

**КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ  
БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ В УСЛОВИЯХ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКИ  
МЕСТОРОЖДЕНИЯ ГИПСА**

ЯКОВЛЕВ Д.В.<sup>1</sup>, СЕВАСТЬЯНОВ Б.Н.<sup>1</sup>, ИСАЕВ Ю.С.<sup>2</sup>, БОНДАРЕВ А.В.<sup>1</sup>,  
КРУЗИН С.Д.,<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ООО «Институт горной геомеханики и геофизики – Межотраслевой научный  
центр ГЕОМЕХ (МНЦ ГЕОМЕХ)», г. Санкт-Петербург

<sup>2</sup> ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс», г. Санкт-Петербург

**Аннотация.** В ходе исследований получены данные по сейсмическому воздействию на устойчивость кровли камер и целиков от буровзрывных работ (БВР), использованные для оптимизации их параметров, с целью обеспечения работы конструктивных элементов при камерно-столбовой системе разработки. Проведен сравнительный анализ скоростей смещений, полученных при размещении сейсмоприемников в ближней (в источнике) и дальней зонах взрыва, с целью прогноза смещений пород в зоне взрыва, при контроле фактических смещений на значительном удалении от взрыва. Приведены результаты комплексных экспериментальных исследований, которые позволили обосновать требования по сейсмобезопасным параметрам БВР в условиях подземной разработки месторождения гипса, положенные в основу локального нормативного документа по безопасному ведению горных работ.

**Ключевые слова:** Сейсмическое действие взрыва, Безопасные параметры БВР, Геологические факторы, Сейсмостанция, Сейсмическая волна, Ближняя зона взрыва, Сравнительный анализ

**COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE SEISMIC IMPACT OF DRILLING  
AND BLASTING OPERATIONS IN UNDERGROUND CONDITIONS**

YAKOVLEV D.V.<sup>1</sup>, SEVASTYANOV B. N.<sup>1</sup>, ISAEV YU.S.<sup>2</sup>, BONDAREV A.V.<sup>1</sup>,  
KRUZIN S.D.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Mining Geomechanics and Geophysics-Intersectoral Research Center  
GEOMECH (MNC GEOMECH), Saint Petersburg

<sup>2</sup> JSC «Scientific Research, Design and Survey Institute «Lenmetrogioprotrans»,  
Saint Petersburg

**Abstract.** In the course of the research, data on the seismic impact on the roof of the chambers and pillars of drilling and blasting operations (BVR) were obtained, used to optimize their parameters, in order to ensure the stability of structural elements in the chamber-pillar system of development. A comparative analysis of the displacement velocities obtained when

placing seismic receivers in the near (at the source) and far explosion zones is carried out in order to predict rock displacements in the explosion zone, while monitoring actual displacements at a significant distance from the explosion. The results of complex experimental studies are presented, which made it possible to justify the requirements for earthquake-safe parameters of the BVR in the conditions of underground development of the gypsum birthplace, which are the basis of the local regulatory document on the safe conduct of mining operations.

**Keywords:** Seismic action of the explosion, Safe parameters of blast-hole, Geological factors, Seismic station, Seismic wave, Near zone of the explosion, Comparative analysis

В разнообразии горно-геологических условий горного массива, механических свойств пород и характера протекающих в нем процессов выделяют следующие модели: линейно-упругая, упруго-пластичная, упруго- и жесткопластическая (в том числе неоднородная), вязкоупругая, раздельно-блочная (зернистая), сыпучая среда и т.д. Установлено, что сейсмическое действие взрыва в напряженных массивах по мере удаления от границы отбойки также проявляется по-разному и зависит от геологических факторов: литологический состав вмещающих пород, обводненность, тектоническая нарушенность величина статических напряжений, и технологических факторов: геометрических размеров, системы разработки, площади подсечки в секции, количества и типа взрывчатых веществ (ВВ) и пр.

При оценке параметров волновых колебаний среды (оценка воздействия БВР) важное значение имеют нагрузки на границе с зарядом, точнее, сразу на границе преломления детонационной волны [1]. При переходе детонационной волны в горный массив (твердый слой) продольная упругая волна распространяется первой (направление колебаний частиц совпадает с направлением распространения волны), далее движется волна объёмного сжатия. Таким образом, область распространения сейсмических колебаний формируется на удалении от источника равном 120 – 150 радиусов заряда и определяется общей энергией заряда и свойствами среды [2]. В рамках экспериментальных работ сейсмические колебания следовало наблюдать не ближе 5 – 6 метров (диаметр шпура 42 мм), что и было обеспечено выбором места заложения шпуров для сейсмоприемников в ближней (5 -10 метров) и дальней зонах (более 75 метров).

В пределах ближней зоны взрыва происходит нарушение структуры массива и плотно сомкнутые естественные трещины раскрываются, различного рода поверхности ослабления, имевшие первоначально некоторую связность, утрачивают ее и происходит смещение структурных блоков относительно друг друга. В дальней зоне подобная картина не наблюдается. Это связано с тем, что энергии взрыва недостаточно для раскрытия природных трещин и образования трещин давления. Характер затухания сейсмической волны определяется природной трещиноватостью и нарушенностью горного массива.

Накопленный практический опыт [3] по оценке воздействия взрывов на кровлю камер и междукамерные целики в ближней и дальней зонах свидетельствует о существенном влиянии структуры и состава гипсовых пластов на устойчивость конструктивных элементов системы разработки и параметры зон разрушения в окрестности зарядов ВВ. Например, при оценке сейсмического воздействия взрывов на кровлю камеры, при варианте ведения взрывных работ одновременно в нескольких

смежных камерах, следует учитывать интерференцию колебаний релеевской и продольной отраженной волн.

Помимо кровли камер, взрывы зарядов ВВ в забое камеры оказывают сейсмическое действие на междукамерные целики (стенки обрабатываемых камер). Краевая часть междукамерных целиков подвергается разрушению в виде радиальных и кольцевых трещин. Под сейсмическим воздействием взрывов на обнажениях целиков при слабой связи заколов образуются вывалы.

### **Основная часть и анализ результатов.**

В 2020 г. в условиях рудника КНАУФ-Гипс Новомосковск проведены комплексные экспериментальные работы с целью оптимизации параметров буровзрывных работ для обеспечения устойчивости конструктивных элементов при камерно-столбовой системе разработки (кровля камер и целиков). Экспериментальные работы были проведены по усовершенствованной методике (в сравнении с аналогичными работами прошлых лет), включающей современные методы и технические средства измерений.

В ходе эксперимента было зарегистрировано семь плановых взрывов на четырех наблюдательных станциях, оборудованных в действующих горных выработках рудника.

Комплексование данных эксперимента проходило по следующим направлениям:

1) Маркшейдерская съемка контура камеры, где проводился эксперимент. Фиксация маркшейдерскими методами (съемка) производится с целью выявления образования заколов и вывалов из стенок камеры. Оценка производится путем сравнения текущих и допустимых параметров [4], [5], [6].

Съемка контура камер маркшейдерским методом проводилась двумя способами. В первом способе контур камер снимали при помощи полотна маркшейдерской рулетки и лазерной рулетки. При съемке лазерной рулеткой, измеряли расстояния от полотна маркшейдерской рулетки до стенок камеры с шагом 1 м. Второй способ съемки – тахеометрический, определяет изменение контура камеры по длине и высоте (съемка выполнялась при помощи электронного тахеометра SOKKIA). Результаты показали, что величины отклонений не превышали допустимых.

2) Визуальные наблюдения (в режиме фото-, видеофиксации) проводили с целью определения фактов заколообразования и толщины вывалов из стенок камеры. Параметры трещин от взрыва являются значимым дополнением при определяемой геофизическим методом критической скорости колебания частиц породы в кровле камеры и в междукамерных целиках для определения значения приведенной эффективной массы заряда ВВ ( $\rho_{эф.}$ ).

Визуальные наблюдения параметров зон разрушения пород в окрестности заряда ВВ после проведения взрыва проводились двумя способами. В первом способе параметры разрушения пород определяли по данным измерения размеров зоны дробления, зоны кольцевых трещин и зоны радиальных трещин вокруг «стаканов» в забое камеры. Вторым способом визуальных наблюдений использовался для определения параметров зоны разрушения пород в краевой части обнаженного междукамерного целика в обрабатываемой камере. Обработка фото стенок шпуров заключалась в подсчете числа трещин в стенках шпура, расстоянием между ними и общей ширины зоны разрушения краевой части междукамерного целика.

Наблюдения были выполнены с помощью видеэндоскопа PRO фирмы WURTH. Видеосъёмка проводилась до начала эксперимента и далее после каждого цикла взрывания. Пример фотофиксации трещин приведен на рис. 1.



Рис.1. – Визуальный способ определения зон разрушения, измерения размеров зоны дробления, зоны кольцевых трещин и зоны радиальных трещин вокруг «стаканов» в забое камеры

3) Оценка сейсмического воздействия БВР. Проверка паспортов БВР (действующих и экспериментальных) на сейсмобезопасность была произведена двумя способами:

– расчетный. Оценка сейсмического воздействия БВР осуществляется в зависимости от числа серий замедления по критериям, согласно требованиям «Указаний...» [4];

– эмпирический. Оценка сейсмического воздействия БВР осуществляется по фактическим значениям скорости колебаний, полученным при раздельном взрывании зарядов ВВ в сериях замедления.

В наблюдениях использовался сейсмический канал, представляющий собой совокупность последовательно соединенных аппаратов, через которые проходят сигналы от воспринятых в точке наблюдений механических колебаний вплоть до их окончательного представления в аналоговой/цифровой форме.

Пример сейсмограммы экспериментального взрыва, зарегистрированный сейсмоприемником ГЕОМЕХ приведен на рис. 2.

В качестве основного, при анализе и принятии решений, использовался метод регистрации сигналов в ближней зоне взрыва – 5 – 10 метров от места ведения БВР. В этом методе (условно назовем его - метод ГЕОМЕХ) в качестве сейсмоприемника использовался трехкомпонентный (три однокомпонентных сейсмоприемника). Сейсмоприемник размещался в непосредственной близости к месту ведения БВР – два однокомпонентных сейсмоприемника размещаются в скважине в кровле, один – в борту камеры (компонента Z). Глубина установки сейсмоприемника в шпуре – 1,0 м Сейсмоприемник сконструирован таким образом, чтобы обеспечить взаимную перпендикулярность компонента, при этом для его размещения нужен только один шпур (в кровле компонент X, Y). Второй шпур бурится в борт камеры и обеспечивает установку третьего сейсмоприемника (компонента Z) перпендикулярно осям двух других. Тем самым обеспечивается трёхкомпонентный прием сигналов.

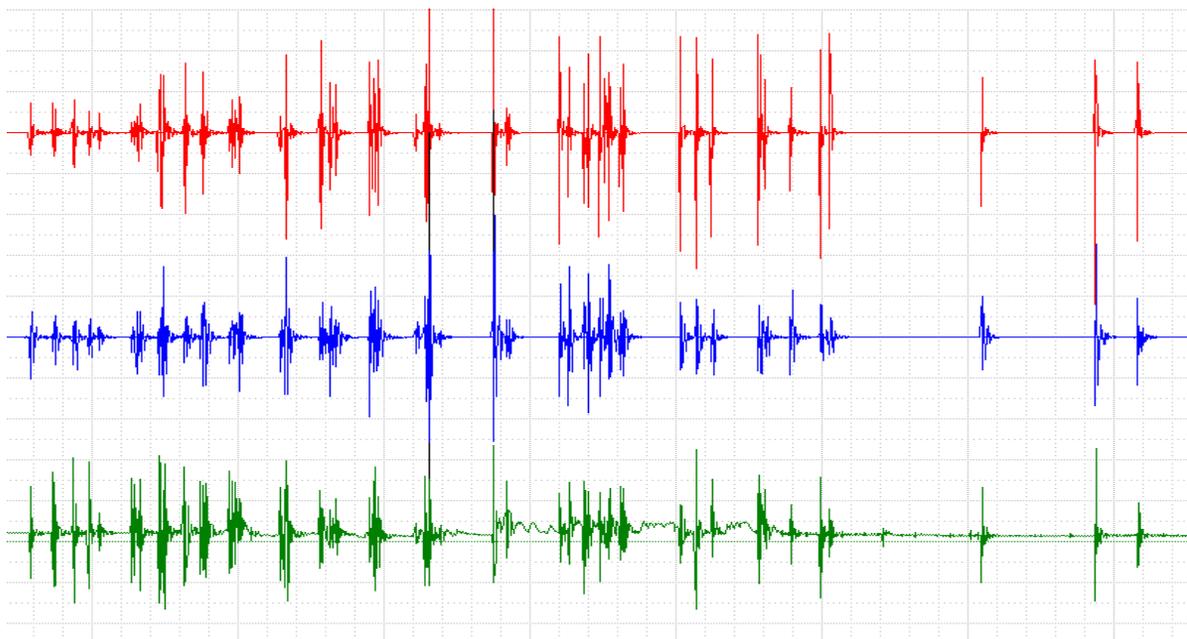


Рис.2. – Сейсмограмма экспериментального взрыва (число шпуров – 99, число серий замедлений – 25 (50 – 7200 мс), вес ВВ – 560 кг)

Сейсмический канал включает в себя регистратор (промышленный компьютер с ПО «PowerGraph»), аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и сейсмоприемник (использовался малогабаритный сейсмоприёмник серийного производства марки С1-30) (см. рис. 3). Взаимосвязь между колебаниями механической системы и электрическими процессами выражается через коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом электрической связи (КЭС), который равен величине электродвижущей силы (ЭДС) в вольтах при скорости перемещения инертной массы сейсмоприёмника в 1 см/с.

Сейсмический канал, используется для измерения скорости колебания частиц породы (производной смещения) в диапазоне частот 20-1200 Гц величиной до 80 см/с и смещением породы до 1,5 мм.

Оценка сейсмического действия взрывов на краевую зону междукамерных целиков показала, что характер распределения скорости колебаний в диапазоне значений  $\rho = 0,084-0,347 \text{ кг}^{1/3}/\text{м}$  при первом и втором циклах отбойки забоя камеры №3 при сравнительно широком диапазоне значений приведённой массы заряда ВВ скорость колебаний изменяется от 6 до 16 см/с.

Минимальные значения скорости колебаний в целике для всех экспериментальных взрывов составили  $V=3 \text{ см/с}$ , максимальное значение –  $V=38 \text{ см/с}$ , первому значению скорости колебаний соответствует  $\rho = 0,15 \text{ кг}^{1/3}/\text{м}$ , а второму –  $0,42 \text{ кг}^{1/3}/\text{м}$ .

Минимальное значение скорости колебаний является критическим для заколов. По данным наблюдений на Новомосковском руднике, а также на ряде рудных месторождений, заколовшиеся участки целиков под влиянием скорости колебаний  $V = 3 \text{ см/с}$  обрушаются в выработанное пространство. Максимальное значение скорости колебаний, полученное по данным обработки сейсмограмм экспериментальных взрывов

меньше критической скорости колебаний для пластов гипса в горизонтальном направлении. Критическое значение скорости колебаний в направлении простираения гипсовых пластов составляет  $V_{кр} = 49$  см/с.



Рис.3. – Сейсмоприемник (ГЕОМЕХ): ПО «PowerGraph», АЦП и сейсмоприемник С1-30 в клиновом устройстве, используемые в ходе экспериментальных работ

Для кровли важным фактором безопасности отбойки гипса является сохранение сплошности нижней части несущих пластов III и «а» потолочины камер. На основании полученных результатов экспериментальных работ предложены критерии, при которых будут обеспечены безопасные условия отработки месторождения.

В текущих условиях экспериментальных исследований впервые использовался как вспомогательный метод оценки сейсмического воздействия взрыва с помощью сейсмостанции Апатит-В (см. рис. 4). Вспомогательный метод реализовывался путем размещения сейсмоприемника Апатит-В [7] в выработках общешахтного назначения на безопасном удалении от места ведения взрывных работ, в смежных месту проведения взрывных работ выработках (сейсмостанция располагалась в дальней зоне взрыва – 75 и более метров от места ведения БВР).



Рис.4. – Сейсмостанция Апатит–В

Сейсмическая станция Апатит-В (частотный диапазон по скорости от 30 сек до 200 Гц) обеспечивает сбор и обработку данных, их накопление, хранение и передачу данных по каналам связи.

Задачей текущего анализа данных скоростей смещений, полученных двумя способами в ближней и дальней зонах, было выявить корреляционные связи с целью последующего математического перехода из одной зоны в другую. Когда фиксация фактических скоростей смещения производится в дальней зоне и позволяет прогнозировать величину скоростей смещений в ближней зоне (источнике БВР).

Был рассмотрен вариант использования закона геометрического подобия. Прямое решение задачи расчета корреляционных связей двух используемых методов с помощью закона геометрического подобия не представляется возможным. По-видимому, из-за нелинейного характера затухания сейсмической волны от взрыва, отраженных волн и прочих осложняющих факторов.

В ходе исследований сейсмоприемники фиксировали один и тот же сигнал сейсмической волны техногенного характера (БВР), но находились на разном удалении от источника.

В сравнительном анализе данных скоростей смещений был рассмотрен вариант использования коэффициента затухания скорости смещения в зависимости от удаления от источника взрыва.

Затухание волны на расстоянии  $R$  [2] может характеризоваться выражением:

$$\Delta V_1 = \Delta V_2 * k_{зат.}$$

где:  $\Delta V_1$  – скорость смещения в источнике  $R_1$  (метод 1), см/с;

$\Delta V_2$  – скорость смещения на удалении  $R_2$  (метод 2), см/с;

$k_{зат.}$  – коэффициент затухания.

Коэффициент затухания был получен на основании фактических данных, полученных экспериментальными исследованиями в условиях месторождения гипса. Считаем правомерным, с определенной степенью условности, между данными полученными указанными методами поставить знак равенства. Предложено было считать, что величина скорости смещения, полученная в ближней зоне взрыва R1 (метод ГЕОМEX) затухает до величин скорости смещения, полученных на удалении R2 (метод Апатит-В). При этом массив горных пород не имел значимых геологических нарушений или замещений пород, позволивших бы значимо повлиять на величину смещений в дальней зоне, что в последствии было подтверждено горными работами. В расчет был введен коэффициент затухания – величина изменения скорости смещения на 1 метре удаления от источника взрыва в виде:

$$k_{зат.} = \frac{\Delta V}{\Delta R} = \frac{(V_{1cp.} - V_{2cp.})}{(R_{2cp.} - R_{1cp.})} \frac{см}{с} / м$$

где:  $V_{1cp.}$ ,  $V_{2cp.}$  - средняя скорость смещения (между двумя взрывами), соответственно для метода ГЕОМEX и Апатит-В, см/с;

$R_{1cp.}$ ,  $R_{2cp.}$  - среднее расстояние от источника до приемника (два БВР), соответственно для метода ГЕОМEX и Апатит-В, м;

Коэффициент затухания был получен для двух вариантов расчета – по средним значениям и с учетом данных коэффициента достоверности аппроксимации (характеризует точность с которой теоретическое распределение описывает реальное (на основании трендов)).

### **Выводы**

Совместное рассмотрение результатов экспериментальных исследований полученных с помощью указанных геофизических методов, скоростей смещений, геологии участков проведения экспериментов дало основание для формулировки ряда предположений и выводов.

1) Получение эмпирической величины прогнозных смещений может быть достигнуто только исследовательским путем по фактически замеренным смещениям с низкой статистической погрешностью. Такая погрешность может быть достигнута путем набора статистики измерений достаточным для установления работоспособных коэффициентов затухания. Статистику следует набирать для различных, с высокой степенью изученности, горно-геологических и горнотехнических условий.

2) В ближней зоне в затухании сейсмической волны взрыва ключевую роль имеет расстояние. На 5-ти метрах затухание составляет 51 – 58 %.

3) В дальней зоне затухание сейсмической волны определяется геологическим строением горного массива - наличием дизъюнктивных или пликативных нарушений, включений прочных или обводненных пород, прочих аномалий, которые существенно влияют на распространение сейсмических волн.

4) В ближней зоне преобладают вертикальные смещения, т.е. S-волна. В дальней зоне – горизонтальные смещения, т.е. P-волна.

5) Получена прогнозная скорость затухания смещения для текущих условий эксперимента равная  $k_{зат.}=0,573$  см/с на 1 метре удаления от источника.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Садовский М.А. Избранные труды: Геофизика и физика взрыва. – М.: Наука, 2004 г. – 440 с. – ISBN 5-02-032960-6

2. Кутузов Б.Н. Методы ведения взрывных работ. Ч.1. Разрушение горных пород взрывом. – М. Горная книга. 2009 г. – 471 с. ISBN 978-5-7418-0590-9.

3. Севастьянов Б.Н., Юревич Г.Г., Беляков В.Д. Охрана горных выработок от воздействия взрывов. М., изд-во «Недра», 1972, 137с.

4. Указания по охране зданий и сооружений от вредного влияния подземных горных разработок и по охране рудника от затопления при разработке Новомосковского месторождения гипса, ООО «МНЦ ГЕОМЕХ», СПб, 2020.

5. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при взрывных работах», утверждённых приказом Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору №605 от 16.12.2013 г.

6. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» (с изменениями на 21 ноября 2018 года) (редакция, действующая с 1 января 2020 года).

7. Сейсмостанция АПАТИТ-В (производитель DSYS). URL: <https://dsys.ru/shop/po-kategorijam/seismicheskoe-oborudovanie/velosimetry/apatit-v-so-vstroenym-velosimetrom.html> (дата обращения: 21.09.2021 г.).