

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.235.53; 624.042.7

МОНИТОРИНГ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВОВ НА КАРЬЕРЕ “ШАХТАУ”

А. В. Верхоланцев¹, Р. А. Дягилев¹, Д. Ю. Шулаков¹, А. В. Шкурко²

¹Горный институт УрО РАН,

E-mail: vercholancev@gmail.com, ул. Сибирская 78А, 614007, г. Пермь, Россия

²АО “Сырьевая компания”,

E-mail: gor@bashmrc.ru, ул. Техническая, 8, 453100, г. Стерлитамак, Россия

Представлены результаты мониторинга сейсмического воздействия взрывов, проводимых на карьере “Шахтау” в 2016–2017 гг. Разработана комплексная модель влияния параметров буровзрывных работ и среды на сейсмический эффект на поверхности, позволяющая с высокой точностью прогнозировать его величину в произвольной точке района исследований. Даны оценки погрешностей работы системы инициирования короткозамедленных взрывов. Сделаны выводы о перспективности постоянного мониторинга взрывов в сложных горнотехнических условиях, когда надежность применения нормативных методов оценки сейсмического эффекта недостаточно высока.

Сейсмическая безопасность, сейсмический эффект взрыва, сейсмически безопасное расстояние, грунтовые условия, резонансные эффекты, направленность излучения, прогноз сейсмического воздействия

DOI: 10.15372/FTPRPI20190207

Существенный объем буровзрывных работ (БВР), проводимых на карьере “Шахтау” АО “Сырьевая компания” (г. Стерлитамак, Республика Башкортостан), выполняется в условиях, неблагоприятных с точки зрения сейсмического воздействия на здания и сооружения соседних населенных пунктов. С одной стороны, это связано с обводненностью последнего отрабатываемого горизонта (+127 м), с другой — с близким расположением к карьере самих охраняемых объектов и сложным строением среды, в которой распространение сейсмических волн происходит неравномерно. Сочетание множества факторов, влияющих на сеймику взрывов, иногда приводит к эффектам, которые действующая нормативная база не позволяет оценить достаточно надежно. Поскольку карьер “Шахтау” является основной сырьевой базой для содового и цементного производства в г. Стерлитамак, актуальной задачей становится обеспечение допустимого уровня сейсмического воздействия для сохранности зданий и сооружений.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНОЛОГИИ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ И ОХРАНЯЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

Отработка обводненной части карьера ведется блоками, разбиваемыми короткозамедленными взрывами по сетке 5.5 × 5.0 м, до 12 скважин в блоке. Используются как вертикальные, так и наклонные скважины (угол наклона от горизонтальной плоскости 75°), диаметр их по-

стоянен и составляет 250 мм. Взрыв осуществляется неэлектронной системой инициирования ИСКРА с интервалами замедления 55, 67 и 84 мс. В качестве взрывчатого вещества (ВВ) использовался ЯРИТ-Н, а также заряды, составленные различным соотношением гранулозола и БРТТ. В таких условиях глубина скважин является основной величиной, посредством которой можно регулировать массу одиночного заряда и связанный с ней сейсмический эффект взрыва. Второстепенное влияние среди параметров БВР оказывает порядок инициирования зарядов и величина замедления.

Охраняемые объекты располагаются на удалении 0.4–1.5 км от карьера. Этажность объектов и их состояние — весьма различные, а грунты в основании, несмотря на близкий литологический состав, также проявляют себя по-разному. Определенное влияние на неравномерное распределение сейсмического эффекта оказывает и тот факт, что сами взрывы производятся в скальном массиве погребенного рифа, а охраняемые объекты расположены на рыхлых породах, облегающих данный риф. При этом наблюдаются все возможные варианты взаимного расположения источников и отработанной заполненной водой чаши карьера на пути распространения волн к охраняемым объектам.

Цель настоящей работы — определение параметров комплексной модели, описывающей влияние основных и ряда дополнительных факторов на интенсивность сейсмического воздействия взрывов:

$$V_{\text{пр}} = aR_{\text{пр}}^{-b}\prod_i k_i, \quad (1)$$

где a — эмпирический коэффициент сейсмичности; b — показатель затухания волн; $R_{\text{пр}}$ — приведенное расстояние; $V_{\text{пр}}$ — прогнозная скорость смещения грунта.

Дополнительные факторы (параметры буровзрывных работ, свойства среды в месте взрыва и в пункте наблюдения и др.) представлены в виде произведения коэффициентов k_i , каждый из которых интегрально выражает влияние одного рассматриваемого параметра и количественно описывает его влияние на усиление/ослабление амплитуды колебаний. Такая модель может прогнозировать сейсмический эффект гораздо точнее нормативных способов, а главное, определять оптимальное сочетание всех параметров БВР, обеспечивающее максимально продуктивную и безопасную разработку месторождения, не оказывающую вредного влияния на близлежащие здания и сооружения.

НОРМАТИВНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ВЗРЫВОВ

Общепринятыми критериями сейсмической опасности взрывов являются сейсмически безопасные расстояния и предельно допустимые скорости колебания грунта в основании охраняемых зданий и сооружений [1–7]. Расчет сейсмически безопасных расстояний регламентирован соответствующим документом и основан на формальном выборе интегральных коэффициентов [8]. Опыт натурных измерений на различных горнодобывающих объектах показал, что такой подход пригоден лишь для первичной грубой оценки. Полученные на основании натурных измерений безопасные расстояния могут значительно отличаться от величин, рассчитанных по нормативным требованиям [9].

В случае инструментальных измерений сейсмического эффекта взрывов в качестве нормативного критерия используется максимальная векторная скорость смещения грунта, измеряемая в основании охраняемых зданий и сооружений. Предельно допустимая скорость колебания грунта определяется с учетом разделения объектов по их классу и суммарному рангу [10]. Этот нормативный документ предназначен для выполнения инженерных оценок опасности ава-

рийных взрывов на потенциально опасных объектах и является единственным действующим на данный момент документом, в котором приведены допустимые скорости для различных сооружений.

При оценке опасности сейсмического воздействия на охраняемые сооружения необходимо учитывать важный аспект — резонансные характеристики зданий и грунтов. ГОСТ [11] рекомендует проводить дополнительные измерения на верхних перекрытиях зданий (при высоте их > 12 м) для оценки усиления за счет резонансных эффектов, а РБ Г-05-039-96 данный вопрос не рассматривает. Однако опыт изучения резонансов зданий показывает, что нередко данное явление наблюдается у строений высотой более одного этажа (~ 5 м). Для всех подобных зданий следует проводить дополнительные измерения на верхних этажах, позволяющие выявить резонансы конструкций. Кроме того, нормативные документы не раскрывают вопросы изучения спектральной избирательности колебаний в грунтах, хотя наличие слоев с пониженными упругими модулями может приводить к значительному усилению отклика грунтов на сейсмическое воздействие [12 – 14].

Традиционно объем исследований по оценке сейсмического воздействия заключается в измерениях сейсмического эффекта одного или нескольких взрывов в течение небольшого промежутка времени. Это дает возможность решить главную задачу — измерить сейсмическое воздействие для охраняемых зданий и сооружений, определить допустимость этих величин и вычислить зависимость воздействия от расстояния. Полученная методом наименьших квадратов линейная регрессионная модель позволяет, подбирая массу ВВ, прогнозировать сейсмический эффект [15]. Качество прогноза уровня сейсмического воздействия на конкретном объекте для каждой серии измерений зависит от ряда условий, в связи с чем определить его точность заранее не представляется возможным. Сложные горно-геологические условия карьера “Шахтау”, а также близость населенных пунктов обуславливают необходимость тщательного изучения особенностей формирования и распространения сейсмических волн от взрывов, проводимых на данном карьере.

ПУНКТЫ НАБЛЮДЕНИЙ И АППАРАТУРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Для решения поставленной задачи и постоянного контроля уровня сейсмического воздействия на территории соседних с карьером населенных пунктов (пп. Шахтау и Восток) установлено несколько стационарных сейсмических станций (с/с) на базе трехкомпонентных датчиков MTSS-1003 и регистраторов Байкал-8. Общая схема расположения пунктов наблюдения приведена на рис. 1. Местоположения сейсмических станций на исследуемой территории выбирались с учетом азимута и удаленности от источника таким образом, чтобы иметь возможность получать информацию в широком диапазоне расстояний и учитывать азимутальную анизотропию затухания волн. Наличие сейсмических станций в непосредственной близости к месту ведения взрывных работ обусловлено необходимостью контроля применяемых систем инициирования, точность работы которых, как показали наблюдения [9], не всегда соответствует паспортным характеристикам. Кроме наблюдений с использованием стационарных станций, часть измерений выполнялась во временных пунктах аналогичным оборудованием. Дополнительно для изучения влияния грунтовых условий и получения резонансных характеристик колебаний грунта проведены измерения способом Накамуры и по методу спектрального анализа поверхностных волн SASW [16 – 18].

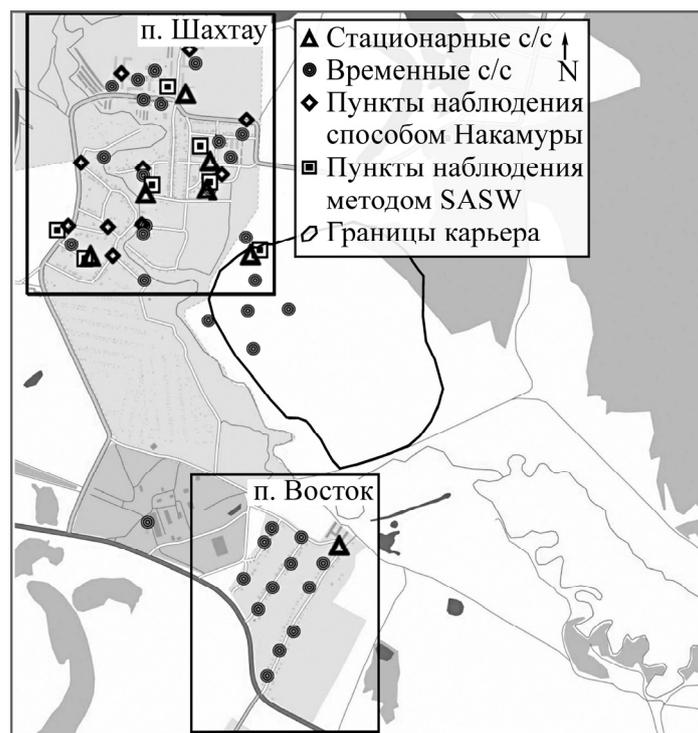


Рис. 1. Схема расположения пунктов наблюдения в районе карьера “Шахтау”

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ

Большое количество пунктов наблюдения и взрываемых блоков, в том числе специально организованных взрывов одиночных скважин, проведенных за период 2016–2017 гг., позволило получить значительный объем фактического материала в широком диапазоне эпицентральных расстояний, а также сформировать представительные выборки из взрывов, где в качестве переменной можно выделить только один из параметров БВР (например, тип ВВ, максимальная масса заряда, интервал замедления или количество скважин в блоке), а остальные остаются константами.

Для систематизации, обработки и анализа получаемых данных разработан специальный программный продукт — система учета и планирования взрывных работ на горнодобывающих объектах Blast Manager [19]. Система предназначена для создания базы исходных данных с удобным интерфейсом, позволяющим задать все параметры буровзрывных работ (время взрыва, координаты скважин и их параметры, масса ВВ и длина зарядов, тип ВВ, тип взрыва, тип взрываемых пород и др.), свойства охраняемых объектов (пространственное положение, класс, ранг, грунты в основании и их частотные характеристики и др.) и измерить величину основных характеристик сейсмических волн (максимальная амплитуда, преобладающая частота, время прихода волн от разных зарядов, углы поляризации волн и др.). В качестве основного критерия сейсмической опасности выступает предельно допустимая скорость колебания грунта в основании охраняемых сооружений, которая определяется с учетом разделения объектов по их классу и суммарному рангу согласно классификации [10].

Аналитическая часть системы позволяет определять параметры затухания волн, оценивать усиление грунтов, делать различные выборки из базы исходных данных для их анализа сторонними средствами. Также есть возможность моделировать волновые формы короткозамедленных взрывов, опираясь на записи одиночных (эталонных) взрывов. Такой функционал поз-

воляет еще на этапе проектирования взрыва определить диапазон замедлений, обеспечивающих минимальный сейсмический эффект. В конечном итоге система дает возможность заранее спланировать и оптимизировать параметры БВР для конкретного блока таким образом, чтобы все объекты на охраняемой территории не испытывали сверхнормативных нагрузок.

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Степень влияния на сейсмический эффект большинства значимых факторов удалось оценить в результате статистической обработки большого количества взрывов (более 300). Для анализа использовался параметр $dV = V_{\text{факт}} - V_{\text{ож}}$, характеризующий отклонение фактически измеренных скоростей смещения $V_{\text{факт}}$ от ожидаемых значений, расчет которых учитывал только среднюю скорость убывания амплитуды волны с расстоянием. На рис. 2 приведены гистограммы распределения параметра dV , построенные для различных наборов данных, в которых переменной является только анализируемый фактор. Сравнение полученных пар распределений для типа ВВ, интервалов замедления и количества скважин в блоке говорит об отсутствии статистически значимого влияния рассматриваемых факторов. Отклонения dV для разных наборов, выявленные в долговременных пунктах наблюдения, незначительны. При этом максимумы распределения самих отклонений dV практически совпадают. Незначительный сдвиг в сторону завышения ожидаемых (прогнозных) значений наблюдается лишь для распределений dV (рис. 2в), характеризующих взрывы в блоках, в которых количество скважин ≤ 10 .

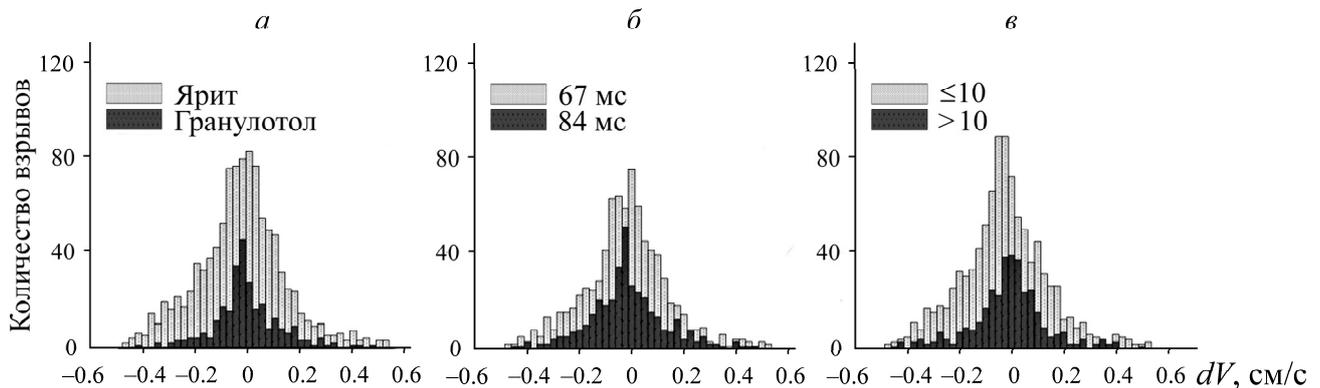


Рис. 2. Гистограммы распределения отклонений сейсмического эффекта от ожидаемых значений для разных типов ВВ (а), интервалов замедлений (б) и количества скважин во взрываемом блоке (в)

Важным моментом в изучения сейсмического воздействия короткозамедленных взрывов является оценка качества работы системы инициирования. Такая необходимость связана с частыми отклонениями фактических замедлений, обеспечиваемых системой инициирования, от паспортных (номинальных) [9, 20]. Оценку работы системы можно проводить по сейсмическим записям взрывов на пунктах, расположенных на минимальном удалении от взрывающего блока и обеспечивающих четкое выделение импульсов от инициации отдельных зарядов. Благодаря большому количеству зарегистрированных взрывов, удалось собрать внушительную статистику по работе системы инициирования ИСКРА, которая применяется на карьере “Шахтау”. С ее помощью за время наблюдений проведена взрывная отбойка более 100 блоков. Общая статистика отклонений фактических интервалов замедления от номинальных (паспортных) представлена ниже:

Отклонение dT , мс	Количество блоков, %
≤ 5	62
≤ 10	26
≤ 15	5
≤ 20	5
≤ 25	1
> 25	1

В общем числе почти 88 % взрывов сработали с отклонениями во времена инициирования не более 10 мс. Работа системы инициирования ИСКРА признана условно удовлетворительной, однако даже незначительные отклонения могут существенно влиять на синфазное наложение волн, что существенно затрудняет анализ влияния факторов и реализацию прогноза.

Учет эффекта направленности сейсмического излучения $k_{dir}(\alpha)$ требуется в связи с возможным увеличением сейсмического эффекта при совпадении направления инициирования с направлением на охраняемый объект. Влияние данного фактора определялось по отношению $V_{факт} / V_{ож}$, характеризующему отклонение фактически измеренных скоростей смещения от ожидаемых значений. Распределение этого отношения построено относительно угла α , определяющего разницу азимутов инициирования и направления на охраняемый объект (рис. 3).

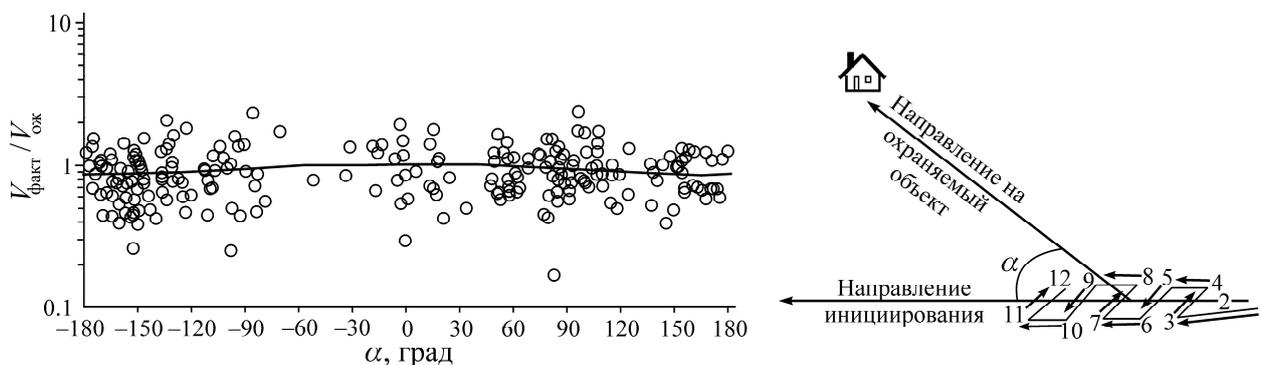


Рис. 3. Влияние направления инициирования зарядов на сейсмический эффект

Общая тенденция усиления сейсмического эффекта, выявленная по результатам аппроксимации отношения $V_{факт} / V_{ож}$ косинусной функцией, наблюдается при $\alpha = 0$, когда направление инициирования совпадает с направлением на охраняемый объект. Амплитуда косинусоиды говорит о наличии влияния исследуемого фактора $k_{dir}(\alpha)$ на уровне 7 %. Отметим, что случайные отклонения от этой линии имеют намного бóльшие значения, что делает фактор направления инициирования зарядов взрываемого блока малозначимым в условиях изучаемого объекта.

Иначе обстоит дело с влиянием фактора грунтовых условий $k_{gr}(x, y)$. Под грунтовыми условиями понимается совокупность геоморфологических, литологических, гидрогеологических и физико-механических характеристик, влияющих на амплитуду и частотный состав проходящей сейсмической волны. Как показали наблюдения, грунты оказывают значительное влияние на уровень сейсмического воздействия на изучаемой территории, несмотря на схожий литологический состав в разных точках исследуемой территории.

Изучение спектральных (резонансных) характеристик грунтов на объекте выполнялось комплексом подходов [21 – 23]. В его основе лежит способ расчета усиления по отклонениям измеренных фактических амплитуд от средних ожидаемых, заключающийся в одновременной

регистрации взрывов на исследуемом и опорном пунктах. Эта информация дополняется данными об усилениях, полученных способом Накамуры, базирующимся на расчете H/V -спектров [16]. Для калибровки полученных коэффициентов усиления применялся способ аналитического расчета резонансных характеристик грунтов, основанный на частотно-скоростной дисперсии поверхностных волн — метод SASW [17, 18].

Полученная в итоге карта пространственного распределения усилений грунтами (рис. 4) на охраняемой территории в целевом частотном диапазоне позволяет сделать вывод о существенной латеральной изменчивости грунтовых условий: значения коэффициента $k_{gr}(x, y)$ изменяются в пределах 0.6–2.2.

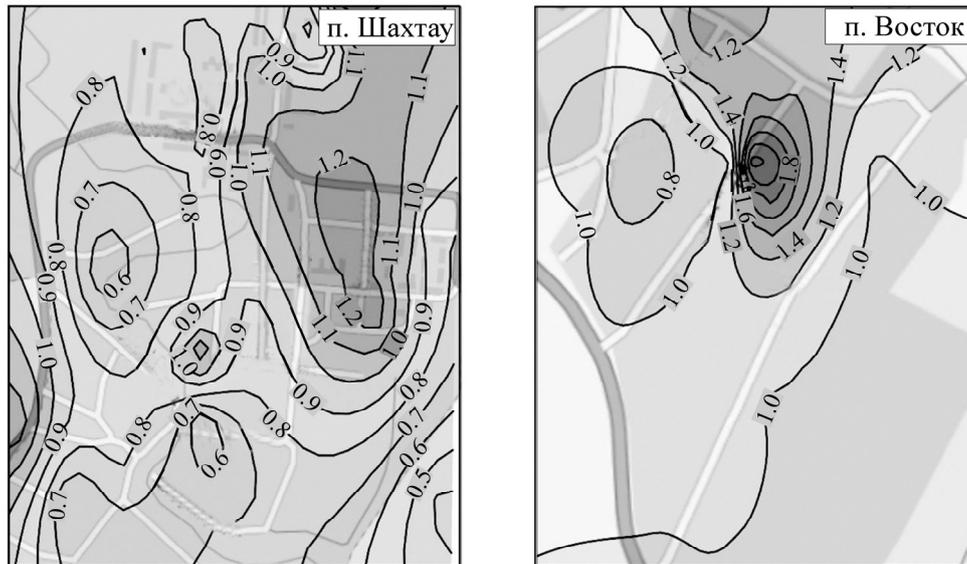


Рис. 4. Карта пространственной изменчивости коэффициентов резонансного усиления грунтами для сейсмических воздействий в диапазоне 2–17 Гц

ПРОГНОЗ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Для выполнения корректного прогноза сейсмического воздействия получена зависимость вида (1), учитывающая, кроме констант a и b , единственный значимый дополнительный фактор — коэффициент латеральной изменчивости грунтовых условий $k_{gr}(x, y)$ и приведенное расстояние $R_{пр}$, которое из-за относительно больших интервалов замедления (55 мс и больше) рассчитывалось через максимальную массу заряда Q_{max} и эпицентрального расстояние R в соответствии с формулой

$$R_{пр} = RQ_{max}^{-1/3}. \quad (2)$$

Общая для всей охраняемой территории зависимость скорости смещения от приведенного расстояния по данным всех взрывов представлена на рис. 5. Она построена по данным всех пунктов наблюдения 2016 и 2017 гг., расположенных в пп. Шахтау и Восток. Пункты наблюдения на территории карьера из расчетов исключены, поскольку данная зона охраняемой территорией не является и ввиду малого расстояния характеризуется другими параметрами затухания сейсмической волны. Из рис. 5 видно, что точки образуют почти равномерное распределение в диапазоне приведенных расстояний от 70 до 160 м/кг^{1/3}. Менее представительны данные в диапазоне 160–300 м/кг^{1/3}, однако это не критично, так как приведенные расстояния имеют слабый уровень сейсмического воздействия.

Среднеквадратическое отклонение от аппроксимирующей функции составило ± 0.22 см/с. Причиной разброса амплитуд сейсмических волн от разных взрывов может быть не только влияние рассматриваемых факторов. На сейсмический эффект влияют также случайные и непрогнозируемые характеристики источника взрыва (степень трещиноватости взрываемого блока, качество забойки, точность работы системы инициирования).

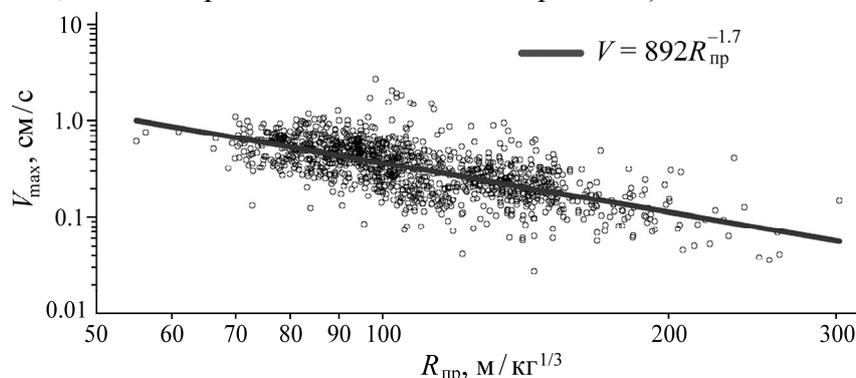


Рис. 5. Зависимость скорости смещений от приведенного расстояния в условиях п. Шахтау и п. Восток

Полученные данные позволили с помощью формулы (1) выполнять прогноз максимальной скорости смещения для заданных параметров БВР в любой точке исследуемой территории с высокой точностью. Использовались постоянные коэффициенты $a = 892$ и $b = 1.7$ и пространственно зависимый $k_{gr}(x, y)$. Проверка точности прогноза осуществлялась в ходе нескольких тестовых взрывов, проведенных в разных частях карьера. Получено 95 % соответствие прогнозных оценок в пределах заданной заказчиком погрешности (± 0.2 см/с для диапазона расстояний 300 – 1000 м и ± 0.1 см/с на расстояниях 1000 – 1500 м).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты инструментального контроля сейсмического воздействия взрывных работ в режиме мониторинга позволяют сделать главный вывод о том, что многообразие геологических и горнотехнических условий не может дать точный прогноз амплитуды сейсмической волны на основании одних лишь априорных данных. В случаях, когда уровень воздействия близок к предельно допустимым, необходимо тщательное изучение сейсмического эффекта взрывов в конкретных условиях. Решив задачу корректного прогноза ожидаемой интенсивности сейсмического воздействия взрывов, проводимых на карьере “Шахтау” АО “Сырьевая компания”, перспективным представляется детальное изучение сейсмического воздействия в спектральной (частотной) области. Известно, что наиболее опасными для охраняемых зданий и сооружений и менее комфортными для населения считаются низкие частоты до 10 Гц. Такие частоты в основном связаны с распространением поверхностных волн, которые обладают относительно низкой скоростью затухания амплитуды с расстоянием. Найдя ответ на вопрос, от чего зависит частота приходящих сейсмических волн, появляется возможность частичного управления их спектральным составом через параметры взрыва. Это позволит значительно улучшить эффективность проводимых буровзрывных работ и снизить негативное действие сейсмических волн.

Изучение сейсмического воздействия в режиме мониторинга позволило также объяснить ошибки, возникающие при расчете прогнозных величин $V_{пр}$ с использованием традиционного подхода (фиксированные значения коэффициентов a и b). До проведения мониторинга неодно-

кратно отмечался существенный разброс величины сейсмического воздействия в одних и тех же пунктах наблюдения при производстве взрывов в соседних блоках. Для изучения вариаций амплитуды сейсмической волны выполнен расчет параметра затухания отдельно для каждого взрыва с момента начала наблюдений. В расчете задействованы замеры максимальных скоростей смещений со стационарных сейсмических станций, установленных в п. Шахтау (рис. 1). Использование именно этих пунктов обусловлено необходимостью сохранения преемственности результатов, поскольку только они непрерывно работают с начала мониторинговых наблюдений. Для каждого взрывающегося блока строилась зависимость скорости смещения от приведенного расстояния, которая аппроксимировалась степенной функцией вида $V = aR_{пр}^{-b}$.

Выполненный расчет параметров затухания для всех зарегистрированных взрывов показал, что коэффициент b в (1), отвечающий за скорость убывания амплитуды с расстоянием, испытывает существенные изменения при производстве взрывов в разных частях карьера (рис. 6). Такое явление может быть связано с контрастным изменением физических свойств среды, через которую распространяются волны по мере смещения фронта работ от центра карьера к его периферии. В пользу данного предположения говорит геологическое строение месторождения, представляющее собой погребенный риф.

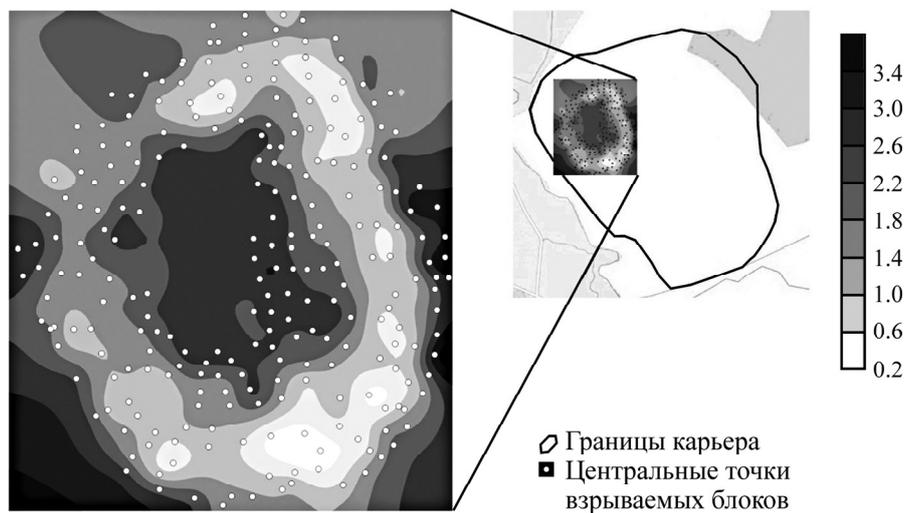


Рис. 6. Карта распределения коэффициента затухания сейсмических волн в зависимости от местоположения отработанного блока

Установлено, что ошибки в прогнозе сейсмического эффекта частично связаны с пространственной вариацией коэффициента b . Дальнейшее повышение точности прогноза возможно именно за счет изучения этого явления и определения закономерности изменения параметра затухания.

ВЫВОДЫ

Инструментальными наблюдениями за взрывными работами, проводимыми на карьере “Шахтау” АО “Сырьевая компания”, определены основные параметры буровзрывных работ как факторы, влияющие на интенсивность сейсмического воздействия взрывов. Данные, основанные на обработке записей более 300 взрывов, дали возможность сделать вывод об отсутствии статистически значимого влияния ряда рассматриваемых факторов в данных условиях. Комплекс работ по изучению спектральных (резонансных) характеристик грунтов выявил су-

ущественную латеральную изменчивость грунтовых условий на исследуемой территории. Данные о пространственной изменчивости коэффициентов резонансного усиления грунтами смогли существенно улучшить прогнозные оценки сейсмического воздействия взрывов. Двухлетние непрерывные наблюдения в режиме мониторинга выявили ранее не замеченный эффект — пространственную вариацию закона затухания сейсмических волн.

Большой объем данных потребовал нового подхода к систематизации и обработке всей информации. Разработанное программное обеспечение — система учета и планирования взрывных работ на горнодобывающих объектах Blast Manager — позволяет не только систематизировать и обрабатывать сопутствующую информацию, но и выполнять расчет ожидаемого сейсмического эффекта, а также выдавать рекомендации по параметрам взрыва с учетом местных особенностей затухания сейсмических волн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин В. В., Спивак А. А. Подземные взрывы. — М.: Наука, 2007. — 585 с.
2. Богацкий В. Ф., Фридман А. Г. Охрана инженерных сооружений и окружающей среды от вредного действия промышленных взрывов. — М.: Недра, 1982. — 162 с.
3. Медведев С. В. Сейсмика горных взрывов. — М.: Недра, 1964. — С. 188.
4. Мосинец В. Н. Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах. — М.: Недра, 1976. — 271 с.
5. Садовский М. А. Избранные труды. Геофизика и физика взрыва. — М.: Наука, 1999. — 335 с.
6. Цейтлин Я. И., Смолий Н. И. Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов. — М.: Недра, 1981. — 192 с.
7. Фадеев А. Б. Дробящее и сейсмическое действие взрывов на карьерах. — М.: Недра, 1972. — 133 с.
8. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности “Правила безопасности при взрывных работах”. — М.: Норматика, 2016. — 172 с.
9. Верхоланцев А. В., Шулаков Д. Ю. Оценка сейсмического влияния буровзрывных работ на поверхностные здания и сооружения // Геофизика. — 2014. — № 4. — С. 40–45.
10. РБ Г-05-039-96. Руководство по анализу опасности аварийных взрывов и определению параметров их механического действия. — М.: НТЦ ЯРБ Госатомнадзора России, 2000.
11. ГОСТ Р 52892-2007. Вибрация и удар. Вибрация зданий. Измерение вибрации и оценка ее воздействия на конструкцию. — М., 2007. — 32 с.
12. Заалишвили В. Б. Зависимость спектральных характеристик сейсмических волн от строения верхней части разреза // Геология и геофизика Юга России. — 2014. — № 4. — С. 15–44.
13. Кендзера А. В., Семенова Ю. В. Влияние резонансных и нелинейных свойств грунтов на сейсмическую опасность строительных площадок // Геофиз. журн. — 2016. — Т. 38. — № 2. — С. 3–18.
14. Bonnefoy-Claudet S., Cotton F., and Bard P.-Y. The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies, A Literature Review, Earth Sci. Rev., 2006, Vol. 79. — P. 205–227.
15. Новиньков А. Г., Протасов С. И., Самусев П. А., Гукин А. С. Статистическая надежность прогнозирования пиковой скорости колебаний при массовых промышленных взрывах // ФТПРПИ. — 2015. — № 5. — С. 50–57.
16. Nakamura Y. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground, QR RTRI, 1989, Vol. 30. — P. 25–33.
17. Nazarian S. and Stokoe K. H. In situ shear wave velocities from spectral analysis of surface waves, proc. of the 8th World Conf. on Earthquake Engineering, Prentice-Hall, Inc, New Jersey, Englewood Cliffs, 1984, Vol. III. — P. 31–38.

18. **Xia J., Miller R. D., and Park C. B.** Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh wave, *Geophysics*, 1999, Vol. 64, No. 3. — P. 691–700.
19. **Дягилев Р. А.** Blast Manager. Программа расчета оптимальных параметров буровзрывных работ по уровню сейсмического воздействия на здания и сооружения. Свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2018610154 от 09.01.2018.
20. **Опарин В. Н., Юшкин В. Ф., Пороховский Н. Н., Гришин А. Н., Кулинич Н. А., Рублев Д. Е., Юшкин А. В.** О влиянии массового взрыва в карьере строительного камня на формирование спектра сейсмических волн // ФТПРПИ. — 2014. — № 5. — С. 74–89.
21. **Верхоланцев А. В.** Методика оценки грунтовых условий // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: материалы 10-й Междунар. сейсмол. шк. “Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных”. — Обнинск: ГС РАН, 2015. — С. 63–65.
22. **Верхоланцев А. В.** Сравнительная оценка основных методов сейсмического микрорайонирования // Стратегия и процессы освоения георесурсов: материалы ежегодной научной сессии ГИ УрО РАН по результатам НИР в 2009 г. — Пермь, 2010. — С. 171–173.
23. **Верхоланцев А. В.** Влияние локальных факторов на результаты сейсмического микрорайонирования // ГЕОФИЗИКА-2009: материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. молодых специалистов. — СПбГУ, ЕАГО. — СПб., 2009. — С. 118–119.

Поступила в редакцию 30/X 2018

После доработки 15/I 2019

Принята к публикации 26/III 2019