

СЕЙСМИКА ВЗРЫВНЫХ РАБОТ МОСМЕТРОСТРОЯ

А.В. Адушкин, А.И. Гончаров, В.И. Куликов

В работе рассматриваются типичные сейсмические сигналы, излучаемые при взрывной проходке тоннелей Московского метрополитена. Показаны особенности этих сейсмозрывных волн, обусловленные технологией буровзрывных работ метро-строения. Определен сейсмический эффект этих взрывов (коэффициент сейсмичности) и энергетический класс таких взрывов. Получена оценка интенсивности сейсмического воздействия буровзрывных работ на застройку и инфраструктуру города. Обсуждаются признаки идентификации взрывных работ в метро как сейсмических событий.

Введение

Станции метрополитена, пересадочные узлы и перегонные тоннели, так называемого глубокого залегания (в Москве это 64 м от дневной поверхности), про-

ходят в известняках с прочностью на сжатие 60–90 МПа. Проходку в столь крепких горных породах ведут исключительно взрывным способом. Как правило, над строящимися тоннелями метро размещены производственные сооружения, культурные центры, городская жилая застройка и элементы городской инфраструктуры, которые при проведении взрывных работ подвергаются воздействию сейсмозврывных волн. Сейсмическое воздействие на сооружения и инфраструктуру города может приводить к их повреждению, что увеличивает капитальные затраты строительства метрополитена. Применяемая в настоящее время технология короткозамедленного взрывания позволяет снизить сейсмозврывное воздействие этих работ, однако полностью исключить негативное сейсмическое воздействие взрывов на город не удастся. Фактически постоянно ведущиеся взрывные работы по проходке новых тоннелей метрополитена представляют единственную реальную сейсмическую опасность для Москвы. Поэтому важно получить объективную оценку интенсивности сейсмического воздействия этих взрывных работ на город.

С другой стороны, промышленные взрывы Метростроя – это сейсмические события, эпицентры которых находятся на территории города. Естественно, что всем, кто занимается сейсмическим мониторингом Москвы, полезно знать энергетический класс этих событий, а также особенности сейсмограмм таких взрывов, возможности их регистрации и идентификации сейсмическими станциями города.

Технология буровзрывных работ Метростроя

И волновые формы, и интенсивность сейсмического воздействия взрывов определяются технологией ведения буровзрывных работ. Взрывные работы ведутся при проходке наклонных эскалаторных входов-выходов, станционных и перегонных тоннелей. Первые представляют собой выработки цилиндрической формы диаметром 10 м и наклоном 30°, станционные тоннели горизонтальные и имеют диаметр 9,5 м, перегонные – 7,5 м. Взрываемые породы представлены известняками и глинами, которые относятся к III–IV категориям горных пород и имеют крепость 6–9 по шкале М.М. Протодяконова [Ржевский, Новик, 1973]. Проходка выработок ведется заходками около 1–1,5 м методом горизонтальных шпуровых зарядов. Заходку проводят в два приема (два взрыва), сначала в верхнем уступе сечения горной выработки, позднее – в нижнем. На рис. 1 для примера показан забой горной выработки диаметром 10 м, черные кружки на рисунке – шпуры диаметром 42 мм и глубиной около 1,6 м (этот взрыв был осуществлен 13.11.2009 г. при строительстве наклонного хода станции «Чистые пруды»). Общее число шпуров составляло 56. В шпуры помещались патронированные заряды аммонита 6ЖВ диаметром 32 мм. Забойка зарядов производилась глиной. При данном взрыве суммарная мощность взрыва составляла 19 кг взрывчатого вещества (ВВ). Для снижения сейсмического воздействия взрыва была применена технология короткозамедленного взрывания, для чего в шпуры помещались электродетонаторы с различными номиналами замедлений. Причем, шпуры были разбиты на группы, в каждой из которых номиналы замедлений были одинаковы. Каждая группа – это одна ступень замедления, в которой заряды взрывались одновременно. В Таблице приведены порядковые номера ступеней замедления, число шпуров в каждой ступени, величина замедления в миллисекундах и суммарная масса ВВ в этой

ступени замедления. На рис. 1 шпуры каждой ступени замедления (одной группы) соединены линиями и около них проставлены номера ступеней замедления, соответствующие Таблице.

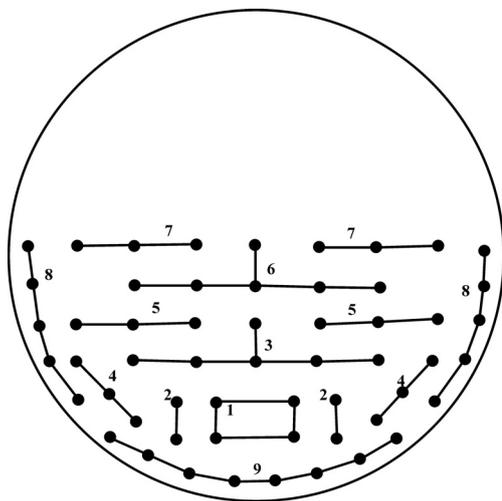


Рис. 1. Схема расположения шпуров в забое.

Таблица

Параметры буровзрывных работ

Порядковый номер ступени замедления	Число шпуров в ступени замедления	Величина замедления, мс	Масса ВВ на ступень замедления, кг
1	4	50	1,2
2	4	100	1,2
3	6	125	1,8
4	6	400	1,8
5	6	600	1,8
6	6	800	1,8
7	6	1000	2,2
8	10	1500	4
9	8	2000	3,2
Итого	56	—	19

Согласно Таблице на рис. 2 (вверху) построена гистограмма выделения энергии указанного выше взрыва. Технология короткозамедленного взрывания растянула выделение энергии взрыва на 2 секунды. Наибольшая масса ВВ, взрывающаяся одновременно, составила 4 кг.

Практикуется также заходка в один прием (шпуровые заряды сразу во всем сечении выработки). Номиналы замедлений могут отличаться от приведенных в Таблице. При увеличении крепости пород суммарная мощность взрыва может достигать 60 кг ВВ, число ступеней замедления – 20, однако масса ВВ в одной ступени замедления ограничена величиной 4,2 кг (для обеспечения определенного низкого сейсмического воздействия взрыва).

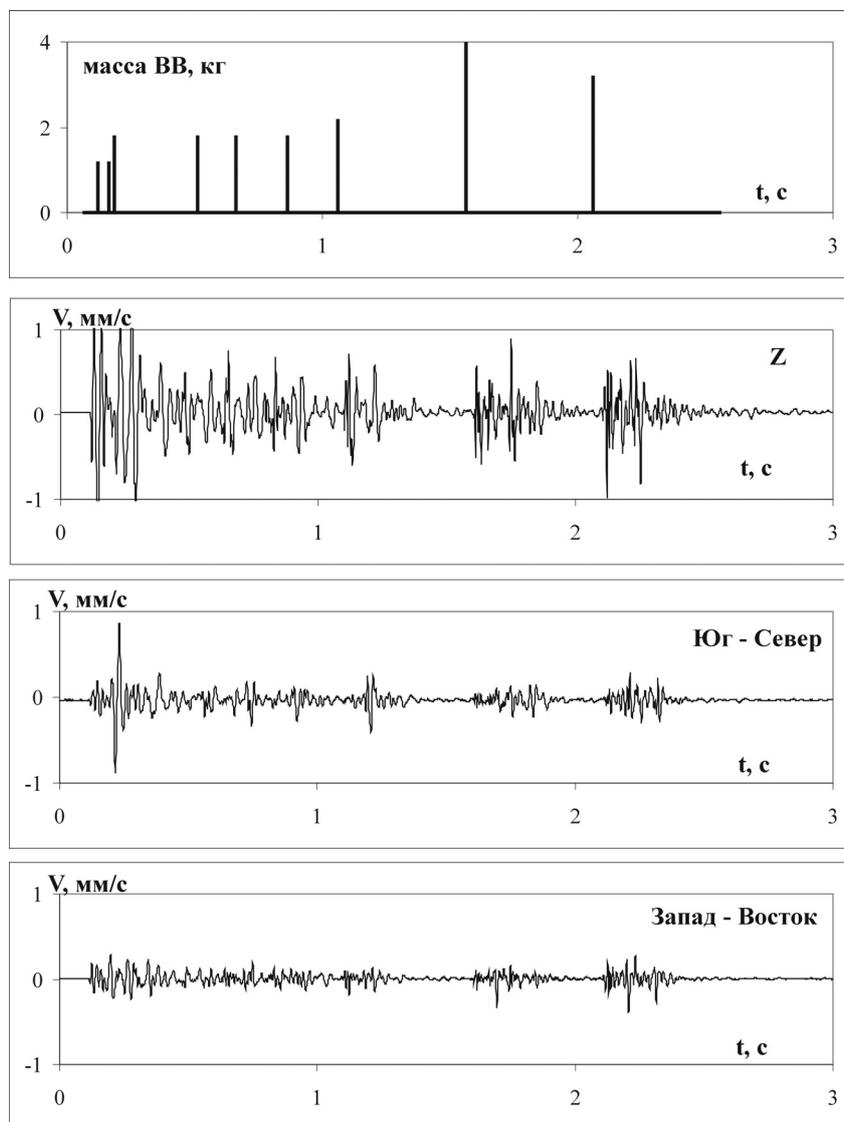


Рис. 2. Гистограмма выделения энергии и велосигаммы колебаний при взрыве 13.11.2009 г.

Методика проведения регистрации сейсмозрывных волн

Регистрация сейсмозрывных волн проводилась на расстояниях от 30 до 650 м от центра взрыва. На расстояниях от 30 до 100 м использовались геофоны GS-20DX. Геофоны были закреплены на забетонированном основании с помощью циакринового клея. В каждом пункте регистрации устанавливались три геофона: один вертикальный и два горизонтальных в направлении Юг-Север и Запад-Восток. Столообразная часть АЧХ геофонов 10–1000 Гц, их чувствительность около 20 В/м/с. Сигналы с датчиков поступали на вход усилителей с коэффициентом усиления 500.

В том случае, когда спектр сейсмического сигнала содержал частоты менее 10 Гц, использовались сейсмоприемники СМ-3КВЭ. Как правило, их устанавливали на расстояниях от 70 до 650 м от гипоцентра взрыва. Эти сейсмоприемники укомплектованы усилителем и полосовым фильтром. Коэффициент преобразования около 4000 В/м/с, частоты среза 0,5 и 80 Гц. В каждом пункте регистрации устанавливалось по три сейсмоприемника.

Сигналы с геофонов и сейсмоприемников поступали на вход четырнадцати разрядного АЦП типа Е-440 фирмы L-Card. Частота оцифровки сигнала составляла 1000 Гц, цена младшего разряда АЦП варьировалась в зависимости от входного напряжения АЦП. При уровне регистрируемых колебаний около 1 мм/с, превышение сигнала над шумом сейсмоприемника – 130 дБ, превышение сигнала над ценой разряда АЦП – 106 дБ. После АЦП сигналы записывались на винчестер ноутбука. В данной работе каналы регистрации работали в режиме непрерывной записи и запускались оператором за час до взрыва. При каждом взрыве регистрация сейсмозврывных волн велась одновременно в трех сеймопунктах на различных расстояниях от центра взрыва.

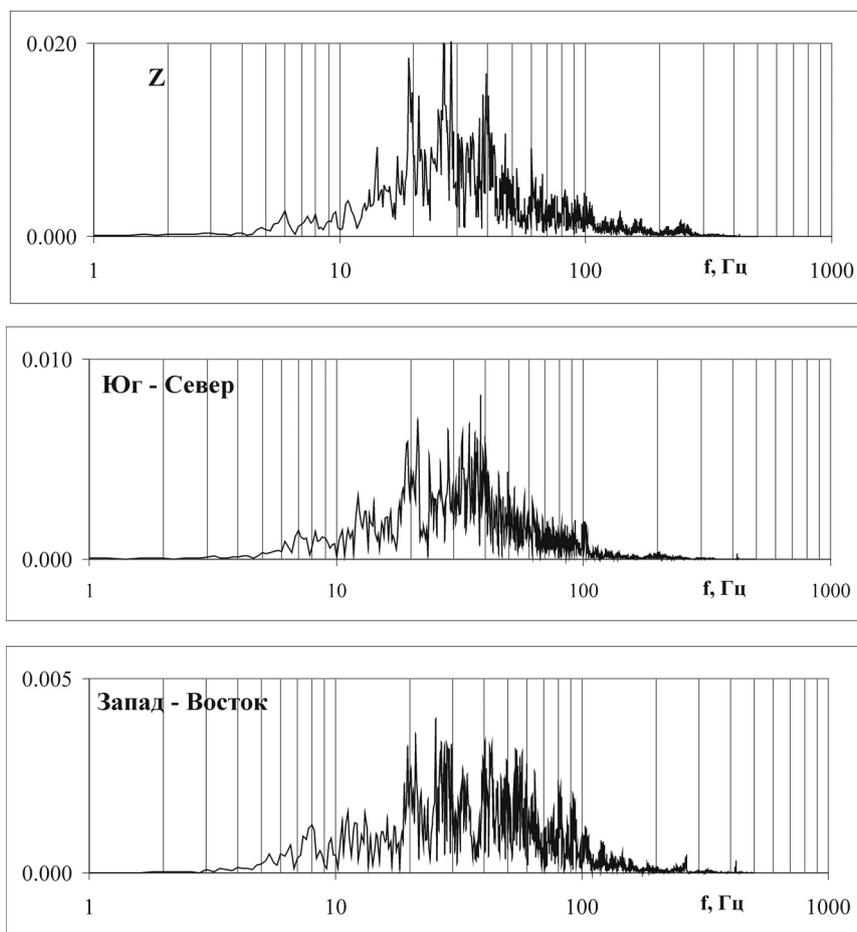


Рис. 3. Амплитудные спектры Фурье велосиграм.

Волновые формы сейсмозрывных волн

На рис. 2 ниже гистограммы показаны велосигramмы вертикальных и горизонтальных колебаний, зарегистрированные на гипоцентральной дистанции 30 м геофонами GS-20DX при взрыве 13.11.2009 г. (проходка эскалаторного входа станции «Сретенский бульвар»).

Из сейсмограмм видно, что продолжительность колебаний составляет около 3-х секунд. Сейсмограмма состоит из ряда цугов колебаний, каждый из которых соответствует взрыву одной ступени замедления. Цуги волн от взрыва ступеней замедления №№ 2 и 3, интервал времени между которыми составлял 25 мм/с, слились в один цуг. Амплитуда вертикальных колебаний больше, чем амплитуда горизонтальных, что характерно для заглубленных взрывов и небольших эпицентральных расстояний. По зарегистрированным сейсмограммам был вычислен вектор скорости колебаний. Максимальная величина вектора скорости колебаний была получена от взрыва ступеней №№ 2 и 3 и составила 1,4 мм/с.

С помощью быстрого преобразования Фурье был рассчитан амплитудный спектр этих велосигramм, который приведен на рис. 3. Из рисунка видно, что в спектре доминируют частоты от 20 до 40 Гц.

Полученный спектр велосигramм был преобразован в спектр смещений и ускорений. После этого обратным преобразованием Фурье были получены сейсмограммы смещений и сейсмограммы ускорений. Максимальное значение смещений – 8 мкм, максимальное значение ускорений – 0,03g.

Рассмотрим примеры сейсмограмм, полученных 23.05.2008 г. при взрывной проходке станционного тоннеля диаметром 8,5 м на станции «Марьина роща». На рис. 4 показана вертикальная велосигramма, зарегистрированная сейсмоприемником СМ-3КВЭ на расстоянии 73 м. Выше велосигramмы приведена гистограмма вы-

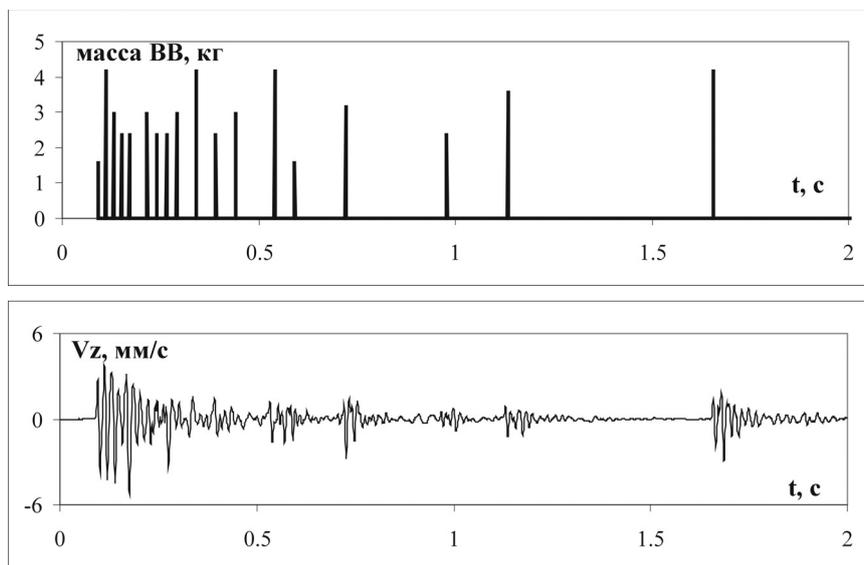


Рис. 4. Гистограмма выделения энергии и велосигramма вертикальных колебаний при взрыве 23.05.2008 г.

деления энергии этого взрыва. Заходка была проведена в один прием (шпуров пройдены во всем сечении выработки). Суммарная мощность этого взрыва – 60,8 кг ВВ, число шпуров – 117, их длина – 1,8 м, число ступеней замедления – 20, время выделения энергии взрыва – 1,7 секунды, максимальная масса в одной ступени замедления 4,2 кг ВВ. Максимальное значение вектора скорости составило 5 мм/с. В спектре велосиграмм доминируют частоты от 5 до 50 Гц.

На рис. 5 показаны гистограмма выделения энергии взрыва и велосиграмма вертикальных колебаний, зарегистрированная 24.04.2008 г. сейсмоприемником СМ-ЗКВЭ на расстоянии 650 м при взрывной проходке стационарного тоннеля станции «Марьяна роща». Заходка проводилась в два приема. Регистрация сейсмограмм проводилась при проходке нижнего приема. Суммарная мощность этого взрыва – 32,6 кг ВВ, число шпуров – 62, их длина – 1,8 м, число ступеней замедления – 12, время выделения энергии взрыва – 1,5 секунды, максимальная масса в одной ступени замедления 4,8 кг ВВ. Максимальное значение вектора скорости колебаний составило 0,32 мм/с. В спектре доминируют частоты от 3 до 20 Гц.

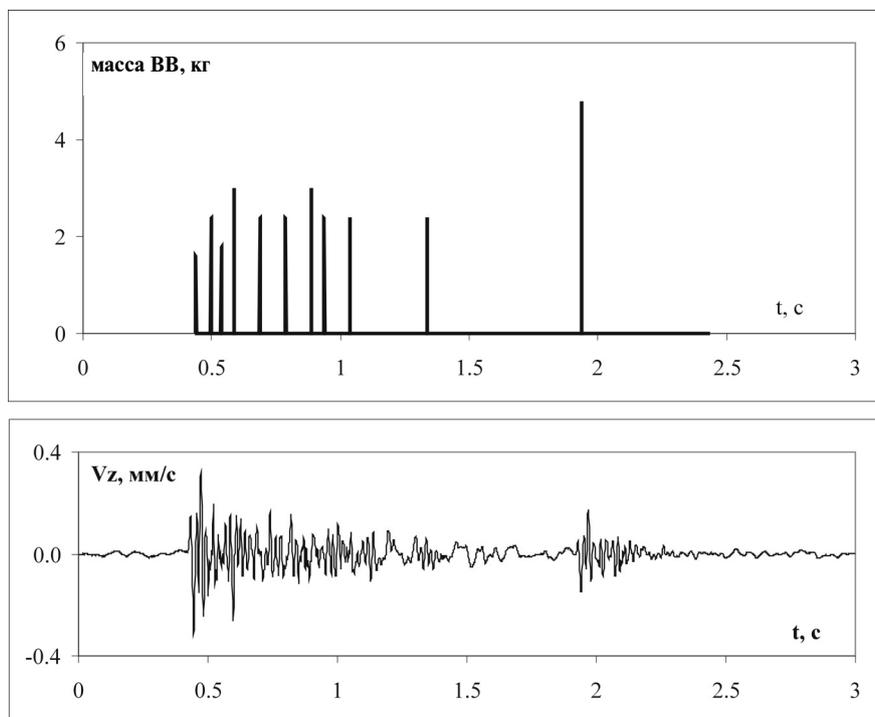


Рис. 5. Гистограмма выделения энергии и велосиграмма вертикальных колебаний при взрыве 24.04.2008 г.

Из сейсмограмм на рис. 4 и 5 видно, что с увеличением расстояний от центра взрыва цуги колебаний от каждой ступени замедления за счет дисперсии, затухания высоких частот и расхождения продольной и поперечных волн «сливаются» в общий цуг колебаний. Но и на расстоянии 650 м сохраняются признаки технологии проведения взрыва, в частности, продолжительность колебаний. На акселерограммах, получаемых из велосиграмм, еще возможно выделение отдельных цугов

от каждой ступени замедления. Аналогичные велосигramмы были зарегистрированы на других расстояниях, в том числе и в эпицентре взрыва.

Отметим некоторые особенности велосигramм. Как показывают рис. 2–5, амплитуда цугов колебаний от различных ступеней замедления не всегда коррелирует с массой ВВ в ступени. По-видимому, это связано с тем, что в некоторых случаях интервал времени между двумя последовательными ступенями слишком мал и происходит суперпозиция цугов колебаний, излучаемых этими ступенями. Только при интервалах 100 и более миллисекунд суперпозиция не наблюдается. Следует также учитывать, что различные ступени «работают» в разных условиях. Первая ступень – это врубовый заряд, который работает в «зажатой» горной породе: условия практически камуфлетного взрыва. В последующих ступенях замедления заряды имеют сбоку разрушенную горную породу, что увеличивает потери энергии продуктов детонации и, следовательно, снижает сейсмический эффект от этих ступеней.

Сейсмический эффект взрывных работ Метростроя

Исследования промышленных взрывов на карьерах (скважинное взрывание) показали, что сейсмический эффект массовых взрывов (максимальная скорость сейсмических колебаний) зависит от эпицентрального расстояния и от массы заряда на одну ступень замедления [Цетлин, Смолий, 1981]. В 2000–2004 гг. при исследованиях массовых взрывов в карьере Лебединского ГОКа специалистами ИДГ РАН была получена усредненная зависимость максимальной скорости колебаний от приведенного эпицентрального расстояния, которая описывается формулой [Гончаров и др., 2006]:

$$V = K \cdot \left(\frac{q^{1/3}}{R} \right)^{1,5} \text{ мм/с} \quad (1)$$

где V – максимальная скорость колебаний в мм/с, q – масса заряда на одну ступень замедления в кг, R – эпицентральное расстояние в м. Коэффициент K в этой формуле получил название коэффициента сейсмичности и он характеризует сейсмический эффект взрыва. Его величина зависит от физико-механических свойств горной породы (прочности, трещиноватости, влажности и т.д.) и условий взрывания (зажатая среда, число обнаженных поверхностей, качество забойки скважин и т.д.) В частности, в приведенной выше зависимости (1) $K = 2050$ [Гончаров и др., 2006]. На этом карьере горный массив представлен железистыми кварцитами с крепостью по М.М. Протоdjаконову около 16–20 и этим объясняется его высокое значение. Эта зависимость приведена на рис. 6 прямой линией.

Зависимость (1) была получена для широкого диапазона скоростей колебаний от 20 до 0,01 мм/с. Из нее следует, что амплитуда сейсмической волны затухает с расстоянием по степени 1,5 и амплитуда пропорциональна корню квадратному из массы заряда в ступени замедления.

Такого рода зависимости (1) используются для расчета сейсмического действия проектируемых взрывов. Как и любую эмпирическую зависимость ее нельзя распространять на различные горные породы. Опыт показывает, что степень затухания 1,5 практически не зависит от типа горных пород, поэтому при обобщении полученных результатов будем полагать, что он сохранится и для взрывов Метростроя, и по результатам регистрации сейсмозрывных волн следует определить

только коэффициент сейсмичности K . При этом, для взрывов в метро вместо эпицентрального расстояния следует оперировать гипоцентральным расстоянием. Для карьерных взрывов эпицентральные и гипоцентральные расстояния тождественны.

На полученных расчетных сейсмограммах величины вектора скорости колебаний были выделены наибольшие амплитуды и по гистограммам определены массы $ВВ$ в соответствующих ступенях замедления. На рис. 6 приведены полученные из сейсмограмм значения величины наибольшего вектора скорости от приведенного гипоцентрального расстояния. Причем, данные, полученные из одной сейсмограммы (обработка проведена для четырех взрывов и четырех различных гипоцентральных расстояний) представлены одинаковыми значками. Количество точек в 3–5 раз меньше, чем число ступеней, потому что выбирались ступени с наибольшими значениями скоростей. Эти данные были описаны усредненной зависимостью с коэффициентом сейсмичности $K = 1000$, которая на рис. 6 показана прерывистой линией. Коэффициент сейсмичности K для взрывов Метростроя в два раза меньше, чем для взрывов в Лебединском карьере. Основная причина более низкого сейсмического эффекта взрывов Метростроя в низкой крепости известняка, вмещающего заряды.

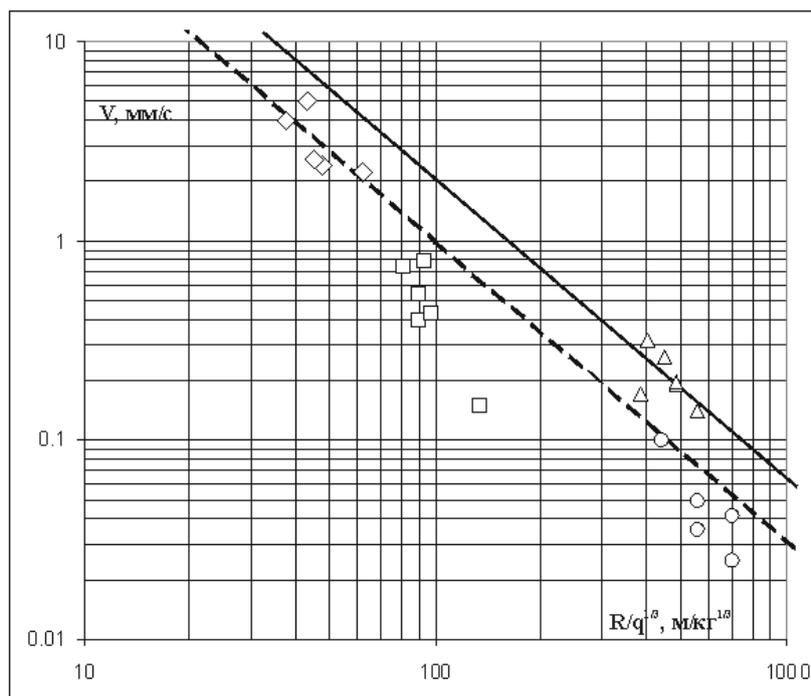


Рис. 6. Зависимость максимальной величины вектора скорости колебаний от приведенного гипоцентрального расстояния.

Интенсивность сейсмического действия буровзрывных работ

Интенсивность сейсмического действия определялась следующим способом. Данные на рис. 6 были обработаны по методу Пирсона [Сафонов, Шкреба, 1970],

Из рис. 7 видно, что максимальная интенсивность сейсмического воздействия 3 балла достигается в эпицентре взрыва в круге радиуса 80 м. В круге радиуса 150 м интенсивность колебаний – 2 балла, в круге радиуса 250 м интенсивность колебаний – 1 балл и вне круга радиуса 250 м интенсивность колебаний меньше 1 балла. Причем, при проходке тоннелей глубокого заложения (глубина 64 м) интенсивность колебаний вообще не превышает 3 баллов.

Хотя, как показали наши исследования, интенсивность сейсмического воздействия буровзрывных работ Метростроя не превышает 3 баллов, следует подчеркнуть, что объекты города подвергаются такому сейсмическому воздействию многократно. Например, 3-балльному воздействию здания могут подвергаться до 160 раз в течение полугода. Эта оценка получается из того, что при каждом взрыве в один прием забой продвигается только на 1 м (величина заходки или продвижения забоя горной выработки), следовательно, изосейста при каждом взрыве передвигается тоже на 1 м. Поэтому здание, попав в круг этой изосейсты, выйдет из этого круга через 160 взрывов. Повторяемость таких сейсмических воздействий может привести к накоплению микроповреждений и макроскопическим последствиям, которые при обычном однократном трехбалльном воздействии не наблюдаются.

Энергетический класс взрывных работ в метро как сейсмических событий

Взрывы при проходке тоннелей метро можно и следует рассматривать как сейсмические события в Московском регионе. Одной из характеристик сейсмических событий является их энергетический класс. Расчет класса проводился по зарегистрированным велосиграммам. Сначала интегрированием велосиграмм вычислялся поток кинетической энергии через единичную площадку. При этом учитывалось, что при выходе волны на поверхность происходило удвоение скоростей. Затем этот поток энергии с учетом степени затухания амплитуды волны согласно формуле (1) с показателем степени $n = 1,5$ пересчитывался с данного гипоцентрального расстояния на референц-сферу радиуса 10 км и умножался на площадь поверхности референц-сферы. Заметим, что интегрирование велосиграмм является принципиальным моментом: никакие эмпирические зависимости, определяющие класс события по амплитуде сейсмической волны, для короткозамедленных взрывов Метростроя не могут дать адекватной оценки класса, о чем свидетельствуют волновые формы, представленные выше.

В результате проведенных расчетов потока энергии через референц-сферу для взрывов Метростроя (для которых выше приведены велосиграммы) получены следующие значения класса: $K = 3,8$ для взрыва с суммарной мощностью взрыва $Q = 32,6$ кг ВВ; $K = 2,87$ для $Q = 15,2$ кг ВВ; $K = 3,11$ для взрыва с массой ВВ $Q = 60,8$ кг. Разброс значений класса оказался менее значительным, чем можно было ожидать в связи с вариацией суммарной мощности взрывов.

Идентификация взрывов в метро

Специалисты, ведущие сейсмический мониторинг территории Москвы, наверняка сталкиваются с сейсмическими сигналами от взрывных работ Метростроя.

Естественно, что сейсмозрывные волны можно увидеть в записях сейсмостанции при условии превышения амплитуды волны уровня микросейсмического фона в месте регистрации. Амплитуду волны можно оценить по зависимости (1) с коэффициентом сейсмичности $K = 1000$ или по эмпирической зависимости, приведенной на рис. 6, при этом для массы ВВ в одной ступени следует брать величину $q = 4,2$ кг (реальная максимальная масса ВВ в одной ступени замедления при взрывных работах Метростроя). Идентификация этих сигналов не вызывает трудностей. Во-первых, в силу спектрального состава велосиграммы эти сигналы могут быть зарегистрированы только короткопериодными каналами. Вторая особенность взрывов в метро как сейсмических событий, их мелкофокусность – глубина фокуса около 64 м. В связи с ограниченной вариацией мощности взрывов в пределах от 16 до 60 кг ВВ класс таких сейсмических событий около $K = 3-4$. Локация эпицентров событий должна показать, что их эпицентры концентрируются на строящихся линиях метро. Исключена случайная миграция эпицентров. Более того, во времени эпицентры будут перемещаться вдоль прямой (направление перегонного или станционного тоннеля) со скоростью перемещения около 1 м/сутки (скорость перемещения забоя). И наконец, регулярность событий, один-два раза в сутки и практически в одно время – около 02 или 14 часов по Московскому времени.

Выводы

1. Зарегистрированы типичные сейсмозрывные волны от буровзрывных работ по проходке станционных и перегонных тоннелей метрополитена.
2. Максимальная интенсивность сейсмического действия взрывных работ Метростроя на застройку города достигает 3-х баллов в радиусе 80 м от центра взрыва.
3. Энергетический класс буровзрывных сейсмических событий не превышает 4.
4. Указаны признаки идентификации сейсмозрывных волн от буровзрывных работ Метростроя.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ о поддержке ведущих научных школ (НШ – 4304.2010.5).

Литература

- Ржевский В.В., Новик Г.Я.* Основы физики горных пород. М.: Изд. Недра, 1973, 286 с.
- Цетлин Я.И., Смолий Н.И.* Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов. М.: Недра, 1981, 192 с.
- Гончаров А.И., Куликов В.И., Минеев В.И., Седоченко В.В.* Сейсмическое действие массовых взрывов на подземных и открытых работах. // Динамические процессы во взаимодействующих геосферах: сб. научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2006, с. 22–33.
- Сафонов Л.В. Шкреба О.П.* Вероятностный метод оценки сейсмического эффекта промышленных взрывов. М.: Наука, 1970, 43 с.
- Медведев С.В.* Сейсмика горных взрывов. М.: Недра, 1964, 188 с.