

# Сейсмическое и акустическое воздействие массовых взрывов при ведении взрывных работ в карьере

С.А. Козырев ✉, Е.А. Власова, Е.А. Усачев

Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация  
✉ s.kozyrev@ksc.ru

**Резюме:** Для обеспечения безопасности взрывных работ необходимо детально знать свойства сейсмических и ударных воздушных волн взрыва и их взаимосвязь с условиями проведения и параметрами взрыва. Учитывая разнообразие взаимного расположения охраняемых объектов и места взрыва, грунтовых условий на пути распространения сейсмических волн, только экспериментальные методы оценки могут дать реальное представление об уровне сейсмического воздействия на охраняемые объекты. При расширении бортов действующего карьера рудника «Железный» АО «Ковдорский ГОК» существенно сократились расстояния от мест ведения взрывных работ до охраняемых объектов. С целью оценки сейсмического воздействия массовых взрывов на охраняемые объекты рудника и жилые здания г. Ковдора выполнялся сейсмический мониторинг. Инструментальные наблюдения показали, что интенсивность воздействия на здания и сооружения в рассматриваемых горно-геологических условиях не подчиняется известным закономерностям, нежелательные воздействия наблюдаются на таких расстояниях от взрыва, где повреждения по общепризнанным критериям оценки не прогнозируются. Длительные инструментальные наблюдения в дальней зоне действия взрыва показали, что совместное воздействие сейсмозрывной и ударной воздушной волны на охраняемые объекты приводит к дополнительному усилению и увеличению продолжительности колебаний. Для раздельного действия сейсмических и ударных воздушных волн необходимо, чтобы время прихода ударных воздушных волн начиналось после окончания действия сейсмозрывных, что регулируется уменьшением общей длительности взрыва. Снижение интенсивности ударных воздушных волн может быть обеспечено за счет развития взрыва в направлении от охраняемого объекта. Результаты выполненных сейсмонаблюдений с оценкой акустического воздействия на охраняемые объекты позволили получить расчётные формулы, необходимые для корректировки проектов взрывания блоков с учётом фактического расстояния до охраняемых объектов и величин допустимой и предельной скорости смещения в их основании.

**Ключевые слова:** открытые горные работы, взрывные работы, параметры буровзрывных работ, сейсмическая безопасность, сейсмическое действие взрыва, сейсмозрывная волна, ударная воздушная волна, охраняемые объекты, арктическая зона, четвертичные отложения

**Благодарности:** Авторы выражают благодарность специалистам АО «Ковдорский ГОК» за сопровождение и помощь при проведении экспериментальных работ.

**Для цитирования:** Козырев С.А., Власова Е.А., Усачев Е.А. Сейсмическое и акустическое воздействие массовых взрывов при ведении взрывных работ в карьере. *Горная промышленность*. 2025;(6):199–205. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-199-205>

## Seismic and acoustic impact of large-scale blasts during blasting operations in an open pit mine

S.A. Kozyrev ✉, E.A. Vlasova, E.A. Usashev

Mining Institute of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation  
✉ s.kozyrev@ksc.ru

**Abstract:** To ensure the safety of blasting operations, it is necessary to know the detailed properties of seismic and shock waves of the blast and their relationship with the blast conditions and parameters. Only experimental assessment methods can give a real idea of the level of seismic impact on the protected facilities given the diversity of their relative positions against the blast site, as well as the rock conditions along the path of the seismic waves. When moving the walls of the operating open-pit at the Zhelezny ore mine of the Kovdorsky GOK JSC, the distances from the blast sites to the protected facilities were significantly reduced. Seismic monitoring was carried out to assess the seismic impact of large-scale blasting on the protected facilities in the

mine and residential buildings in the City of Kovdor. Instrumental observations proved that the impact intensity on the buildings and structures in the considered mining and geological conditions does not follow the known patterns, while undesirable effects are observed at such distances from the blast where no damage was predicted according to the generally accepted assessment criteria. Long-term instrumental observations in the far zone of the blast showed that the combined effect of the seismic blast and shock air waves on the protected facilities leads to additional amplification and enhanced duration of the vibrations. For the separate action of seismic and shock air waves, it is necessary that the arrival time of the shock air waves begins after the action of the seismic blast waves ends, which is controlled through the reduction of the total duration of the blast. A decrease in the intensity of shock air waves can be ensured by the blast development in the direction opposite to the protected facility. The results of the seismic observations with an assessment of the acoustic impact on the protected facilities made it possible to obtain calculation formulas necessary for adjusting block blasting projects with account of the actual distance to the protected facilities and the values of the permissible and maximum displacement velocity at their base.

**Keywords:** open-pit mining, blasting operations, parameters of drilling and blasting operations, seismic safety, seismic effect of the blast, seismic wave, shock air wave, protected facilities, Arctic Zone, quaternary deposits

**Acknowledgments:** The authors express their gratitude to the specialists of JSC Kovdorsky GOK for their support and assistance in conducting the experiments.

**For citation:** Kozyrev S.A., Vlasova E.A., Usashev E.A. Seismic and acoustic impact of large-scale blasts during blasting operations in an open pit mine. *Russian Mining Industry*. 2025;(6):199–205. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-199-205>

## Введение

Изучению действия сейсмозрывных (СВВ) и ударных воздушных волн (УВВ) уделялось и уделяется достаточно много внимания как среди ученых, так и производственников, среди которых можно выделить труды С.В. Медведева, П.С. Миронова, В.Н. Мосинца, Я.И. Цейтлина, Н.И. Смолия, Л.В. Сафонова, Г.В. Кузнецова, Б.Н. Кутузова, В.К. Совмена, Б.В. Эквиста, В.Г. Вартанова и др. В основном исследования приурочены к конкретным горнодобывающим предприятиям, которые значительно отличаются по условиям разработки и расположению объектов, попадающих в опасную зону взрывных работ. Поэтому дополнительные сведения о действии СВВ и УВВ на других предприятиях позволят расширить представления о их воздействии на охраняемые объекты.

Анализ исследований показал, что современные методики оценки действия СВВ и УВВ, а также нормативные документы (далее – Приказ №494)<sup>1</sup> не учитывают их совместного действия. Расчет безопасных расстояний производится раздельно: либо по действию сейсмозрывных волн, либо по действию ударных воздушных волн на застекление в предположении, что совместное действие сейсмических и ударных воздушных волн от одного взрыва на охраняемые объекты исключается ввиду значительной удаленности их от карьера. К настоящему времени уже накоплены данные о совместном воздействии СВВ и УВВ [1–7], но практически все результаты получены для высотных или гибких сооружений на значительных расстояниях от места взрывов. Формированию УВВ в ближней зоне практического внимания уделялось мало. Это позволяет говорить о необходимости проведения комплекса исследований, направленных на пересмотр и разработку критериев оценки совместного действия СВВ и УВВ [8]. Проблема обеспечения сохранности охраняемых объектов осложняется сложными природными и климатическими условиями арктической зоны РФ.

При расширении бортов действующего карьера рудника «Железный» АО «Ковдорский ГОК» сократились расстояния от мест ведения взрывных работ до охраняемых объектов.

С целью оценки сейсмического воздействия массовых взрывов (МВ) на охраняемые объекты рудника и жилые здания г. Ковдора, расположенного на расстоянии менее километра от северо-восточного борта карьера, выполнялся сейсмический мониторинг. Инструментальные наблюдения показали, что интенсивность воздействия на здания и сооружения в рассматриваемых горно-геологических условиях не подчиняется известным закономерностям, нежелательные воздействия наблюдаются на таких расстояниях от взрыва, где повреждения по общепризнанным критериям оценки не прогнозируются.

## Методика экспериментальных исследований

Измерения сейсмозрывной и ударной воздушной волны проводились с использованием аппаратуры фирмы «InstanTel». Для измерения параметров сейсмозрывного воздействия использовали комплекты, включающие 8-канальный сейсмоизмеритель «Minimate Plus» со стандартными трехкомпонентными сейсмоприемниками (ISEE версия, рабочий диапазон частот 2–250 Гц). Включение записи сейсмического сигнала регулировалось пороговым уровнем скорости смещения (1 мм/с). Микрофон и сеймодатчик располагались в одной точке регистрации вблизи охраняемого объекта. Точки располагались в различных относительно направления развития взрыва направлениях.

Все измерения выполнены в условиях карьера «Железный» в осенне-зимнем периоде. Одновременная регистрация СВВ и УВВ производилась для массовых взрывов, смонтированных детонирующим шнуром (ДШ) с преобладающими ступенями замедления 17 и 25 мс и неэлектрической системой инициирования (НСИ) с замедлениями 42 и 67 мс.

## Действие СВВ и УВВ в карьерных условиях

Разработка полезных ископаемых открытым способом подразумевает размещение в карьере различного технологического оборудования. При проведении взрывных работ это оборудование должно быть гарантированно защищено от разрушительного действия взрыва: разлета кусков горной породы, воздействия сейсмозрывных и (или) ударных воздушных волн. Согласно Приказу №494 при одновременных взрывах наружных и скважинных зарядов рыхления безопасные расстояния  $r_B$  по действию УВВ на застекле-

<sup>1</sup> Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения»: приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 03.12.2020 г. №494. Режим доступа: <https://base.garant.ru/400142230/> (дата обращения: 03.06.2025).

ние при взрывании пород VI–VIII групп по классификации строительных норм определяют в зависимости от массы эквивалентного заряда  $Q_э$ , которую для группы скважинных зарядов длиной более 12 своих диаметров, взрывааемых одновременно, рассчитывают как:

$$Q_э = 12 \cdot P \cdot d \cdot K_3 \cdot N, \quad (1)$$

где  $P$  – вместимость ВВ в 1 м скважины, кг;  $d$  – диаметр скважины, м;  $K_3$  – коэффициент, значение которого зависит от отношения длины забойки  $l_{заб}$  к диаметру скважины  $d$ . При отсутствии забойки  $K_3$  зависит от отношения длины свободной от заряда части скважины  $l_{св}$  к диаметру  $d$ ;  $N$  – количество скважинных зарядов.

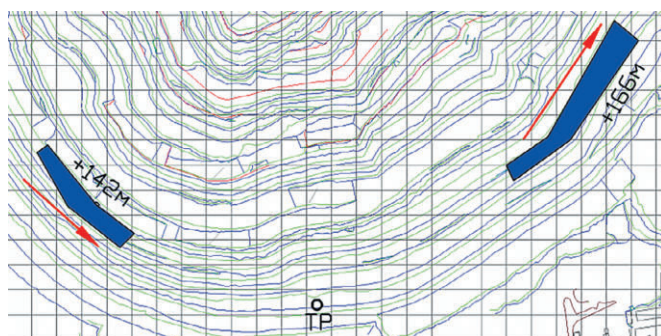
При интервале замедления от 30 до 50 мс безопасное расстояние должно быть увеличено в 1,2 раза; от 20 до 30 мс – в 1,5 и от 10 до 20 мс – в 2 раза. Если взрывные работы проводятся при отрицательной температуре воздуха, безопасное расстояние должно быть увеличено не менее чем в 1,5 раза. Для условий карьера «Железный» максимальная эквивалентная масса заряда  $Q_э$  при одновременном взрывании 10 скважин по формуле (1) составляет 7,7 кг, расчет безопасного расстояния  $r_Б$  проводят по формуле (2) <sup>2</sup>:

$$r_Б = 65 \cdot \sqrt{Q_э}. \quad (2)$$

Для рассматриваемых условий при отрицательных температурах и интервале замедлений от 20 до 30 мс безопасное расстояние  $r_Б$  по УВВ составляет 405 м.

Реальные фактические значения избыточного давления на фронте УВВ от массовых взрывов в карьере могут отличаться, так как интенсивность распространения УВВ зависит от множества факторов: одновременно взрывааемой массы зарядов ВВ, расстояния до охраняемых объектов, встречающихся на пути волны преград, неровностей местности, метеорологических условий. При анализе измерений в условиях карьера «Железный» было установлено, что формирование и распространение СВВ и УВВ во многом зависит от направления инициирования блока. Для подтверждения были выполнены измерения на блоках, близких по расположению в карьере и протяженности. Измерительные датчики размещались на равном от блоков расстоянии. План расположения блоков и измерительных датчиков в точке регистрации (ТР) приведен на рис. 1.

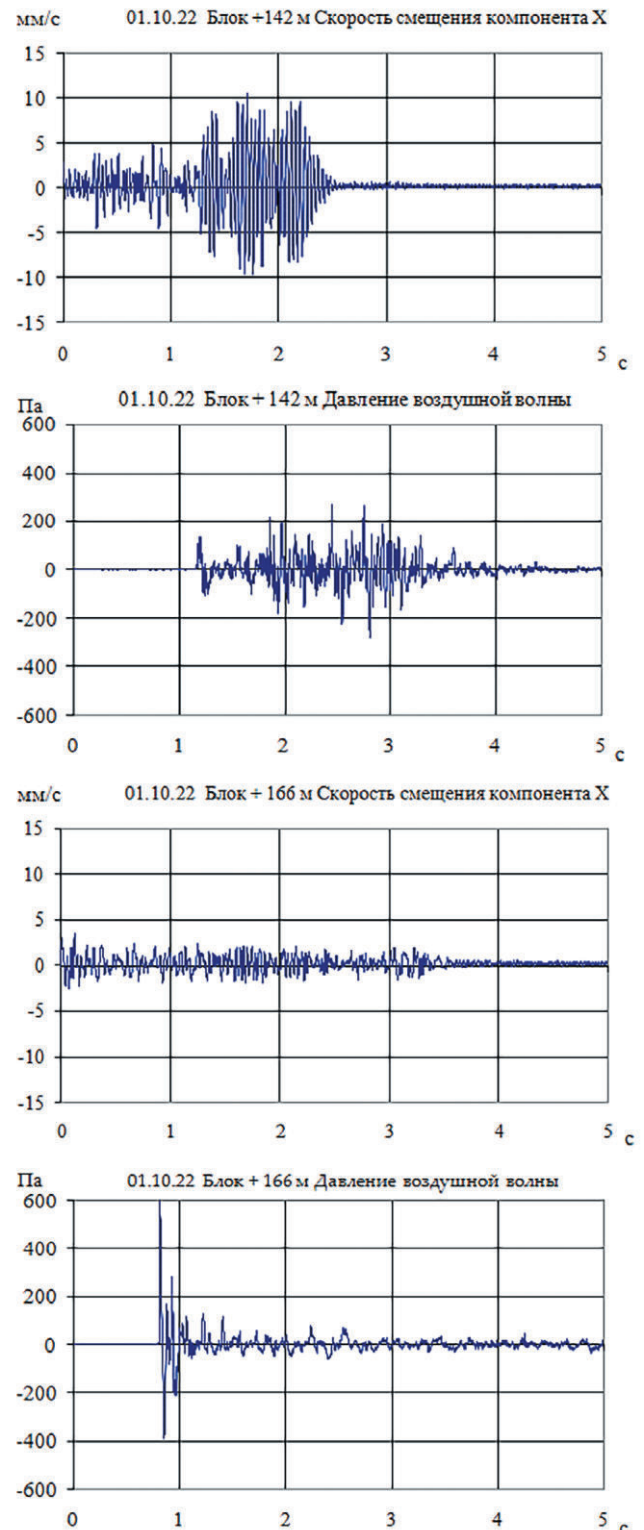
Расстояние от максимальной ступени блока гор.+142 м



**Рис. 1**  
План расположения блоков гор. +142 и +166 м и точки регистрации

**Fig. 1**  
A location plan of blocks at +142 m Level and +166 m Level and the recording points

до ТР – 464 м; от блока гор.+166 м – 468 м. Стрелками на рис. 1 указаны направления развития взрывов. Сейсмо- и акустogramмы взрыва блоков приведены на рис. 2. В рассмотренном случае расположения охраняемого объекта и взрывааемых блоков видно, что при развитии взрыва на объект амплитуда сейсмозврывной волны постепенно возрастает. Вступление ударной воздушной волны проис-



**Рис. 2**  
Сейсмические и акустические сигналы от взрыва блоков на гор. +142 и +166 м

**Fig. 2**  
Seismic and acoustic signals from blasting the blocks at +142 m Level and +166 m Level

<sup>2</sup> Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения»: приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 03.12.2020 г. №494. Режим доступа: <https://base.garant.ru/400142230/> (дата обращения: 03.06.2025).



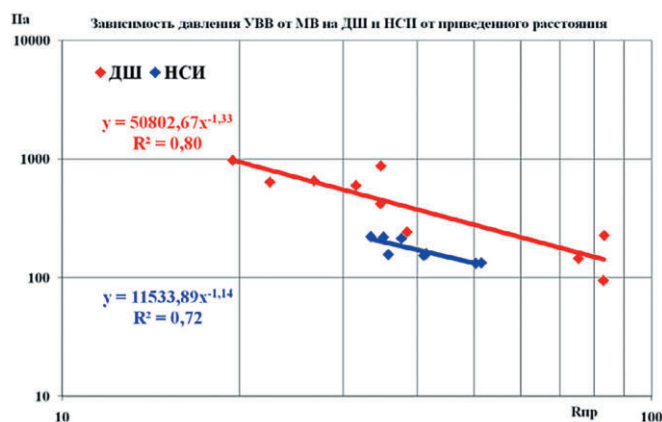
ходит с отставанием от сейсмозрывной волны из-за разных скоростей их распространения. В противоположном направлении максимум сейсмозрывного воздействия приходится на первые ступени с последующим их убыванием в направлении от охраняемого объекта. Следует отметить, что длительность действия УВВ при развитии взрыва на охраняемый объект сопоставима с длительностью СВВ, а при развитии взрыва от охраняемого объекта продолжительность воздействия УВВ определяется первыми ступенями замедления.

Это связано с тем, что при взрыве первых и последующих ступеней газообразные продукты детонации заполняют образующееся по мере расширения взрывной полости поровое пространство. Из-за наличия трещин давление в ней падает и существенно снижается механическое действие взрыва, в связи с чем уменьшается выброс взрывных газов в атмосферу. Во-вторых, при взрывах последующих ступеней происходит взаимодействие УВВ с предыдущими, что приводит к их дополнительному гашению.

Показано, что амплитуды акустических волн зависят от взаимного расположения блока в карьере и охраняемого объекта. С точки зрения снижения действия УВВ наиболее целесообразно инициировать взрывание блоков в направлении от охраняемого объекта. Массовые взрывы, смонтированные детонирующим шнуром, оказывают большее давление УВВ, чем взрывы, смонтированные НСИ. Это вызвано тем, что взрывы с ДШ имеют большую массу ВВ на ступень замедления и короткий интервал замедления между ступенями, что вызывает усиление давления ударной волны. Взрывы с НСИ оказывают намного меньшее давление УВВ. Это связано с меньшей массой ВВ на ступень и с более разнесенными по времени ступенями.

Графики зависимости давления УВВ от приведенного расстояния для массовых взрывов, смонтированных с помощью ДШ и НСИ, представлены на рис. 3.

По экспериментальным данным получены формулы



**Рис. 3**  
 Графики зависимости давления УВВ от приведенного расстояния для массовых взрывов на ДШ и НСИ

**Fig. 3**  
 Dependence plots of the air shock pressure on the reduced distance for large-scale blasting with the detonating cord and non-electric blasting systems

для определения давления УВВ для двух типов монтажа сети. Масса заряда на ступень замедления принята в 3500 кг. Избыточное давление на фронте волны при инициировании зарядов детонирующим шнуром составит:

$$P_{ДШ} = 50803 \left( \frac{\sqrt[3]{Q_{ст(max)}}}{R} \right)^{1,33} = 50803 \left( \frac{\sqrt[3]{3500}}{500} \right)^{1,33} = 487 \text{ Па};$$

– при неэлектрическом инициировании:

$$P_{НСИ} = 11534 \left( \frac{\sqrt[3]{Q_{ст(max)}}}{R} \right)^{1,14} = 11534 \left( \frac{\sqrt[3]{3500}}{500} \right)^{1,14} = 214 \text{ Па}.$$

В равных условиях проведения взрыва давление УВВ при производстве взрыва на НСИ более чем в 2 раза меньше, чем при взрыве на ДШ. Меньшее давление, создаваемое УВВ, позволяет технику в карьере отгонять на меньшее расстояние от взрывающегося блока. Полученные зависимости позволяют на стадии проектирования подобрать сейсмобезопасные параметры массовых взрывов, чтобы обеспечить сохранность техники и сооружений.

По данным П.В. Меньшикова, стекла толщиной 2–3 мм разрушаются при избыточном давлении 600–1800 Па [9]. Согласно данным С.Г. Оника и соавт. предельно допустимое значение избыточного давления на фронте УВВ для остекления составляет 2 кПа [5]. В условиях карьера «Железный» при взрывах на расстояниях от 260 до 1450 м до охраняемого объекта избыточное давление на фронте УВВ падает с 975 до 100 Па и не превышает допустимых значений для остекления.

#### Совместное действие СВВ и УВВ на здания и сооружения г. Ковдора

В последнее время при производстве массовых взрывов в карьере «Железный» жители города стали жаловаться на дискомфортные последствия взрывов.

Характерной особенностью условий разработки Ковдорского месторождения является достаточно высокая доля приповерхностных, большей частью слабых слоёв пород, часто по своим свойствам приближающихся к грунтовым массивам. С поверхности коренные породы перекрыты почти сплошным чехлом четвертичных отложений озерно-ледниковых, флювиогляциальных и аллювиальных фаций, состоящих из валунно-галечного, песчано-гравийного и супесчаного материала. Мощность отложений, на которых расположен город, колеблется от 0,5 до 20–35 м [10].

В настоящее время считается общепризнанным, что при землетрясениях и взрывах в одной очаговой области колебания земной поверхности зависят не от деталей процесса в источнике, а от трассы, по которой пришло возмущение. Источник определяет в основном только энергию колебаний, а строение сейсмограммы определяется локальными особенностями трассы [11].

В рассматриваемых условиях сейсмические волны от массовых взрывов в карьере распространяются через скальный массив и переходят в грунтовые отложения с формированием низкочастотных колебаний с частотами, близкими к собственной частоте здания, что приводит к резонансному усилению колебаний [12–16]. Задача усложняется плохо прогнозируемыми эффектами резонансного усиления сейсмических колебаний рыхлыми приповерхностными грунтами: в зависимости от их типа и мощности пластов колебания одних частотных интервалов могут избирательно усиливаться, а других практически полностью поглощаться. Явление это связано с возбуждением собственных колебаний самого пласта вблизи свободной поверхности в волнах данного типа.

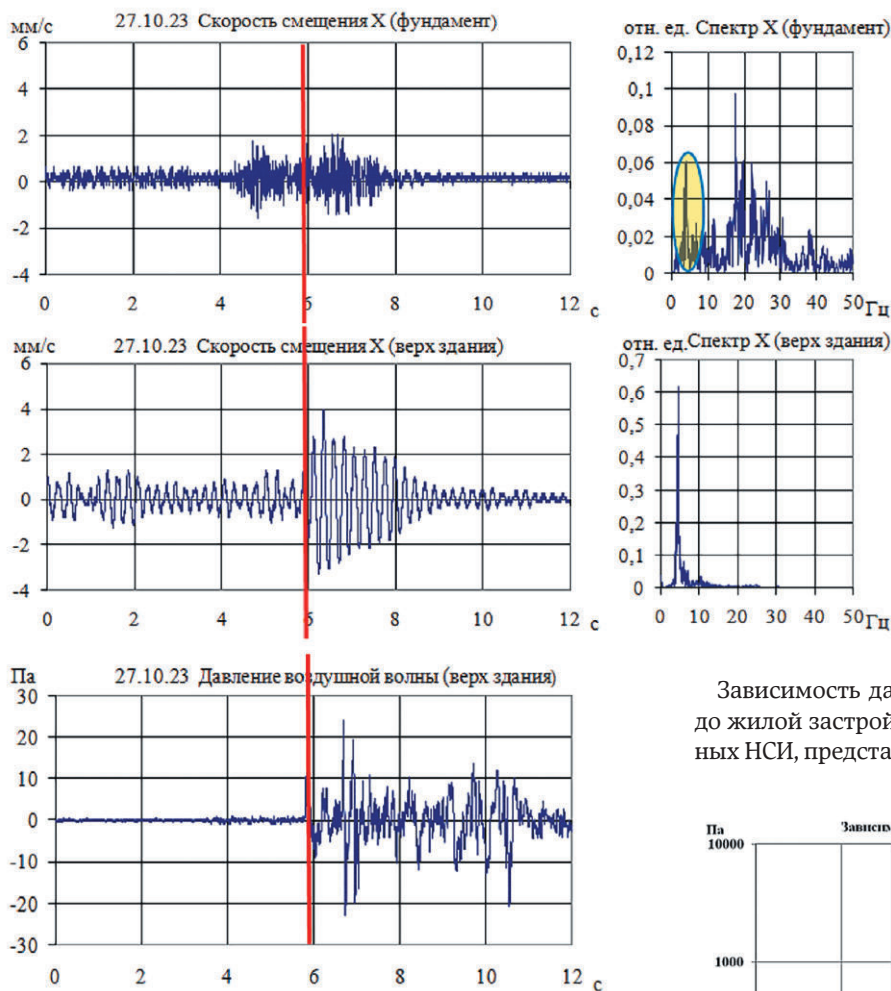


Рис. 4  
Сейсмограммы и спектры колебаний грунта (фундамент), верха здания и время прихода ударной воздушной волны (красная линия)

Fig. 4  
Seismograms and vibration spectra of the foundation, top of the building and time of arrival of the air shock wave (red line)

В качестве примера на рис. 4 приведены сейсмограммы и спектры колебаний грунта (фундамент), верха жилого 5-этажного жилого здания и время прихода УВВ при взрыве блока гор. +94/+106 м с общей массой ВВ 211 т (максимальная нагрузка 2000 кг/ступень).

Одновременно с замерах сейсмозрывной волны в верхней части здания производилось измерение УВВ. Расстояние от взрывающего блока составило 1615 м. На сейсмограммах видно, что в спектре колебаний на грунте присутствуют как более высокочастотные (18–25 Гц), так и низкочастотные колебания с частотой 4 Гц (на рис. 4 выделено желтым овалом), которые и приводят в первоначальный момент времени к резонансному усилению колебаний верхней части здания, что подтверждает вышесказанное о формировании в моренных отложениях низкочастотных колебаний и в возникновении резонанса. Продолжительность первых интенсивных сейсмических колебаний грунта и верха здания ~ 6 с. К этому времени амплитуда скорости смещения грунта у фундамента составляет ~ 0,5 мм/с, верха здания ~ 1,3 мм/с. Спустя 6 с колебания здания резко увеличиваются: амплитуда на грунте возрастает до 2 мм/с; верхней части здания до 4 мм/с. Увеличение почти в 4 раза.

Частота фиксируемых колебаний 4 Гц, что, очевидно, является частотой собственных колебаний здания. Резкое усиление колебаний приурочено по времени к приходу и падению на фасад здания акустических волн. Эти волны, давление которых не превышает 25 Па, раскачивают здание с амплитудой, значительно превышающей амплитуду от сейсмозрывной волны. Кроме увеличения амплитуды колебаний происходит более чем в 1,5 раза увеличение длительности колебаний до 12–15 с, что сопоставимо с землетрясением средней интенсивности. Увеличение длительности колебаний приводит жителей домов к ощущению более сильного воздействия, хотя по всем замерам они не превышают допустимых. Проведенные измерения на других зданиях жилой застройки показали аналогичные результаты.

Зависимость давления УВВ от приведенного расстояния до жилой застройки г. Ковдора, для взрывов, смонтированных НСИ, представлена на рис. 5.

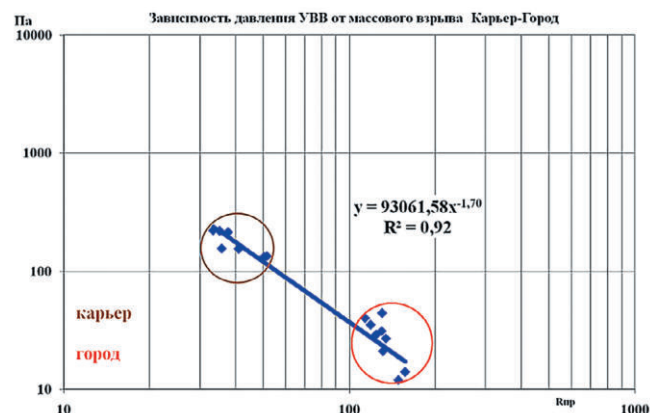


Рис. 5  
Зависимость давления УВВ от приведенного расстояния для массовых взрывов, смонтированных НСИ

Fig. 5  
Dependence of the air shock pressure on the reduced distance for large-scale blasting using a non-electric blasting systems

Для указанных выше условий при взрыве блока гор. +94/+106 м, избыточное давление на фронте волны составит 25 Па, что не превышает допустимого значения избыточного давления на фронте УВВ для остекления согласно Приказу № 494. Тем не менее в условиях жилой застройки действию акустических волн следует уделять большое внимание [17–20]. Допустимая скорость смещения должна уменьшаться на величину раскачки здания или обеспечивать раздельное воздействие указанных типов волн путем уменьшения продолжительности взрыва и взрыванием блоков в направлении от охраняемого объекта.

Для обеспечения сохранности техники и сооружений при проведении взрывных работ необходим постоянный сейсмомониторинг взрывов с оценкой акустического воздействия на охраняемые объекты.

**Закключение**

С постоянным увеличением масштабов и интенсивности горных работ исследования воздействия взрывных технологий на окружающую среду по-прежнему актуальны.

Исследовано влияние типа инициирования взрывной сети и направления развития взрыва на увеличение интенсивности воздействия сейсмозрывных и ударных воздушных волн на охраняемые объекты как в самом карьере (техника), так и за его пределами. Показано, что амплитуды акустических волн зависят от взаимного расположения блока в карьере и охраняемого объекта. С точки зрения снижения действия УВВ наиболее целесообразно инициировать взрывание блоков в направлении от охраняемого объекта. При производстве взрыва, инициированного неэлектрической системой, давление ударной воздушной волны более чем в 2 раза меньше, чем при взрыве с детонирующим шнуром.

Применительно к условиям ведения взрывных работ на руднике «Железный» установлено совместное влияние

сейсмозрывного и ударного воздушного воздействия на здания г. Ковдора. Совместное воздействие низкочастотных сейсмозрывных колебаний, возникающих в грунтах, и ударных воздушных волн на здания приводит к увеличению амплитуды и продолжительности колебаний, что отрицательно влияет на сопротивляемость конструкций разрушению. Допустимая скорость смещения грунта в основании фундамента здания должна уменьшаться на величину раскачки здания или обеспечивать раздельное воздействие сейсмозрывных и ударных воздушных волн путем уменьшения продолжительности взрыва и взрыванием блока в направлении от города.

Полученные экспериментальные зависимости позволяют на стадии проектирования подобрать сейсмобезопасные параметры массовых взрывов, чтобы обеспечить сохранность охраняемых объектов.

**Список литературы / References**

1. Боровиков В.А., Аюрзанайн Б.А. Безопасные зоны по действию ударной воздушной волны. *Безопасность труда в промышленности*. 1979;(5):59–61. Режим доступа: <https://btpnadzor.ru/archive/bezopasnye-zony-po-deystviyu-udarnoy-vozdushnoy-volny> (дата обращения: 17.03.2025).  
Borovikov V.A., Ayurzanayn B.A. Safe zones by action of shock air wave. *Occupational Safety in Industry*. 1979;(5):59–61. (In Russ.) Available at: <https://btpnadzor.ru/archive/bezopasnye-zony-po-deystviyu-udarnoy-vozdushnoy-volny> (accessed: 17.03.2025).
2. Ганопольский М.И., Цейтлин Я.И. К расчету давления на фронте ударной воздушной волны при массовых взрывах скважинных зарядов. *Горный журнал*. 1980;(1):44–46.  
Ganopolskiy M.I., Tseitlin Ya.I. Calculation of pressure at the front of the air shock wave during large-scale blasting of borehole charges. *Gornyi Zhurnal*. 1980;(1):44–46. (In Russ.)
3. Гончаров А.И., Куликов В.И. Акустические волны при массовых взрывах в карьерах. *Физика горения и взрыва*. 2004;40(6):101–106.  
Goncharov A.I., Kulikov V.I. Acoustic waves in bulk blasts in opencasts. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2004;40(6):702–706.
4. Ганопольский М.И. Результаты экспериментальных исследований ударных воздушных волн при взрывах на земной поверхности. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2011;(S2-3):5–37.  
Ganopolskiy M.I. Results of experimental studies of blast shock air waves on earth's surface. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2011;(S2-3):5–37. (In Russ.)
5. Оника С.Г., Войтенко В.С., Халыавкин Ф.Г. Современное состояние методов прогноза сейсмичности взрывов на открытых разработках. *Горная механика и машиностроение*. 2012;(1):28–33. Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/18796> (дата обращения: 17.03.2025).  
Onika S.G., Voitenko V.S., Khalyavkin F.G. Modern methods for forecasting of rock burst seismic at the open minings. *Mining Mechanical Engineering and Machine-Building*. 2012;(1):28–33. (In Russ.) Available at: <https://rep.bntu.by/handle/data/18796> (accessed: 17.03.2025).
6. Козырев С.А., Фокин В.А. Обеспечение сейсмической безопасности зданий и сооружений промплощадки при производстве массовых взрывов. *Горный журнал*. 2014;(5):48–56.  
Kozyrev S.A., Fokin V.A. To calculation of pressure on the front of shock air wave at mass explosions of borehole charges. *Gornyi Zhurnal*. 2014;(5):48–56. (In Russ.)
7. Гриб Н.Н., Терещенко М.В., Гриб Г.В., Пазынич А.Ю. Прогноз сейсмического воздействия взрывов на производственную инфраструктуру. *Горные науки и технологии*. 2017;(1):12–22. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2017-1-12-20>  
Grib N.N., Tereshchenko M.V., Grib G.V., Pazynich A.Y. Forecast of seismic impact of blasting on mining infrastructure. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2017;(1):12–22. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2017-1-12-20>
8. Парамонов Г.П., Артемов В.А., Виноградов Ю.И., Холодилов А.Н. Разработка технологий и мер снижения воздействия сейсмических и ударных воздушных волн на окружающую среду, здания и сооружения при производстве взрывных работ на горных предприятиях. *Записки Горного института*. 2004;158:160–162. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/8820> (дата обращения: 17.03.2025).  
Paramonov G.P., Artemov V.A., Vinogradov Y.I., Kholodilov A.N. Development of technologies and measures to reduce the impact of seismic and shock air waves on the environment, buildings and structures during blasting operations at mining enterprises. *Journal of Mining Institute*. 2004;158:160–162. (In Russ.) Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/8820> (accessed: 17.03.2025).



9. Меньшиков П.В. Определение максимального избыточного давления на фронте ударной воздушной волны для условий взрывных работ на карьере «Восточный» АО «Медвежья гора». *Проблемы недропользования*. 2020;(2):145–152. Режим доступа: <https://trud.igdur.ru/index.php/psu/article/view/356> (дата обращения: 17.03.2025).  
Menshikov P.V. Determination of the maximal excessive pressure on the front of the shock air wave for explosive work conditions at the “Vostochny” career of JSC “Medvezhya gora”. *Problems of Subsoil Use*. 2020;(2):145–152. (In Russ.) Available at: <https://trud.igdur.ru/index.php/psu/article/view/356> (accessed: 17.03.2025).
10. Терновой В.И., Афанасьев Б.В., Сулимов Б.И. *Геология и разведка Ковдорского вермикулито-флогопитового месторождения*. Ленинград: Недра. Ленингр. отд-ние; 1969. 288 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/15564> (дата обращения: 17.03.2025).
11. Григорян С.С. О Проблемах глобальной геомеханики, сейсмологии и сейсмостойкого строительства. *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 1992;(6):4–9.  
Grigoryan S.S. On problems of global geomechanics, seismology and earthquake resistant construction. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1992;(6):4–9. (In Russ.)
12. Штейнберг В.В. Колебания грунта при землетрясениях. Источники и воздействие разрушительных сейсмических колебаний. В кн.: *Вопросы инженерной сейсмологии*. М.: АН СССР. Ин-т физики Земли им. О.Ю. Шмидта; 1990. Вып. 31. С. 47–67.
13. Уломов В.И., Севостьянов В.В., Миндель И.Г., Трифонов Б.А. Оценка сейсмической опасности для высотных зданий в г. Москве. В кн. *Современное высотное строительство*. М.: ГУП ИТЦ Москомархитектуры; 2007. С. 94–100.
14. Ратникова Л.И. *Методы расчета сейсмических волн в тонкослоистых средах*. М.: Наука; 1973. 124 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/18654> (дата обращения: 17.03.2025).
15. Аносов Г.И., Дробиз М.В., Коновалова О.А., Сотников Д.С., Чугаевич В.Я. Оценка сейсмической устойчивости учебного корпуса №3 Российского государственного университета им. И. Канта с применением методики Накамуры. *Вестник Камчатской региональной ассоциации «Учебно-научный центр»*. Серия: Науки о Земле. 2010;(1):223–231.  
Anosov G.I., Drobiz M.V., Konovalova O.A., Sotnikov D.S., Chugaevich V.Y. Evaluation of seismic stability of the educational building 3 of Immanuel Kant Russian state university using the Nakamura method. *Bulletin of Kamchatka Regional Association “Educational-Scientific Center”*. *Earth Sciences*. 2010;(1):223–231. (In Russ.)
16. Исихко Е.С. Резонансные свойства грунтов и зданий, их учет при строительстве. *Buletinul Institutului de Geologie și Seismologie al AȘM*. 2005;(1):12–20. Режим доступа: [https://igs.asm.md/sites/default/files/12\\_0.pdf](https://igs.asm.md/sites/default/files/12_0.pdf) (дата обращения: 17.03.2025).  
Isichko E.S. Resonance properties of soils and buildings, their consideration in construction. *Buletinul Institutului de Geologie și Seismologie al AȘM*. 2005;(1):12–20. (In Russ.) Available at: [https://igs.asm.md/sites/default/files/12\\_0.pdf](https://igs.asm.md/sites/default/files/12_0.pdf) (accessed: 17.03.2025).
17. Grobbelaar M., Molea T., Durrheim R. Measurement of air and ground vibrations produced by explosions situated on the Earth’s surface. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2020;120(9):521–530. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/978/2020>
18. Feher J., Cambal J., Pandula B., Kondela J., Sofranko M., Mudarri T., Buchla I. Research of the technical seismicity due to blasting works in quarries and their impact on the environment and population. *Applied Sciences*. 2021;11(5):2118. <https://doi.org/10.3390/app11052118>
19. Gheorghiosu E., Laszlo R., Kovacs A., Ilici Ș., Mihai S. Acoustic zoning for the safe use of explosives in the open pit. *MATEC Web of Conferences*. 2022;373:00049. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202237300049>
20. Khana M.F.H., Hossaina J., Ahmeda M.T., Monira M.U., Rahmana A., Sweetey T.S. et al. Ground vibration effect evaluation due to blasting operations. *Heliyon*. 2025;11(2):e41759. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41759>

#### **Информация об авторах**

**Козырев Сергей Александрович** – доктор технических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: [s.kozyrev@ksc.ru](mailto:s.kozyrev@ksc.ru)

**Власова Елена Анатольевна** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-7671-9973>; e-mail: [e.vlasova@ksc.ru](mailto:e.vlasova@ksc.ru)

**Усачев Евгений Андреевич** – ведущий технолог, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: [e.usachev@ksc.ru](mailto:e.usachev@ksc.ru)

#### **Информация о статье**

Поступила в редакцию: 01.09.2025

Поступила после рецензирования: 23.10.2025

Принята к публикации: 29.10.2025

#### **Information about the authors**

**Sergey A. Kozyrev** – Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Head of Laboratory, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; e-mail: [s.kozyrev@ksc.ru](mailto:s.kozyrev@ksc.ru)

**Elena A. Vlasova** – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-7671-9973>; e-mail: [e.vlasova@ksc.ru](mailto:e.vlasova@ksc.ru)

**Evgeny A. Usachev** – Leading Technologist, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; e-mail: [e.usachev@ksc.ru](mailto:e.usachev@ksc.ru)

#### **Article info**

Received: 01.09.2025

Revised: 23.10.2025

Accepted: 29.10.2025