun E.B., Leshchinskiy A.V., Lysak Yu.A., Plotnikov A.Yu. Long-period delay loosening blasting in open pit mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(10):29–41. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-10-0-29-41>
50. Fan X., Jiang X., Liu Y. et al. Local stress distribution and evolution surrounding flaw and opening within rock block under uniaxial compression. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2021;112:102914. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2021.102914>
51. Ишейский В.А., Рядинский Д.Э., Магомедов Г.С. Повышение качества дробления горных пород взрывом за счет учета структурных особенностей взрываеваемого массива. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(9–1):79–95. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_91\\_0\\_79](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_79)  
Isheisky V.A., Ryadinskii D.E., Magomedov G.S. Increasing the quality of fragmentation of blasting rock mass ased on accounting for structural features of massif in the blast design. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(9–1):79–95. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_91\\_0\\_79](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_79)

### Информация об авторах

**Сергей Владимирович Хохлов** – кандидат технических наук, доцент кафедры взрывного дела, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-1040-8328](https://orcid.org/0000-0003-1040-8328), Scopus ID [57199258554](https://scopus.com/authorid/57199258554), ResearcherID [AAG-5849-2019](https://orcid.org/AAG-5849-2019); e-mail [khokhlov\\_sv@pers.spmi.ru](mailto:khokhlov_sv@pers.spmi.ru)

**Юрий Иванович Виноградов** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры взрывного дела, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-9468-2214](https://orcid.org/0000-0001-9468-2214), Scopus ID [57208625767](https://scopus.com/authorid/57208625767), ResearcherID [AAG-5997-2019](https://orcid.org/AAG-5997-2019); e-mail [vinogradov\\_yui@pers.spmi.ru](mailto:vinogradov_yui@pers.spmi.ru)

**Вячеслав Алексеевич Маккоев** – аспирант кафедры взрывного дела, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-3656-3625](https://orcid.org/0000-0003-3656-3625), Scopus [57428865400](https://scopus.com/authorid/57428865400); e-mail [s215079@stud.spmi.ru](mailto:s215079@stud.spmi.ru)

**Заур Агадвович Абиев** – ассистент кафедры взрывного дела, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-9789-1115](https://orcid.org/0000-0002-9789-1115), Scopus ID [57206657220](https://scopus.com/authorid/57206657220); e-mail [Abiev\\_ZA@pers.spmi.ru](mailto:Abiev_ZA@pers.spmi.ru)

### Information about the authors

**Sergei V. Khokhlov** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Explosive Engineering, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID [0000-0003-1040-8328](https://orcid.org/0000-0003-1040-8328), Scopus ID [57199258554](https://scopus.com/authorid/57199258554), ResearcherID [AAG-5849-2019](https://orcid.org/AAG-5849-2019); e-mail [khokhlov\\_sv@pers.spmi.ru](mailto:khokhlov_sv@pers.spmi.ru)

**Juriy I. Vinogradov** – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Associate Professor, Department of Explosive Engineering, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID [0000-0001-9468-2214](https://orcid.org/0000-0001-9468-2214), Scopus ID [57208625767](https://scopus.com/authorid/57208625767), ResearcherID [AAG-5997-2019](https://orcid.org/AAG-5997-2019); e-mail [vinogradov\\_yui@pers.spmi.ru](mailto:vinogradov_yui@pers.spmi.ru)

**Viacheslav A. Makkoev** – PhD-Student (Eng.), Department of Explosive Engineering, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID [0000-0003-3656-3625](https://orcid.org/0000-0003-3656-3625), Scopus [57428865400](https://scopus.com/authorid/57428865400); e-mail [s215079@stud.spmi.ru](mailto:s215079@stud.spmi.ru)

**Zaur A. Abiev** – Assistant (Eng.), Department of Explosive Engineering, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID [0000-0002-9789-1115](https://orcid.org/0000-0002-9789-1115), Scopus ID [57206657220](https://scopus.com/authorid/57206657220); e-mail [Abiev\\_ZA@pers.spmi.ru](mailto:Abiev_ZA@pers.spmi.ru)

Поступила в редакцию 02.11.2023

Поступила после рецензирования 08.01.2024

Принята к публикации 18.02.2024

Received 02.11.2023

Revised 08.01.2024

Accepted 18.02.2024