

УДК 622.235

**Зуев Павел Игоревич**

научный сотрудник,  
Институт горного дела УрО РАН,  
620075, г. Екатеринбург,  
ул. Мамина-Сибиряка, 58  
e-mail: [zuev@igduran.ru](mailto:zuev@igduran.ru)

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ  
ВЗРЫВОВ НА ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ  
ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ\****Аннотация:*

*Цель работы – уточнение и контроль уровня влияния подземных технологических взрывов на здания и сооружения с целью обеспечения безопасности промышленных и гражданских объектов. Исследование сейсмического эффекта проводится на исторически подработанной территории заводского типа. Контроль воздействия взрывов осуществляется с помощью программно-аппаратного комплекса, созданного на основе геофизического оборудования. Комплекс регистрирует параметры сейсмических волн, далее производится их интерпретация и цифровая обработка.*

*Даны краткие сведения о месторождении, разрабатываемом шахтой, и истории его развития. Описаны причины актуализации проведения повторных исследований влияния взрывных работ на здания и сооружения. Представлены экспериментальные результаты, полученные при регистрации сейсмического эффекта от технологических взрывов на железорудной шахте «Магнетитовая». Приведены расчетные значения и сравнения их с действующими допусками. Сделаны выводы о количественных размерах воздействия на исследуемые объекты. Описана методика проведения сейсмических измерений и последующая обработка полученных данных*

*Ключевые слова:* взрыв, сейсмический, скорость, смещение, волна, амплитуда, здание.

DOI: 10.25635/2313-1586.2023.01.078

**Zuev Pavel I.**

Researcher,  
Institute of Mining, UralBranch of RAS,  
620075 Ekaterinburg,  
58 Mamina-Sibiryaka Str.  
e-mail: [zuev@igduran.ru](mailto:zuev@igduran.ru)

**RESEARCH OF THE EXPLOSIONS  
EFFECTS ON BUILDINGS  
AND STRUCTURES DURING  
UNDERGROUND MINING***Abstract:*

*The purpose of this work is to control the level of the impact of technological explosions on buildings and structures in order to ensure the safety of industrial and civil facilities. The research of the seismic effect is conducted on the historically undermined territory of factory type. Control of the impact of explosions is carried out using a software and hardware complex created on the basis of geophysical equipment. The complex registers the parameters of the seismic wave, then their digital processing is performed.*

*The article provides brief information about the deposit being developed by the mine and the history of its development. The reasons for updating the repeated studies of the impact of drilling and blasting operations on buildings and structures are described. Experimental results obtained during registration of the seismic effect from technological explosions at the "Magnetitovaya" iron ore mine are presented. The calculated values and their comparison with the current tolerances are given. Conclusions are made about the size of the impact on the objects under study. A measurement technique and subsequent processing of the data obtained are described.*

*Key words:* explosion, seismic, velocity, displacement, wave, amplitude, building.

**Введение**

На Урале, где ряд месторождений обрабатывается с начала XVIII века, исторически сформировались территории заводского типа, где жилые и другие социально значимые объекты располагаются в непосредственной близости от горнодобывающих предприятий. Особенно из таких территорий выделяется г. Нижний Тагил, где жилые микрорайоны переплетены с промышленными. Рассматриваемым объектом вблизи жилого микрорайона явилась железорудная шахта «Магнетитовая». Так как извлечение руды ведется с помощью взрывных работ как под землей, так и на поверхности, остро встает вопрос о сейсмической безопасности объектов промышленной и социальной инфраструктуры от технологических взрывов.

\* Исследования выполнены в рамках Госзадания No075-00412-22 ПР, тема 3 (2022-2024), (FUWE-2022-0005), рег. No1021062010531-8-1.5.1

Железорудное месторождение «Высокогорское», разрабатываемое комбинированным способом, в том числе шахтой «Магнетитовая», упоминавшееся еще в конце 17 века, является старейшим и крупнейшим месторождением на Урале. Промышленная же его разработка началась в 1721 г. В 1725 г. был построен Нижнетагильский чугуноплавильный и железоделательный завод, на котором в этом же году была пущена крупнейшая в Европе на то время доменная печь [1].

Добываемый на месторождении минерал магнетит – природный оксид железа [2] – не содержал вредных примесей, и поэтому металл, выплавляемый из него, отличался высоким качеством, также примесь марганца и меди улучшала свойства металла: они являлись природнолегирующими компонентами.

До 1918 г. месторождение по большей части разрабатывалось открытым способом. Шахту «Магнетитовая» начали проходить в 1944 г. На промплощадке шахты располагаются сооружения промышленной инфраструктуры: административно-бытовые комбинаты, подъемные машины, компрессорная, шахтный вентилятор. Для каждого из вышеуказанных объектов имеются определенные федеральными органами допустимые скорости смещения и амплитуды этих смещений. Определение скоростей смещения и амплитуды этих смещений ведется с 60-х годов XX века.

Как известно, извлечение руды ведется с помощью буровзрывной технологии путем производства регулярных технологических и массовых взрывов как под землей, так и в бортах карьера, то есть на поверхности. Для объектов, подлежащих охране от вредного сейсмического влияния взрывов, разработаны и внедрены рекомендации по обеспечению безопасности и ослаблению этого влияния до нормативных значений и ниже, для панельных зданий нормативное значение смещения не более 1,5 см/с, для кирпичных – не более 2 см/с. Данные рекомендации не препятствовали застройке, поэтому в непосредственной близости от разрабатываемого участка месторождения были построены жилые микрорайоны с многоэтажными жилыми домами и зданиями сопутствующей социальной инфраструктуры. На территории промплощадки также были обследованы здания и сооружения, подлежащие охране, среди них – административно-бытовые комбинаты, копры шахты и прочие. Для каждого учтенного объекта были разработаны методические рекомендации.

В наши дни вновь стало актуальным проведение исследований сейсмического эффекта, негативно влияющего на конструкции зданий и сооружений, что обусловлено целым рядом факторов:

- все чаще в сфере недропользования стали применяться научно-обоснованные требования в рамках экологической безопасности ведения взрывных работ, вследствие чего сейсмическое воздействие промышленных взрывов стало привлекать внимание администрации г. Нижний Тагил и общественных организаций;

- изменились условия разработки месторождения подземным способом: нижних горизонтов стало больше, что повлекло за собой смену местоположения очага взрыва, изменились физические свойства пород в выработках, что увеличило количество линий наименьшего сопротивления, и поэтому возникла необходимость использования более мощных зарядов;

- изменились горно-геологические условия, причем не только в месте отработки, но и по пути распространения сейсмических волн, изменились геоморфологические особенности руд, а также элементы их залегания;

- в свете установившихся рыночных отношений применение ранее повсеместно используемых взрывчатых материалов стало нерентабельным;

- появились новые взрывчатые материалы, с более современными физико-химическими свойствами, поэтому взрывы возбуждали сейсмические волны с амплитудами намного большими, чем ранее, вибрация стала ощущаться гораздо сильнее в зданиях и просто на поверхности;

– в не меньшей степени перемены коснулись и процессов зарядки скважин, так как использование новых взрывчатых материалов повлекло за собой изменения технологии зарядки и соответствующих механизмов и приспособлений.

### *Методика*

Для получения полной и достоверной информации о производимом промышленными взрывами сейсмическом эффекте в первую очередь необходимо сделать правильный выбор на объекте точек регистрации. Так, например, при регистрации на жилом доме в непосредственной близости от эпицентра взрыва, на котором наблюдается вертикальная трещина, сейсмоприемники устанавливались относительно предполагаемой зоны разлома – до зоны разлома и после, если смотреть по направлению распространения сейсмических волн. На каждом из пунктов приема регистрировались все 3 компоненты колебаний (амплитуда, периоды собственных и вынужденных колебаний зданий) при помощи трехкомпонентных сейсмоприемников GS-20DX [3].

При регистрации на многоэтажном здании логичным является выбор точек регистрации на каждом из этажей одна над другой. Также для сравнительного анализа необходима установка приборов на грунте вблизи обследуемого здания. Для осуществления наблюдений на грунте сейсмоприемники устанавливались группами по 3 прибора: который ориентировался по составляющей  $X$  – с его помощью регистрировались колебания вдоль сейсмического луча, один для регистрации колебаний поперек сейсмического луча –  $Y$  и один для регистрации вертикальной составляющей колебаний –  $Z$ . При регистрации в зданиях приборы ориентировались вдоль направлений главных осей зданий. При этом составляющая  $X$  соответствовала продольным осям зданий. При установке на грунте вблизи здания в ориентации приборов для удобства приоритет обычно имеют оси здания, а не сейсмического луча [4].

На результат регистрации оказывает влияние множество одновременно действующих факторов. С целью минимизации влияния переменных факторов при исследовании соблюдался ряд условий. Внутри зданий приборы должны быть установлены на ровную твердую горизонтальную поверхность в соответствии с заданными направлениями осей регистрации. При установке на грунте сейсмоприемники устанавливаются на ровную плотную и однородную поверхность. Все приборы и соединительные провода должны размещаться в условиях, исключающих внешнее влияние на процесс регистрации, такое как ветер, дождь, случайные прохожие и т.д. [5]. Измерительная аппаратура должна быть заземлена, чтобы избежать промышленных помех (например, самой вероятной помехой является помеха от электросетей с частотой 50 Гц). После расстановки всех необходимых датчиков измерительная система запускается на регистрацию взрыва. Регистрация происходит в автоматическом режиме.

Обработка цифровых записей проводилась следующим образом [6]. Так как возможности используемой измерительной системы позволяют производить регистрацию практически неограниченной длительности, для надежности старт записи данных производился за некоторое время до назначенного момента взрыва. Следовательно, первым шагом в обработке являлось выделение из всей длины сейсмограммы только участков, несущих полезную информацию.

Далее каждый канал записи рассматривался отдельно. На втором шаге обработки необходимо было отфильтровать полученный сигнал. Чтобы получить частотный спектр сигнала, используется быстрое преобразование Фурье (БПФ) [7]. С частотного спектра снимается значение преобладающей частоты, которое затем используется в расчетах. Затем производится удаление сигнала с частотой выше некоторой заданной – чаще всего, выше 20 Гц. Так как с увеличением глубины возрастает преобладающая частота, значение фильтруемой частоты каждый раз выбирается индивидуально. После проведенной фильтрации третьим этапом обработки является непосредственное считывание значения амплитуды отклонения рабочего элемента сейсмоприемника [8]. Ам-

плитуда отклонения сигнала измерялась как разность между соседними минимумом и максимумом колебаний. Для дальнейших расчетов использовали величину максимальной амплитуды отклонения [9].

Максимальная скорость смещения в точке регистрации рассчитывалась следующим образом:

$$V = \frac{A}{K \times 100}, 10^{-2} \text{ см/с}, \quad (1)$$

где  $A$  – максимальная амплитуда отклонения;  $K$  – коэффициент преобразования.

Коэффициент преобразования  $K$  зависит от типа сейсмоприемника и берется из паспортных данных либо определяется экспериментально путем сравнения с эталонным прибором.

Максимальное смещение в точке регистрации определялось по следующей формуле:

$$S = \frac{V}{2\pi f}, \text{ мкм}, \quad (2)$$

где  $f$  – преобладающая частота.

В случае, когда регистрация на одной точке проводится по трем компонентам поля – по направлениям  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ , суммарные величины максимальной скорости смещения и смещения определяются по следующим известным формулам:

$$V_{\Sigma} = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}; \quad (3)$$

$$S_{\Sigma} = \sqrt{S_x^2 + S_y^2 + S_z^2}. \quad (4)$$

При значительном удалении точек регистрации от источника колебаний дифференциация ступеней взрыва во времени в большинстве случаев не является возможной. Поэтому максимальные значения амплитуды на каждом из каналов трехкомпонентного приемника могут быть зарегистрированы и затем взяты для расчетов в разные моменты времени. В приведенной выше формуле для определения суммарных величин скорости и смещения используются максимальные значения, и результат, соответственно, также оказывается максимально возможным. В действительности же одномоментные суммарные значения скорости смещения и смещения оказываются ниже, чем рассчитанные.

#### *Результаты и обсуждение*

Сейсмический мониторинг был проведен в 3 этапа, каждый этап примерно через месяц после предыдущего.

При регистрации взрыва на первом этапе у жилого пятиэтажного дома (объект № 1) было рассчитано, что значения скоростей смещения лежат в диапазоне 0,062 - 0,413 см/с поканально или 0,148 – 0,590 см/с для суммарных значений по трем компонентам.

На втором этапе при регистрации в подъезде дома (объект № 1) значения лежат в пределах 0,062 – 0,239 см/с поканально или 0,253 – 0,312 см/с для суммарных значений по трем компонентам. При регистрации вблизи жилого дома (объект № 2) значения скоростей смещения несколько выше в связи с тем, что данный объект находится ближе к эпицентру взрыва. Значения для отдельных каналов находятся в пределах 0,051 - 0,758 см/с. Трехкомпонентные значения лежат в пределах 0,164 – 0,946 см/с.

На третьем этапе регистрации на грунте у жилого дома (объект № 1) получены следующие результаты. Поканально – 0,134 – 0,511 см/с. Суммарные по трем компонентам – 0,271 – 0,612 см/с.

Таким образом, видно, что для объекта № 1 (панельное здание) полученные значения составляют не более 41 % от нормативных значений, указанных ранее, а для объекта № 2 (кирпичное здание) – не более 48 %.

Три рассмотренных технологических взрыва регистрировались в трех различных точках. Взрывы на первом и третьем этапах были зарегистрированы вблизи объекта № 1. Взрыв на втором этапе был зарегистрирован вблизи объекта № 2 и поэтажно в одном из подъездов объекта № 1. Полученные скоростные значения не превышают нормативных для данных типов зданий, параметры взрывания и характеристики объектов указаны в итоговой табл. 1.

Таблица 1

Сводная таблица параметров взрывания

№ этапа	Наименование выемочной единицы	Горизонт	Кол-во вееров, скважин	Масса заряда, кг	Замедления по веерам или рядам скважин, мс	Точки регистрации
1	Блок 21, секция 4, панель 1	-518 м	3 веера	2896	0; 25; 50; 75; 150; 300; 500	Вблизи объекта 1 (панельное здание)
	Блок 21, секция 1, панель 1 (отр. щель)	-524 м -580 м	6 скв. 2 ряда	2856	0; 50; 100	
	Кам. 1а	-438 м -408 м	7 вееров	8929	0; 300	
2	Блок 21, секция 1, панель 1	-524 м	3 веера	2008	0; 50; 100	Подъезд №5 объекта 1 Вблизи объекта 2 (кирпичное здание)
	УЗР кам. 7-1 (отр. щель)	-438 м	9 скв. 3 ряда	2960	0; 125	
	Блок 4	-370 м -438 м	2 веера	10999	0; 500; 1000	
3	Блок 21, секция 4, панель 1	-518 м -450 м	3 веера	9608	0; 100; 200	Вблизи объекта 1 (панельное здание)
	Блок 21, секция 1, панель 1	-524 м -580 м	3 веера	19296	0; 50; 175	

### Заключение

На основе выполненных замеров можно сделать вывод, что в настоящее время производство технологических взрывов в шахте «Магнетитовая» с соблюдением всех установленных норм не оказывает опасного воздействия на здания г. Нижний Тагил, расположенные на относительно небольших расстояниях от шахты «Магнетитовая».

Максимальные скорости смещения, полученные при регистрации сейсмического эффекта от трех технологических взрывов [10], не превышают 40 – 50 % от современных допустимых значений.

Используемый модифицированный программно-аппаратный измерительный комплекс, с помощью которого выполнена регистрация практически всех взрывов, а также оперативно получены все приводимые в данной статье экспериментальные результаты, вполне соответствует своему назначению.

### Список литературы

1. Kolchina M., Konovalov V. and Kolchina N., 2019. Analyzing the state of mining towns in the Ural region. *E3S Web Conf.* Vol. 135, No. 04015, DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913504015>.
2. Dresco P., Zaitsev V., Gambino R. and Chu B., 1999. Preparation and Properties of

- Magnetite and Polymer Magnetite Nanoparticles. *Langmuir*. Vol. 15, No. 6, pp. 1945 – 1951.
3. Denisenko N., Gafarov R., 2018. Analysis of Geophone Types and Grouping Parameters Tests. *European Association of Geoscientists & Engineers. Geomodel*, pp. 1 – 5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201802311>.
  4. Vedernikov A., Zuev P., Grigoriev D., 2020. Geophysical surveys of rock mass status of iron ore deposit with combined deep – opencast mining zone. *E3S Web Conf*. Vol. 177, No. 02006. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017702006>.
  5. Shih – Chao Wei and Ko – Fei Liu, 2020. Automatic debris flow detection using geophones. *Landslides*. Vol.17, pp. 349 – 359. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01258-9>.
  6. Yue Hou, Rui Jiao, Hongyu Yu, 2020. MEMS based geophones and seismometers. *Sensors and Actuators A: Physical*. Vol. 318, No. 11249. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112498>.
  7. Morioka H., Kumagai H., Maeda T., 2017. Theoretical basis of the amplitude source location method for volcano-seismic signals. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. Vol. 122, No. 8, pp. 6538 – 6551. DOI: <https://doi.org/10.1002/2017JB013997>.
  8. K. Ward and Fan-Chi Lin, 2017. On the Viability of Using Autonomous Three-Component Nodal Geophones to Calculate Teleseismic Ps Receiver Functions with an Application to Old Faithful, Yellowstone. *Seismological Research Letters*. Vol. 88, No. 5, pp. 1268 – 1278. DOI: <https://doi.org/10.1785/0220170051>.
  9. Меньшиков П.В., Таранжин С.С., Флягин А.С., 2020. Исследование сейсмического воздействия на здания и сооружения города Сатки при ведении взрывных работ на карагайском карьере в стесненных условиях. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 3 – 1, С. 383 – 398. DOI: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-383-398>.
  10. Meghanadh M., Reshma T., 2017. Blast analysis and blast resistant design of r.c.c residential building. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. Vol. 8, No. 3, pp. 761 – 770. DOI: <https://doi.org/10.17577/IJERTV7IS100002>.

### References

1. Kolchina M., Konovalov V. and Kolchina N., 2019. Analyzing the state of mining towns in the Ural region. *E3S Web Conf*. Vol. 135, No. 04015, DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913504015>.
2. Dresco P., Zaitsev V., Gambino R. and Chu B., 1999. Preparation and Properties of Magnetite and Polymer Magnetite Nanoparticles. *Langmuir*. Vol. 15, No. 6, pp. 1945 – 1951.
3. Denisenko N., Gafarov R., 2018. Analysis of Geophone Types and Grouping Parameters Tests. *European Association of Geoscientists & Engineers. Geomodel*, pp. 1 – 5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201802311>.
4. Vedernikov A., Zuev P., Grigoriev D., 2020. Geophysical surveys of rock mass status of iron ore deposit with combined deep – opencast mining zone. *E3S Web Conf*. Vol. 177, No. 02006. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017702006>.
5. Shih – Chao Wei and Ko – Fei Liu, 2020. Automatic debris flow detection using geophones. *Landslides*. Vol.17, pp. 349 – 359. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01258-9>.
6. Yue Hou, Rui Jiao, Hongyu Yu, 2020. MEMS based geophones and seismometers. *Sensors and Actuators A: Physical*. Vol. 318, No. 11249. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112498>.
7. Morioka H., Kumagai H., Maeda T., 2017. Theoretical basis of the amplitude source location method for volcano-seismic signals. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. Vol. 122, No. 8, pp. 6538 – 6551. DOI: <https://doi.org/10.1002/2017JB013997>.
8. K. Ward and Fan-Chi Lin, 2017. On the Viability of Using Autonomous

Three-Component Nodal Geophones to Calculate Teleseismic Ps Receiver Functions with an Application to Old Faithful, Yellowstone. *Seismological Research Letters*. Vol. 88, No. 5, pp. 1268 – 1278. DOI: <https://doi.org/10.1785/0220170051>.

9. Men'shikov P.V., Taranzhin S.S., Flyagin A.S., 2020. Issledovanie seismicheskogo vozdeistviya na zdaniya i sooruzheniya goroda Satki pri vedenii vzryvnykh rabot na karagaiskom kar'ere v stesnennykh usloviyakh [Research of seismic influence on buildings and structures of Satka town while conducting explosive works on the Karagayskiy career in constrained conditions]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten'*, № 3 – 1, P. 383 - 398. DOI: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-383-398>.

10. Meghanadh M., Reshma T., 2017. Blast analysis and blast resistant design of r.c.c residential building. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. Vol. 8, No. 3, pp. 761 – 770. DOI: <https://doi.org/10.17577/IJERTV7IS100002>.