

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 550.8.05

СЕЙСМИЧЕСКИЙ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПАРАМЕТРОВ МАССОВОГО ВЗРЫВА В ЛЕБЕДИНСКОМ КАРЬЕРЕ КУРСКОЙ МАГНИТНОЙ АНОМАЛИИ

Э. М. Горбунова, С. М. Петухова, А. Г. Иванов

Институт динамики геосфер им. акад. М. А. Садовского РАН,

E-mail: emgorbunova@bk.ru, Ленинский проспект, 38, корп. 1, 119334, г. Москва, Россия

Представлен анализ результатов сейсмической и гидрогеологической регистрации массового взрыва, проведенного 22.09.2021 г. в Лебединском карьере Курской магнитной аномалии. При взрыве четырех групп блоков определены значения максимальной скорости смещения грунта в пяти пунктах наблюдений, расположенных на эпицентральных расстояниях 1.7–4.9 км, и амплитуды гидрогеологических откликов обводненной надрудной толщи в двух наблюдательных скважинах. Основные параметры взрывов, оказавшие наибольшее сейсмическое воздействие на массив, использованы для расчета максимальной скорости колебаний в волне по установленной ранее зависимости. Расхождения между зарегистрированными и расчетными параметрами отмечены в ближней зоне взрыва первой группы блоков, разрабатываемых в рудно-кристаллическом массиве на приведенных расстояниях 106–198 м/кг^{1/3}. При осуществлении взрывов в осадочных отложениях на приведенных расстояниях 405–512 м/кг^{1/3} прослежено отличие в формировании волнового поля. Полученные данные могут быть привлечены для контроля технологии буровзрывных работ.

Массовый взрыв, железорудное месторождение, Лебединский карьер, скорость смещения грунта, гидрогеологический отклик

DOI: 10.15372/FTPRPI20230403

Безопасность проведения горно-технологических работ при разработке месторождений твердых полезных ископаемых с использованием взрывных технологий обеспечивается различными видами мониторинга состояния недр: сейсмическим, геодинамическим, геодезическим и др. в соответствии с утвержденными нормативными документами [1, 2]. Во многих научно-методических работах [3–5] детально рассматриваются условия формирования волнового поля при выполнении массовых взрывов, которые зависят не только от технологии разработки месторождения, но и от особенностей геологического строения массива.

Кумулятивный сейсмический эффект короткозамедленного взрыва складывается из сейсмических сигналов, вызванных взрывами отдельных скважин и групп скважин [6]. Из-за разных условий подрыва взрывчатых веществ (ВВ) в ступени формируется сложная волновая кар-

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00469. <https://rscf.ru/project/23-27-00469>.

тина. Для оценки сейсмического эффекта массового взрыва используется принцип суперпозиции сейсмических волн, образующихся в результате взрывов зарядов ВВ в скважинах [7, 8]. Данные регистрации массового взрыва, проведенного в карьере Лебединского горно-обогатительного комбината, полученные в подземной выработке на глубине 263 м (горизонт — 125 м), отличаются от записей, зарегистрированных на поверхности при взрыве блоков на расстоянии 1.6 км. Колебания имеют более высокочастотный характер, меньшую амплитуду. Основная энергия колебаний приурочена к узкой полосе частот в окрестностях 20 Гц [9].

Цель настоящей работы — исследование реакции массива горных пород на проведение массового взрыва в Лебединском карьере Курской магнитной аномалии (КМА) по сейсмическим и гидрогеологическим данным. Объект наблюдений — кристаллические породы фундамента, перекрытые осадочными отложениями.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ УЧАСТКЕ ПРОВОДИМЫХ РАБОТ

Участок исследований расположен вдоль восточной окраины г. Губкин Белгородской области, в первой зоне горного отвода недр шахтного поля Коробковского месторождения и во второй зоне Лебединского месторождения КМА (рис. 1).

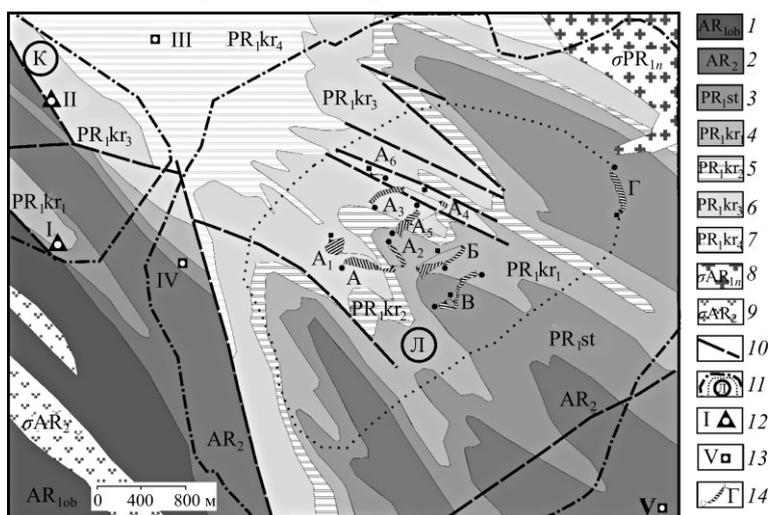


Рис. 1. Тектоническая схема участка работ (по данным [10] (1–7 — отложения: 1 — обоянской серии нижнего архея (плагиигранит, гнейс), 2 — михайловской серии верхнего архея (амфиболит, актинолит); 3–7 — курской серии нижнего протерозоя: 3 — стойленской свиты (сланцы двуслюдяные, конгломерат), 4 — нижней коробковской железорудной подсвитой (сланцы метаморфизованные), 5 — промежуточной коробковской сланцевой подсвитой (сланцы филлитовые), 6 — верхней коробковской железорудной подсвитой (железистые кварциты), 7 — верхней сланцевой подсвитой (сланцы слюдястые); 8–9 — интрузивные образования: 8 — стойло-николаевский комплекс нижнего протерозоя (гранодиориты), 9 — сергиевский комплекс верхнего архея (серпентиниты); 10 — разломы; 11 — границы Коробковского (К) и Лебединского (Л) железорудных месторождений (штрих-пунктир), контур Лебединского карьера (точки); 12 — пункты сейсмической и гидрогеологической регистрации; 13 — пункты сейсмической регистрации; 14 — контур блока и его обозначение: начало подрыва — треугольник и квадрат, окончание — кружок

Добавлено примечание ([e1]): горизонт – 125 м

С 2021 г. в двух пунктах наблюдений I и II проводится комплексный мониторинг сейсмических, гидрогеологических и барометрических параметров. В опорном пункте IV регулярно выполняется сейсмическая регистрация взрывов групп блоков, расположенных в пределах Лебединского карьера, и камер Коробковского месторождения. Пункты III и V — временные, устанавливаются эпизодически для оценки сейсмического воздействия на окружающую инфраструктуру.

22.09.2021 г. был осуществлен массовый взрыв четырех групп блоков. Первая группа включает 7 блоков, которые расположены в западном борту карьера на горизонтах –255 м (блоки A₁–A₅, A) и северном на горизонте –150 м (блок A₆). Следующие группы представлены единичными блоками. Блоки Б и В находятся в центре карьера на горизонтах –195 и –60 м соответственно. Блок Г приурочен к восточному борту карьера к горизонту 90 м. Первые три группы блоков (A₁–A₆, А; Б; В) находятся в рудно-кристаллическом массиве, четвертый блок (Г) — в осадочных отложениях.

В геологическом разрезе участка выделены два структурных этажа. Нижний – кристаллический фундамент представлен разновозрастными метаморфизованными породами архея и нижнего протерозоя, прорванными интрузивными образованиями (рис. 1). Верхний структурный этаж сложен осадочно-терригенными породами девона, юры, мела и четвертичными отложениями общей мощностью 100–120 м. В составе пород фундамента выделены два комплекса: нижний — архейский и верхний — нижнепротерозойский. Архейские образования представлены обоянской серией (AR_{1ob}) на юго-западе участка и михайловской (AR_{2mh}) в центре и на юго-востоке.

В пределах Коробковского и Лебединского железорудных месторождений КМА преимущественно распространена курская серия (PR_{1ks}), сложенная стойленской (PR_{1st}) и коробковской (PR_{1kr}) свитами. Коробковская свита включает две железорудных подсвиты (нижнюю (PR_{1kr1}) и верхнюю (PR_{1kr3})) и две сланцевые подсвиты (промежуточную (PR_{1kr2}) и верхнюю (PR_{1kr4})).

Породы среднего-верхнего девона, представленные рудными брекчиями, выполняют неровности кристаллического фундамента и перекрыты глинами с подчиненными прослоями алевролитов средней-верхней юры мощностью 10–20 м. Сверху залегают песчано-глинистые отложения альб-сеноманского яруса нижнего-верхнего мела мощностью 35–40 м и доломиты турней-коньякского яруса верхнего мела мощностью 5–65 м.

С поверхности распространены четвертичные отложения, выполненные аллювиальными песками, суглинками, мощностью до 18 м в долине р. Осколец. Вдоль склонов балок развиты делювиальные отложения, на равнине — преимущественно пролювиальные суглинки. Вдоль южной границы участка расположены отвалы карьера — современные техногенные отложения.

В осадочной толще повсеместное распространение получает альб-сеноманский водоносный напорный горизонт. К зоне экзогенного выветривания и тектонической трещиноватости пород кристаллического фундамента приурочен архей-протерозойский водоносный напорный комплекс. Наличие регионального водоупора (глинистые отложения юры и девона) определяет гидравлический разрыв уровней подземных вод. Рассматриваемый архей-протерозойский водоносный комплекс находится в зоне техногенного влияния разрабатываемых железорудных месторождений и характеризуется региональным трендом снижения уровня. По контуру Лебединского карьера подземные воды сдrenированы системами водопонизительных установок.

В пункте I преимущественное распространение получают метаморфизованные сланцы нижней железорудной подсвиты, перекрытые осадочными образованиями мощностью до 70 м. Пункт II расположен в области развития железистых кварцитов верхней железорудной подсви-

ты, мощность осадочного чехла увеличивается до 110 м. Рудно-кристаллический фундамент на участках расположения пунктов III и IV представлен сланцами слюдистыми верхней сланцевой подсвиты и стойленской свиты соответственно. В пределах участка V преимущественное распространение получают амфиболиты михайловской серии верхнего архея. Мощность осадочного чехла в районе исследований изменяется в широких пределах от 50 до 120 м.

МЕТОДИКА РАБОТ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Регистрация сейсмических параметров массового взрыва в Лебединском карьере выполнялась по трем компонентам (вертикальной и горизонтальным в направлении север-юг и восток-запад) в пяти пунктах наблюдений. В пунктах I–III установлены сейсмометры СПВ-3К, в пунктах IV–V — СМ-3КВ. Рабочий диапазон датчиков составляет 0.5–65 Гц, частота регистрации в пунктах I–II 200 Гц на канал, в пунктах III–V — 2 кГц на канал.

В двух наблюдательных скважинах, оборудованных гидрогеологическими датчиками PR-36XW, проводились наблюдения за вариациями давления в системах “пласт–скважина” с частотой регистрации 200 Гц на канал, точность регистрации 20 Па. Первая скважина, вскрывающая метаморфизованные сланцы нижней железорудной подсвиты (PR₁kr₁) в интервале 68–90 м (абсолютные отметки 51.7–102.7 м), расположена в пункте наблюдений I. Вторая скважина, пройденная в железистых кварцитах верхней железорудной подсвиты (PR₁kr₃) в интервале 108–141 м (абсолютные отметки 29.7–162.7 м), находится в пункте наблюдений II. На приустьевой площадке пункта I осуществляется регистрация атмосферного давления с использованием датчика РАА-33Х с точностью 0.01 % [11].

При сопоставлении гидрогеологических и сейсмических данных частота регистрации в пунктах III–V приведена к 200 Гц. Построены амплитудные спектры по трем компонентам скорости смещения и вариациям давления в системе “пласт–скважина”, вызванным прохождением сейсмических волн от каждой группы взрывов, и рассчитана спектральная плотность мощности (СПМ) сейсмических сигналов и гидрогеологических откликов. Длина обработанных интервалов сейсмических и гидрогеологических данных составила 6 с для исключения влияния низкочастотной воздушной волны, которая сопровождает проведение взрывов в карьере.

Для оценки максимальной скорости колебаний грунта в пяти пунктах наблюдений при каждом из взрывов использовалась зависимость максимального значения вектора массовой скорости от приведенного расстояния, полученная на основе ранее выполненных исследований для взрывов в карьерах КМА [12]:

$$V = 2400 \left(\frac{q^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1.48}, \quad (1)$$

где V — максимальное значение вектора массовой скорости, мм/с; q — максимальная масса ВВ в одной ступени замедления, кг; R — эпицентральное расстояние от центра блоков до пунктов наблюдений, м.

Для сравнения экспериментальных данных, зарегистрированных в пяти пунктах наблюдений по трем компонентам (вертикальной V_Z и горизонтальным V_N , V_E), рассчитывается массовая скорость смещения грунта V_m :

$$V_m = \left[\sqrt{V_Z^2 + V_N^2 + V_E^2} \right]. \quad (2)$$

Приведенное расстояние оценивается как

$$\bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{Q}}, \quad (3)$$

R — эпицентральное расстояние от центра подрываемого блока в карьере до пункта, м; Q — средняя масса ВВ в пределах взрывающегося блока в карьере, кг.

Для определения блока с максимальным сейсмическим воздействием в составе первой группы, включающей 7 блоков (A_1-A_6, A), выполнен расчет с применением формулы (1). Эта же формула использовалась для определения скорости колебаний в волне, пересчитанной на расстояние 1 км. Результаты регистрации сейсмических и гидрогеологических данных в пяти пунктах наблюдений представлены в табл. 1 в соответствии с приведенным расстоянием.

ТАБЛИЦА 1. Основные параметры, зарегистрированные и расчетные при массовом взрыве 21.09.2022 г.

Пункт	Блок	Горизонт, м	Масса ВВ в блоке, т	Число групп	Средняя масса ВВ в группе, т	Эпицентральное расстояние, км	Приведенное расстояние, м/кг ^{1/3}	Скорость, мм/с		Амплитуда гидрогеологического отклика, Па
								экспериментальная	расчетная	
IV	А*	-255	370	83	4.5	1.7	106	6.46	2.42	—
III						2.5	154	4.74	1.39	—
I						2.7	165	3.90	1.25	467
II						3.0	180	2.31	1.10	165
V						3.2	198	2.90	0.96	—
IV	Б	-195	282	82	3.4	2.3	152	1.70	1.41	—
III						2.9	195	1.74	0.98	—
I						3.2	216	1.59	0.84	—
V						3.3	219	1.68	0.83	144
II						3.5	229	1.49	0.77	10
IV	В	-60	279	84	2.6	2.4	178	1.90	1.12	—
V						2.9	213	1.69	0.86	—
III						3.2	234	1.18	0.75	—
I						3.5	255	1.40	0.66	115
II						3.8	275	0.71	0.59	7
IV	Г	90	114	130	0.9	3.9	405	0.24	0.33	—
V						4.0	416	0.21	0.32	—
III						4.0	423	0.38	0.31	—
II						4.8	503	0.16	0.24	—
I						4.9	512	0.28	0.24	—

* В первой группе, включающей 7 блоков, расчеты выполнены для блока А, который отличается наибольшим сейсмическим воздействием.

Масса ВВ в блоках изменялась от 2 до 370 т, масса ВВ в одной группе замедления — от 0.88 до 8.79 т. Суммарная мощность массового взрыва составила 1967 т; ВВ заряжались в скважины глубиной около 15 м. Эффективность дробления пород зависит от схемы подрыва групп скважин, которые взрывались последовательно, одновременно и по схеме “вруба” — при производстве взрыва с обоих концов блока или с одной стороны в пределах какой-то его части. Оценка общей продолжительности взрывов в блоках выполнена на основе пересчета среднего времени замедления взрыва между группами скважин, которое составляет ~42 мс.

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕГИСТРАЦИИ МАССОВОГО ВЗРЫВА

При массовом взрыве в карьере 22.09.2021 г. в пяти пунктах наблюдений зарегистрированы четыре группы колебаний, которые связаны со взрывами групп блоков через 22.5–24.5 с (рис. 2). Воздушная волна от взрывов четырех групп блоков в пункте I отмечена через 6.8–13.2 с. Расчетное эпицентрального расстояние с учетом скорости распространения воздушной волны 330 м/с до пункта I изменяется от 2.2 до 4.4 км и отличается от значений эпицентральных расстояний, определенных от центра блоков А–Г до пункта на 0.5 км (табл. 1, рис. 1).

Первая группа колебаний имеет сложный вид и выделяется в виде трех ступеней на записи вариаций атмосферного давления. Первая ступень (1.1) соотносится с последовательным взрывом блоков A_1 – A – A_2 (рис. 1). Вторая ступень (1.2) через 2.6 с после начала взрыва соответствует одновременному взрыву следующих двух блоков (A_3 и A_4). Взрыв блока A_5 по схеме “вруба” выполнен последовательно после окончания подрыва блока A_4 . Третья ступень (1.3) связана со взрывом блока A_6 через 4.9 с.

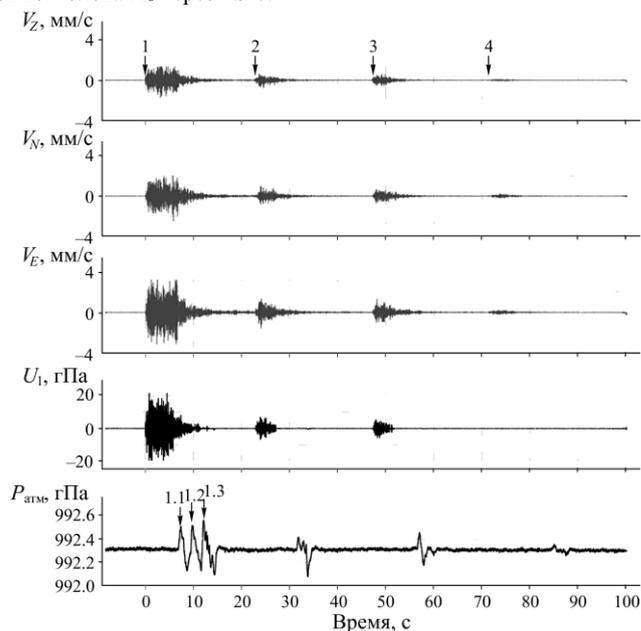


Рис. 2. Сейсмограммы (верхние три панели по компонентам V_Z , V_N , V_E), запись вариаций порового давления в системе “пласт–скважина” (U_1) и атмосферного давления ($P_{атм}$), зарегистрированные в пункте наблюдений I при массовом взрыве 22.09.2021 г.

Различия в технологии и условиях проведения взрывов блоков могут быть выделены на сейсмограммах и записях вариаций порового давления в системе “пласт–скважина”. Максимальные амплитуды скорости смещения грунта преимущественно отмечены по восточной компоненте (рис. 3), за исключением данных регистрации в опорном пункте IV, наиболее близко расположенном к подрываемым блокам.

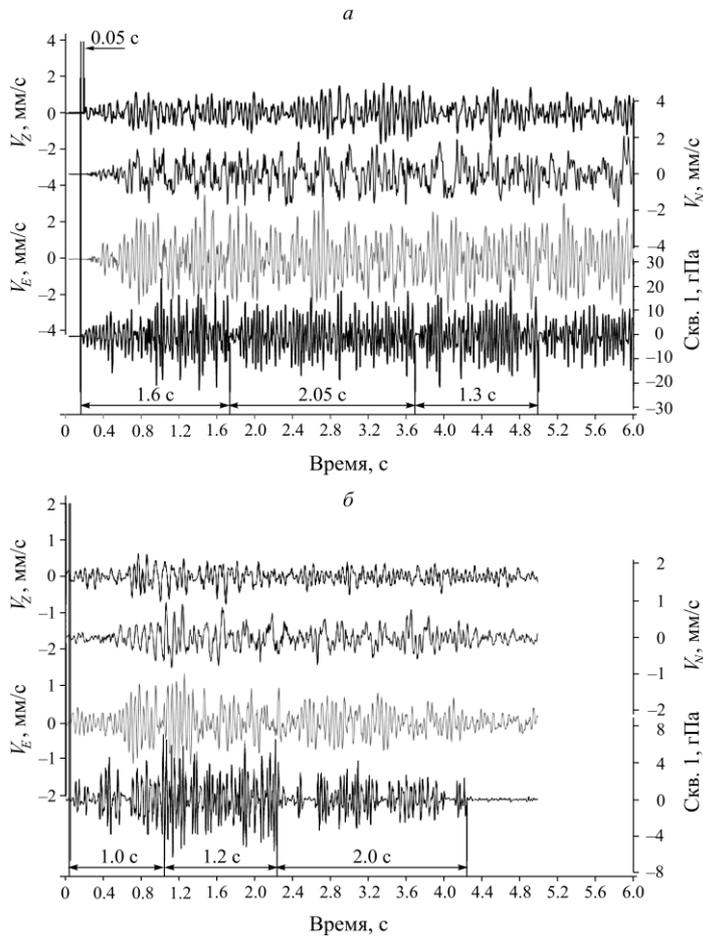


Рис. 3. Сейсмограммы (верхние три панели по компонентам V_z , V_N , V_E) и запись вариаций порового давления в системе “пласт–скважина” (скв. 1) при проведении взрывов первой группы блоков (а) и блока Б (б) 22.09.2021 г.

Наиболее отчетливо последовательность проведения взрывов блоков проявляется в реакции обводненного рудно-кристаллического массива. Увеличение интенсивности колебаний порового давления в системе “пласт–скважина” через 0.85 с может быть связано с подрывом широкой диагонали блока А₁, вдоль которой расположено наибольшее количество скважин (рис. 1). Моменты окончания подрыва блока А₁ через 1.6 с, широкой диагонали “вруба” А через 2.05 с и двух ступеней группы 1 через 4.95 с прослежены в виде уменьшения амплитуды вариаций порового давления в системе “пласт–скважина” (рис. 3а). Следует отметить, что гидрогеологический отклик на прохождение сейсмических

волн от взрыва первой группы зарегистрирован на 0.05 с раньше в рудно-кристаллическом массиве, в отличие от данных, полученных на дневной поверхности. Подобный эффект прослежен и при проведении взрывов в камерах Коробковского железорудного месторождения [13].

Взрыв блока Б отличается простым видом волновых форм (рис. 3б). Экстремум гидрогеологического отклика через 1 с после взрыва соответствует подрыву широкой диагонали блока Б. По расчету продолжительность взрыва блока Б по схеме “вруба” с обоих концов с разбивкой на две части составляет 1.65 с, но в пунктах наблюдений увеличение интенсивности колебаний грунта зарегистрировано в разное время. Продолжительность реакции обводненного рудно-кристаллического массива составляет 2.2 с при взрыве. Следовательно, не совсем точно условно разделять блок на две части. В одной части блока, вероятно, содержится большее количество подрываемых скважин (рис. 1). После взрыва блока Б в течение 2 с вариации регистрируемых параметров проявляются с меньшей интенсивностью, возможно из-за интерференции сейсмических волн, которая влияет на формирование общей волновой картины от взрыва блока.

При взрыве первой группы блоков в спектрах колебаний грунта, построенных по вертикальной компоненте в пунктах I–IV, прослежено закономерное смещение экстремумов в область низких частот от 22.3 (пункт IV) до 20 Гц (пункт II) при увеличении приведенного расстояния от 106 до 180 м/кг^{1/3} от блока А (рис. 4а). В пункте V, расположенном южнее карьера на расстоянии 198 м/кг^{1/3}, экстремум проявился на частоте 22.3 Гц (рис. 4а). Экстремумы по горизонтальным компонентам (северной и восточной) выделены в близких диапазонах 21.5–22.5 Гц и 21.3–22.3 Гц соответственно.

Особенности формирования волнового поля при взрыве блока Б по схеме одновременного “вруба” в оба конца прослежены в амплитудных спектрах скорости смещения грунта по вертикальной и горизонтальным компонентам в виде двух экстремумов (рис. 4б). В пяти пунктах наблюдений, расположенных на приведенных расстояниях 152–229 м/кг^{1/3}, выделяются два экстремума в диапазонах частот 6.5–7.9 и 19.7–21.5 Гц, которые проявляются с различной интенсивностью (рис. 4б). Первый экстремум отличается относительным смещением в область высоких частот и, возможно, соответствует подрыву северо-восточной части блока Б. Второй, напротив, характеризуется относительным смещением в область низких частот и может быть связан со взрывами рядов скважин в юго-западной части блока Б.

При взрыве блока В по схеме “неполного вруба”, субпараллельного блока Б, экстремумы смещения грунта в окрестностях частот 4.5–7.3 и 19.0–21.5 Гц проявились неравномерно, преимущественно в ближней зоне взрыва на приведенных расстояниях 178–234 м/кг^{1/3}. При проведении взрыва блока Г в пределах “вскрыши” — осадочных отложений мела в пунктах наблюдений, удаленных на расстояния 405–512 м/кг^{1/3}, экстремумы колебаний грунта выделены на разных частотах.

Экстремумы гидрогеологических откликов верхней железорудной подсвиты, вскрытой в скважине 3 (пункт II), прослежены в более высоком диапазоне частот 22.4 и 39.1 Гц в отличие от скважины 1 (пункт I), приуроченной к нижней подсвите (рис. 4а). Рассматриваемые водонасыщенные коллекторы характеризуются различными динамическими параметрами. Средние значения коэффициента Пуассона и модуля Юнга в образцах, отобранных из пород верхней подсвиты, составляют 0.27 и 143 МПа, в образцах нижней подсвиты — не превышают 0.22 и 113.2 МПа соответственно [14].

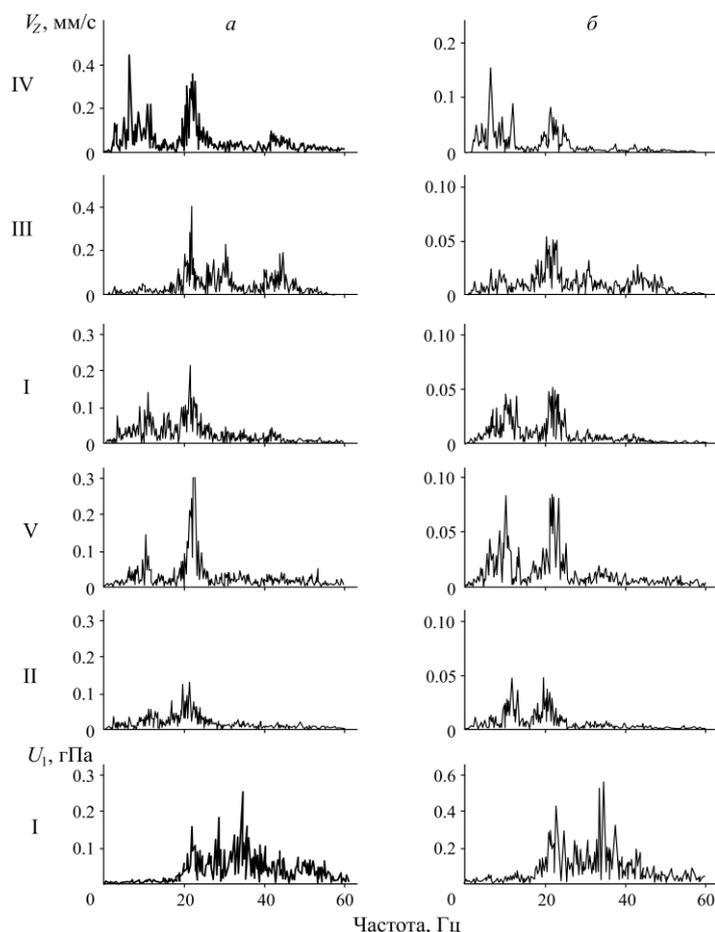


Рис. 4. Амплитудные спектры скорости смещения грунта (верхние пять рядов) и вариаций порового давления в системе “пласт–скважина” (нижний ряд) при взрыве первой группы блоков (*a*) и блока Б (*б*)

При сложной схеме взрывов блоков Б и В с использованием “вруба” на приведенных расстояниях 216 и $255 \text{ м/кг}^{1/3}$ от пункта I отмечена однотипная реакция обводненного руднокристаллического массива. Экстремумы гидрогеологических откликов при взрыве блока Б установлены на частоте 22.8 и 34.6 Гц (рис. 4б), при взрыве блока В — смещены в область низких частот 20.5 и 33 Гц. При проведении взрывов в блоках на приведенных расстояниях более $275 \text{ м/кг}^{1/3}$ вариации порового давления в системе “пласт–скважина” в пункте II находятся в пределах точности регистрации. Замечено, что в пункте I в спектрах скорости смещения грунта и вариации порового давления в системе “пласт–скважина” отчетливо проявились три экстремума, которые могут быть соотнесены с тремя ступенями подрыва первой группы блоков.

Геолого-структурные условия расположения пункта наблюдений и технология проведения взрывов блоков определяют интенсивность спектральной плотности мощности (СПМ) скорости смещения грунта и реакции обводненного рудно-кристаллического массива. В табл. 2 приведены значения частот, в пределах которых зарегистрированы экстремумы СПМ по вертикальной компоненте, представленные на рис. 4.

Добавлено примечание ([e2]): ско-рости

ТАБЛИЦА 2. Диапазоны частот, соответствующие максимальным значениям СПМ скорости смещения грунта и реакции обводненного рудно-кристаллического массива, Гц

Блок	Пункт						
	По данным регистрации скорости смещения грунта					По реакции обводненного массива	
	IV	I	II	III	V	I	II
А	8.0–10.0; 25.0	18.5–20.0	18.5–20.0	24.0–26.0; 34.0–36.0	9.0–9.5; 25.0	28.5	30.0
Б	7.0–10.0; 20.0–23.0	18.5	16.0–18.5	24.0–26.0; 34.0–36.0	9.0; 18.5–25.0	26.0–28.5	—
В	6.0–6.5; 20.0–25.0	16.0–18.0	15.5–18.0	24.0–26.0; 34.0–36.0	4.5–6.5; 25.0	25.0–30.0	—
Г	4.5–5.5; 20.0–25.0	20.0	20.0	30.0	12.0; 25.0	—	—

В пункте IV, который расположен ближе остальных пунктов к подрываемым блокам А–Г, выделены два экстремума СПМ скорости смещения грунта, которые различаются по интенсивности (рис. 5а). В пунктах I и II интенсивность СПМ при взрывах блоков локализована в узком диапазоне частот 15–20 Гц. В пункте III экстремумы проявляются преимущественно в высокочастотной области, в пункте V — в низко- и высокочастотном диапазонах.

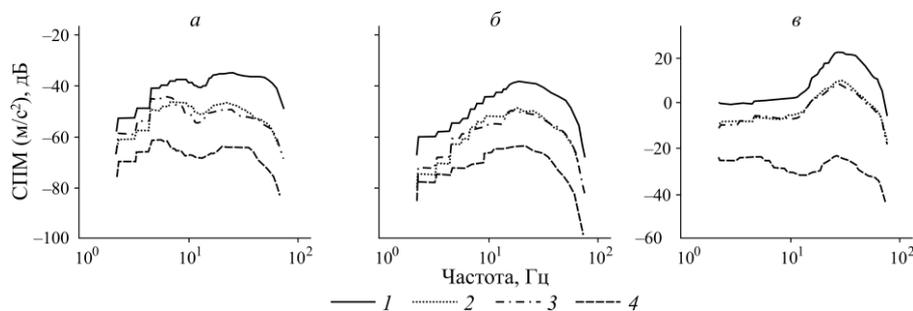


Рис. 5. СПМ скорости смещения грунта в пунктах наблюдений IV (а), I (б) и вариаций порового давления в системе “пласт–скважина” в пункте I (в) при массовом взрыве 22.09.2021 г. (1 — взрыв первой группы блоков; 2 — взрыв блока Б; 3 — взрыв блока В; 4 — взрыв блока Г)

При взрывах блоков Б и В интенсивность СПМ скорости смещения грунта уменьшается на 10–15 дБ по сравнению с данными регистрации взрыва первой группы блоков и имеет близкие значения. Минимальные значения интенсивности СПМ скорости смещения грунта установлены при взрыве блока Г, расположенного в осадном чехле, при небольшом значении средней массы ВВ (табл. 1).

В пункте I экстремумы СПМ вариаций порового давления в системе “пласт–скважина” при сейсмическом воздействии отмечены в диапазоне более высоких частот 25–30 Гц (рис. 5в) по сравнению с СПМ скорости смещения грунта, выделенной в диапазоне частот 16–20 Гц (рис. 5б). Интенсивность гидрогеологических откликов при взрывах блоков Б и В на 12–14 дБ

ниже относительно параметров, зарегистрированных при взрыве первой группы блоков. Реакция обводненной части рудно-кристаллического массива на взрыв блока Г, проведенного в осадочных отложениях, сопоставима с фоновыми параметрами СПМ.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И РАСЧЕТНЫХ ДАННЫХ

Сейсмический эффект взрывов зависит от эпицентрального расстояния между блоком и пунктом наблюдений, параметров взрыва и геолого-структурных условий трасс распространения объемных волн. Максимальные значения массовой скорости смещения грунта, зарегистрированные в пяти пунктах наблюдений при взрыве 4 групп блоков, отличаются от расчетных, определенных по зависимости (1) (рис. 6, табл. 1).

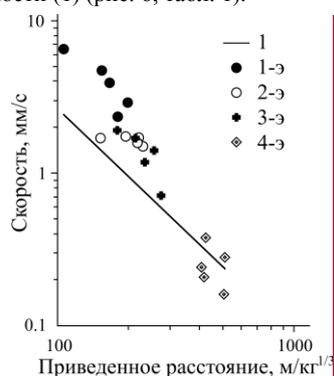


Рис. 6. Зависимость максимального значения вектора массовой скорости от эпицентрального расстояния: 1 — зависимость (1) [12]; (1-э–4-э) — экспериментальные значения, зарегистрированные в пунктах I–V при массовом взрыве 22.09.2021 г.

При подрыве первой группы блоков с максимальной массой ВВ 370 т в блоке А в четырех пунктах наблюдений I–IV, расположенных вдоль западного борта карьера (рис. 1), отмечено закономерное уменьшение амплитуды скорости смещения грунта V_m от приведенного расстояния R : $V_m = 6989\bar{R}^{1.5}$, с коэффициентом детерминации 0.78. В пункте V юго-западнее карьера скорость смещения грунта больше, несмотря на то, что этот пункт наиболее удален от подрываемого блока. Различие может быть обусловлено локальными особенностями геолого-структурного строения участка исследований. Пункт V находится в пределах области распространения амфиболитов, актинолитов михайловской серии верхнего архея.

При подрыве блоков Б и В с меньшими значениями массы ВВ 282 и 279 т зависимость амплитуды скорости смещения грунта от приведенного расстояния представлена выражением $V_m = 947\bar{R}^{1.2}$ с коэффициентом детерминации 0.5. При взрыве блока Г с наименьшим значением массы ВВ 114 т зависимость экспериментальных значений скорости смещения грунта, зарегистрированных в пунктах I–V, от приведенного расстояния не прослеживается (табл. 1, рис. 7).

Пространственное распределение максимальных значений скорости смещения грунта, расчетных и зарегистрированных при массовом взрыве 22.09.2021 г., представлено на схемах изогипс (рис. 7). При последовательном подрыве блока А с максимальной массой ВВ, расположенного в западной части рудного тела, фронт распространения сейсмических волн, построенных по экспериментальным и расчетным данным, подобен. Аналогичный эффект отмечен и при подрыве блока В в центре карьера по схеме “вруба” в пределах 1/4 части.

Добавлено примечание ([e3]): Скорость, мм/с

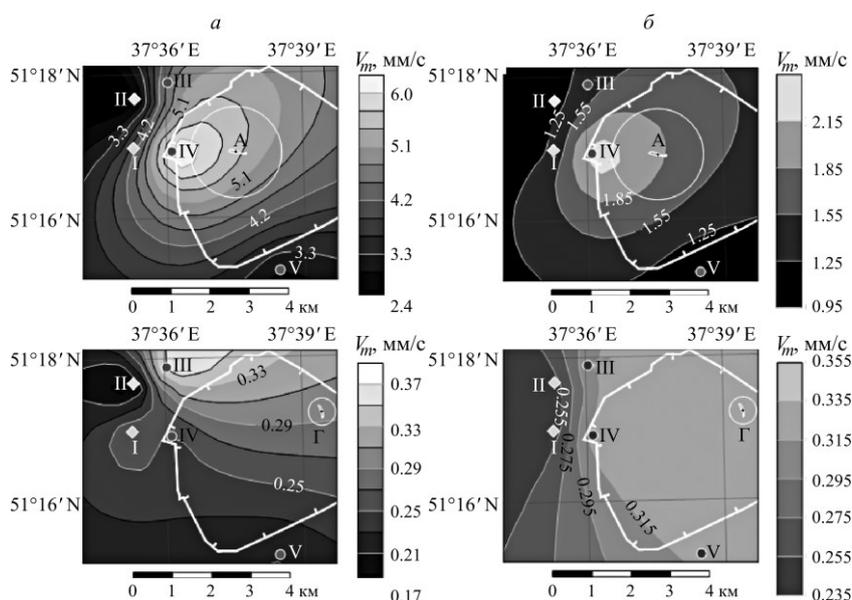


Рис. 7. Схемы изогипс, построенные по экспериментальным (а) и расчетным (б) данным, зарегистрированным в пунктах наблюдений I–V для взрывов первой группы блоков (верхняя панель) и блока Г (нижняя панель) (область интенсивности колебаний с массовой скоростью ≥ 15 мм/с, соответствующая 5 баллам при проведении взрывов в блоках А и Г, обозначена белым кружком; границы Лебединского железорудного месторождения — белая линия с бергштрихами; пункты наблюдений: сейсмические и гидрогеологические — в виде серых ромбиков, сейсмические — черные кружки)

При взрыве блока Б в центре карьера по схеме одновременного “вруба” в оба конца блока в трех пунктах наблюдений, расположенных на эпицентральных расстояниях 2.3–3.3 км, зарегистрированы близкие значения максимальной скорости 1.7 мм/с. В двух других, удаленных на расстояния 3.2 и 3.5 км, скорость смещения грунта составила 1.5–1.6 мм/с (табл. 1).

При взрывах блоков А–В максимальное значение скорости установлено в близрасположенном пункте IV, при взрыве блока Г, приуроченного к толще слабосцементированных отложений мела в восточном борту карьера, — в пункте наблюдений III. Изогипсы, построенные по экспериментальным данным при взрыве блока Г, преимущественно ориентированы в субширотном направлении и ортогональны изогипсам, построенным по расчетным данным. Расхождение между расчетными и экспериментальными значениями скорости, вероятно, обусловлено тем, что при расчете не учитываются особенности технологии подрыва блока и геологические условия.

От взрывов блоков Б–Г во всех пунктах скорости колебаний были меньше 2 мм/с (табл. 1) и соответствовали интенсивности колебаний 1 балл по шкале Медведева. При взрыве первой группы блоков скорость в пунктах наблюдений изменялась от 2.3 до 6.5 мм/с составила 2–3 балла. Расчетный радиус максимального сейсмического воздействия при взрыве блока А, в границах которого скорость колебаний ≥ 15 мм/с, не превышает ~ 100 м и располагается в пределах Лебединского карьера КМА (рис. 7).

ВЫВОДЫ

Анализ сейсмических и гидрогеологических данных в пяти пунктах наблюдений при массовом взрыве 22.09.2021 г. в Лебединском карьере КМА показал, что при взрыве блоков, расположенных в рудно-кристаллическом массиве, прослежено уменьшение максимальных значений скорости смещения грунта и вариаций порового давления в системе “пласт – скважина” при увеличении приведенного расстояния. Напротив, при взрыве блока в осадочных **отложениях** в близрасположенных пунктах наблюдений IV и V, приуроченных к области распространения более древних отложений – стойленской свиты нижнего протерозоя и михайловской серии верхнего архея, отмечены меньшие значения скорости смещения грунта.

На сейсмограммах и записях гидрогеологических откликов, зарегистрированных при прохождении сейсмических волн в обводненном рудно-кристаллическом массиве, установлена продолжительность взрывов групп блоков и их окончание. Экстремумы колебаний могут совпадать с одновременным взрывом блоков, подрывом максимального количества скважин по широкой “диагонали” и “врубом” в разные части блока. Экстремумы амплитудных спектров и СПМ вариаций порового давления в системе “пласт – скважина” локализованы в высокочастотной области относительно значений этих же параметров, рассчитанных для скорости смещения грунта, выделенных в более широком диапазоне частот. Влияние локальных геологоструктурных условий расположения пунктов наблюдений отражено на СПМ скорости смещения грунта и вариаций порового давления в системе “пласт – скважина”.

Для подтверждения указанных закономерностей будет продолжена обработка экспериментальных данных, полученных при регистрации массовых взрывов в пределах железорудных месторождений КМА за период наблюдений 2020 – 2023 гг. Сопоставление экспериментально полученных данных с рассчитанными значениями массовой скорости смещения грунта может быть использовано для предварительной оценки сейсмического воздействия массового взрыва на разрабатываемый массив.

Добавлено примечание ([e4]): отложе-ниях

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Требования** к мониторингу месторождений твердых полезных ископаемых. — М.: МПР. 2000. — 30 с.
2. **Федеральные нормы** и правила в области промышленной безопасности. Правила безопасности при взрывных работах (утв. приказом Ростехнадзора от 16.12.2013 г. № 605, в ред. Приказа Ростехнадзора от 30.11.2017 № 518).
3. **Костюченко В. Н., Кочарян Г. Г., Иванов Б. А., Готвинская О. А.** Излучение и распространение сейсмических волн в блочной среде // Физические процессы в геосферах: их проявление и взаимодействие (геофизика сильных возмущений); сб. науч. тр. — М.: ИДГ РАН, 1999. — С. 60–73.
4. **Кочарян Г. Г., Куликов В. И., Павлов Д. В.** О влиянии массовых взрывов на устойчивость тектонических разломов // ФТПРПИ. — 2019. — № 6. — С. 49–58.
5. **Кутуев В. А., Меньшиков П. В., Жариков С. Н.** Анализ воздействия взрывов на подземные горные выработки шахты “Магнитовая” // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2020. — Т. 7. — № 2. — С. 11–17.
6. **Адушкин В. В., Спивак А. А., Соловьев С. П., Перник Л. М., Кишкина С. Б.** Геоэкологические последствия массовых химических взрывов на карьерах // Геоэкология. — 2000. — № 6. — С. 554–563.

7. **Кишкина С. Б., Спивак А. А.** Локальный сейсмический эффект карьерных взрывов // Физические процессы в геосферах: их проявление и взаимодействие (геофизика сильных возмущений); сб. науч. тр. — М.: ИДГ РАН, 1999. — С. 111–116.
8. **Кишкина С. Б., Куликов В. И., Родионов В. Н.** О накоплении нарушенности горного массива при массовых взрывах на карьерах // Геоэкология. — 2004. — № 1. — С. 76–81.
9. **Кочарян Г. Г., Горюнов Б. Г., Кабыченко Н. В., Павлов Д. В., Свинцов И. Г.** Сейсмический фон и диагностика блочной среды // Физические процессы в геосферах: их проявление и взаимодействие (геофизика сильных возмущений); сб. науч. тр. — М.: ИДГ РАН, 1999. — С. 140–145.
10. **Железные руды КМА.** — М.: Геоинформмарк, 2001. — С. 616.
11. **Горбунова Э. М., Беседина А. Н., Кабыченко Н. В., Батухтин И. В., Петухова С. М.** Прецизионный гидрогеологический мониторинг в техногенно-нарушенных условиях: организация, проведение и обработка экспериментальных данных // Сейсмические приборы. — 2021. — Т. 57. — № 2. — С. 62–80 с.
12. **Кочарян Г. Г., Куликов В. И., Павлов Д. В.** О влиянии массовых взрывов на устойчивость тектонических разломов // ФТПРПИ. — 2019. — № 6. — С. 49–58.
13. **Батухтин И. В., Беседина А. Н., Горбунова Э. М., Петухова С. М.** Реакция водонасыщенных коллекторов на проведение массовых взрывов // Сб. ИДГ РАН. — М.: ГЕОС, 2020. — С. 36–45.
14. **Кочарян Г. Г., Золотухин С. Р., Калинин Э. В., Панасьян Л. Л., Спунгин В. Г.** Напряженно-деформированное состояние массива горных пород Коробковского железорудного месторождения на участке зоны тектонических нарушений // ФТПРПИ. — 2018. — № 1. — С. 1–9.

Поступила в редакцию 28/IV 2023

После доработки 05/VI 2023

Принята к публикации 30/VI 2023