

## ГЕНЕРАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ВОЗДУШНЫХ, НАЗЕМНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ВЗРЫВАХ

В. В. Адушкин, С. П. Соловьев

Институт динамики геосфер РАН, 119334 Москва, soloviev@idg.chph.ras.ru

Представлены результаты экспериментального исследования электрического и магнитного поля, генерируемого при взрывах зарядов химического взрывчатого вещества в диапазоне частот  $0 \div 10$  кГц. Показано, что характеристики сигналов электрического и магнитного поля, зарегистрированных при взрывах зарядов взрывчатого вещества в воздухе, на поверхности грунта и при подземных взрывах, существенно различаются.

Ключевые слова: электрическое поле, магнитное поле, взрыв, взрывчатое вещество, электромагнитные эффекты, электрический диполь.

### ВВЕДЕНИЕ

В работе представлены результаты наших многолетних экспериментальных исследований электрического и магнитного поля при взрывах зарядов химических взрывчатых веществ (ВВ) в воздухе, на поверхности грунта и при подземных взрывах [1–12]. В Институте физики Земли АН СССР в период 1960–1980 гг. проводился большой объем полевых экспериментальных работ, связанных с исследованием механического действия взрыва. В этот же период времени были начаты исследования электромагнитных эффектов, возникающих при взрывах зарядов ВВ, и это направление исследований было поддержано академиком М. А. Садовским.

Электромагнитные эффекты, сопровождающие взрывы в средах, отличающихся своей структурой и физико-механическим свойствами, имеют различную физическую природу. Частотный диапазон возникающего в этих случаях электромагнитного поля довольно широк: от квазистатических полей до полей мегагерцового диапазона и оптического излучения (инфракрасное, видимое и ультрафиолетовое). Следует отметить, что на данном этапе изучения электромагнитных эффектов при взрыве зарядов ВВ не существует адекватной теории генерации электрического и магнитного поля при взрыве. Рассматривается лишь набор физических механизмов, которые могут привести к генерации электрического и магнитного поля, и на основе этого делаются оценки возможных электромагнитных эффектов. Поэтому на сегодняшний день основным источником сведений об электромагнитных эффектах при взрыве за-

ряда ВВ являются данные экспериментальных исследований, эмпирические зависимости и модели, построенные на базе этих данных.

### ВЗРЫВЫ ЗАРЯДОВ ВВ В ВОЗДУХЕ

Проведение взрывных экспериментов на открытых площадках и использование низкочастотной аппаратуры показало, что возмущения электрического поля наблюдаются вплоть до десятков секунд при взрывах зарядов ВВ массой единицы килограммов. На рис. 1 и 2 представлены записи сигналов электрического и магнитного поля, полученные нами при взрывах заряда ВВ в воздухе на открытой экспериментальной площадке. Видно, что возмущения электрического поля наблюдаются не только после детонации заряда ВВ, но продолжают существовать до  $50 \div 70$  с. Эти низкочастотные возмущения обусловлены наличием объемных электрических зарядов в облаке продуктов взрыва. Следует отметить, что при размещении заряда ВВ на небольшой высоте над грунтами типа супеси воздушная ударная волна поднимает с поверхности грунта мелкие заряженные частицы пыли, которые впоследствии смешиваются с продуктами взрыва и значительно усиливают наблюдаемый эффект. При увеличении высоты установки заряда ВВ влияние частиц пыли, поднятой с поверхности, на эти возмущения практически исчезает.

На рис. 2 представлены записи сигналов электрического и магнитного поля непосредственно после детонации заряда ВВ (время отсчитывается от начала записи сигналов) [8]. Момент подрыва обозначен стрелкой А — сигнал в виде ступеньки генерируется оптическим

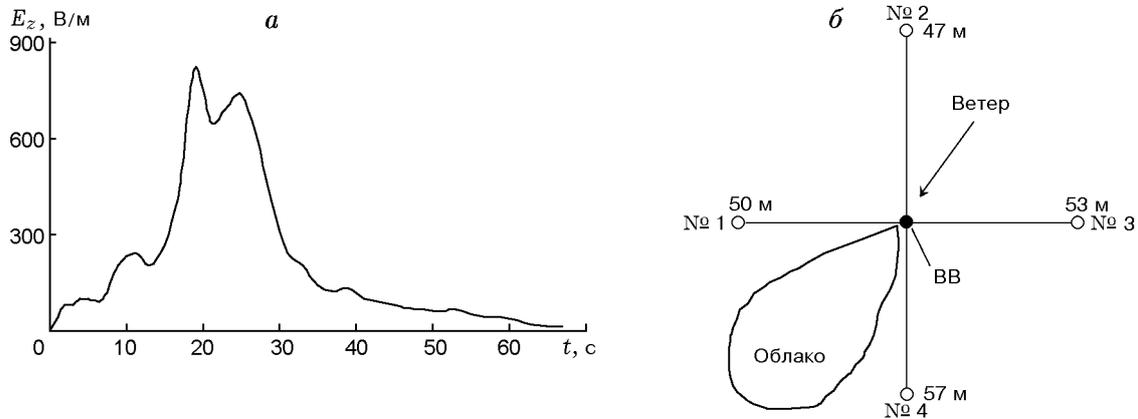


Рис. 1. Возмущения электрического поля при взрыве заряда ВВ массой 0,4 кг в воздухе на высоте 0,9 м над поверхностью грунта (супесь):

*a* — изменение вертикальной составляющей напряженности электрического поля во времени в точке № 1, *б* — схема расположения заряда ВВ и электростатических флюксометров

датчиком, стрелками *B* и *C* обозначены моменты прихода сейсмозрывных волн и воздушной волны взрыва в место установки датчиков поля. Из рис. 2 видно, что возмущения электрического и магнитного поля возникают с небольшой задержкой после детонации заряда ВВ, что было отмечено в работе [13], а также с приходом сейсмических и воздушной волн в место установки датчиков поля [11]. Возмущения электрического и магнитного поля, связанные с распространением сейсмозрывных волн, следует отнести к отдельной группе электромагнитных явлений — так называемых косейсмических явлений [14, 15], и в данной работе они рассматриваться не будут. Заметим только, что на близких расстояниях от заряда ВВ велико механическое воздействие на датчики поля, связанное с сейсмическими волнами и ударной волной взрыва. Поэтому при интерпретации таких сигналов следует учитывать следующие обстоятельства: в датчиках с высокой чувствительностью по полю проявляется так называемый микрофонный эффект (вибрация чувствительных элементов датчика — ферритовых сердечников, приемных пластин электрометра, микросхем, индуктивностей, емкостей и других элементов электрических цепей), а также влияние конструктивных особенностей и способа установки датчиков.

В работах [16, 17] дан обзор экспериментальных результатов, полученных многими исследователями при взрывах зарядов ВВ в воздухе, и приведены характеристики сигналов электрического поля, генерируемых на стадии

расширения продуктов взрыва. В большинстве экспериментальных работ, посвященных изучению генерации электромагнитного поля при воздушных взрывах массой ВВ  $\approx 0,001 \div 5$  кг, основное внимание уделяется сигналам электрического поля в диапазоне частот  $\approx 10^2 \div 10^6$  Гц [16, 18] (на осциллограммах длительность записи не превышает нескольких миллисекунд после детонации заряда ВВ). В ряде работ, цитированных в обзоре [16], сделан вывод о дипольном характере электрического поля. Следует заметить, что в этих работах измерения электрического поля проводились, как правило, в одной или двух точках, расположенных на одном из радиальных направлений от заряда ВВ. Систематические исследования убывания электрического поля с расстоянием от заряда ВВ, проведенные на нескольких экспериментальных площадках, представлены в работе [8]. В экспериментах использовалось 4–7 электрических антенн [19], расположенных на различных расстояниях от заряда ВВ. При взрывах зарядов ВВ массой 2 кг регистрация вертикальной компоненты напряженности электрического поля,  $E_z(t)$ , проводилась на расстояниях  $r = 15 \div 80$  м. Заряды ВВ в большинстве опытов располагались на высоте  $h = 2$  м от поверхности грунта. Сигналы  $E_z(t)$  имели знакопеременный вид, амплитуда сигналов уменьшалась с увеличением расстояния от заряда ВВ, но их форма сохранялась. Зависимости модулей амплитуд сигнала  $E_z(t)$  от расстояния  $r$  можно представить в виде [8]

$$\lg E_z = -a \lg r + b, \quad (1)$$

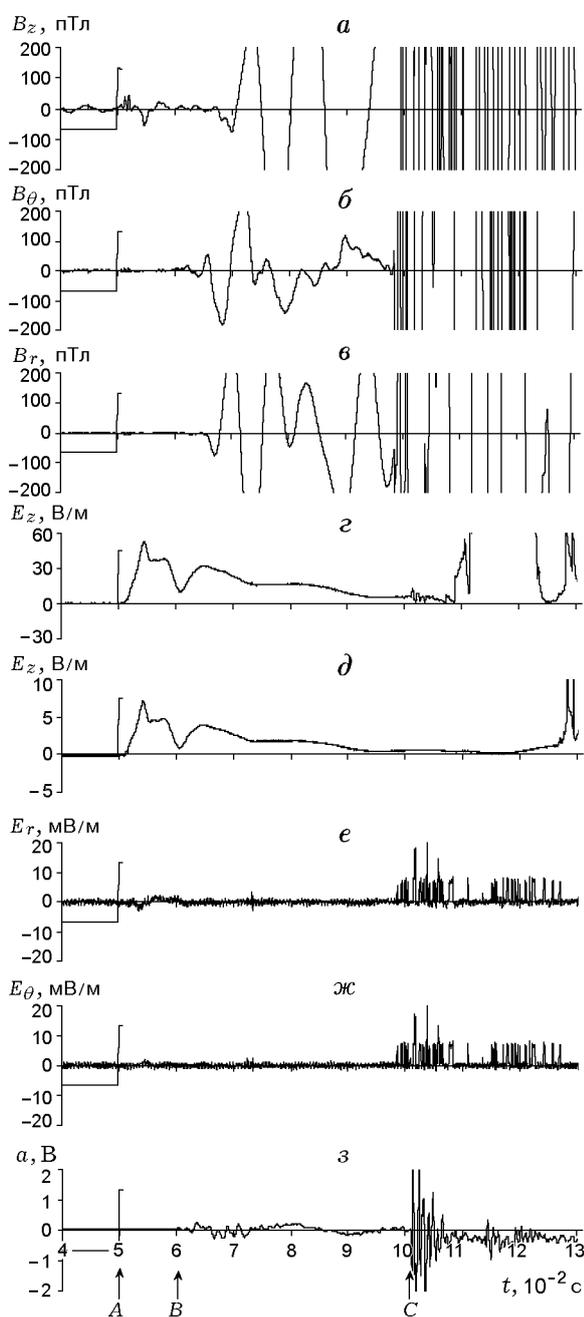


Рис. 2. Сигналы магнитного и электрического поля при взрыве заряда ВВ массой 2 кг в воздухе на высоте 2 м над поверхностью гранита:

*a–в* — компоненты магнитного поля,  $r = 20$  м; *г, д* — вертикальная компонента электрического поля на расстояниях  $r = 20$  и  $30$  м соответственно; *е, ж* — горизонтальные компоненты электрического поля в грунте,  $r = 17,2$  м; *з* — вертикальная компонента ускорения грунта на расстоянии  $21,5$  м от заряда ВВ; стрелка *A* — время подрыва заряда ВВ, *B* и *C* — время прихода сейсмических и акустической волн в место установки датчиков

где  $a$  и  $b$  — эмпирические константы,  $E_z$  измеряется в В/м, а  $r$  — в метрах. Среднее значение константы  $a$ , полученное в серии экспериментов с массой заряда ВВ, равной 2 кг, составляет  $\approx 3,3$ . При этом минимальное значение константы  $a$  равнялось 2,8, а максимальное — 3,8.

Обзор механизмов генерации электрического поля при взрывах зарядов ВВ в воздухе приведен в работах [16, 20]. В них перечислен ряд механизмов генерации электрического поля, связанных с этапами развития процесса взрыва во времени. В настоящее время качественный механизм генерации электрического поля, наиболее полно учитывающий особенности регистрируемых в экспериментах сигналов, базируется на эффектах образования и разделения в пространстве электрических зарядов, сосредоточенных на продуктах взрыва и твердых частицах [16, 18]. Несимметричный разлет продуктов взрыва и твердых частиц приводит к образованию эффективного дипольного момента облака продуктов взрыва. В работе [21] на основе этой модели выполнено численное моделирование генерации электрического поля при взрыве зарядов ВВ массой 3 кг. Дипольный момент вычислялся в приближении осевой симметрии по формулам для однородной среды (без учета зарядов, индуцированных в проводящем грунте) и был направлен вдоль вертикальной оси. Показано, что напряженность электрического поля зависит от двух параметров: радиуса и общего количества пылинок. В случае, когда радиус пылинок равен 9,5 мкм, а их количество соответствует 11,7 % массы заряда ВВ, можно удовлетворительно описать пространственно-временную зависимость электрического сигнала. Следует заметить, что учет лишь вертикальной компоненты электрического диполя приводит к убыванию электрического поля с расстоянием пропорционально  $r^{-3}$ , тогда как в экспериментах электрическое поле в указанном диапазоне расстояний убывает несколько быстрее [8].

### ВЗРЫВЫ ЗАРЯДОВ ВВ НА ПОВЕРХНОСТИ ГРУНТА

Генерация электрического и магнитного поля при взрывах зарядов ВВ на поверхности грунта рассмотрена в работах [4–9]. Во время проведения экспериментов регистрировалась вертикальная составляющая напряженности электрического поля в атмосфере  $E_z(t)$ , горизонтальные компоненты электрического по-

ля  $E_r(t)$  и  $E_\theta(t)$  в грунте и три компоненты индукции магнитного поля  $\mathbf{B}$ . Приход сейсмозрывных волн и воздушной волны взрыва регистрировался с помощью акселерометров, установленных на поверхности грунта.

На рис. 3 представлены записи сигналов электрического и магнитного поля, зарегистрированные непосредственно после детонации заряда ВВ массой 2 кг на поверхности гранита [8, 9]. Из рисунка видно, что сигналы электрического и магнитного поля возникают до прихода сейсмических и акустических волн в место установки датчиков поля, а амплитуды сигналов многократно превосходят средние значения фоновых пульсаций поля. Амплитуда сигналов  $E_z$  в воздухе достигает десятков вольт на метр, а амплитуда сигналов  $E_r$  и  $E_\theta$  электрического поля в грунте составляет десятки милливольт на метр. Характерный период колебаний полей — несколько миллисекунд. Амплитуда компонент  $B_z$ ,  $B_r$  и  $B_\theta$  магнитного поля достигает десятков — сотен пикотесла. В некоторых случаях записи радиальной ( $B_r$ ) и тангенциальной ( $B_\theta$ ) составляющих магнитного поля подобны друг другу.

При проведении взрывов на поверхности грунта, как и в случае взрывов в воздухе, исследовался закон убывания амплитуды вертикальной составляющей электрического поля от расстояния  $r$ . Зависимость амплитуд сигнала  $E_z(t)$  от расстояния  $r$  описывалась соотношением (1). Среднее значение константы  $a$ , полученной по результатам серии опытов с зарядами ВВ массой 2 ÷ 50 кг, составляет  $\approx 4,1$ . Отклонения значений константы  $a$  от среднего довольно велики: минимальное значение равнялось 3,0, а максимальное — 4,6. На расстояниях от заряда ВВ, значительно превышающих размеры облака продуктов взрыва, изменение компоненты  $E_z(t)$  с расстоянием  $r$  удовлетворительно описывается на основе разложения в ряд по мультиполям [9]. Параметры разложения находятся в результате обработки записей сигналов  $E_z(t)$ , полученных в эксперименте, на различных расстояниях от заряда ВВ. На близких расстояниях член, содержащий квадрупольный момент, во многих случаях оказывается преобладающим, но с увеличением расстояния поведение электрического поля определяется дипольным моментом системы электрических зарядов, находящихся в облаке продуктов взрыва. Такой подход позволяет моделировать сигналы электрического поля

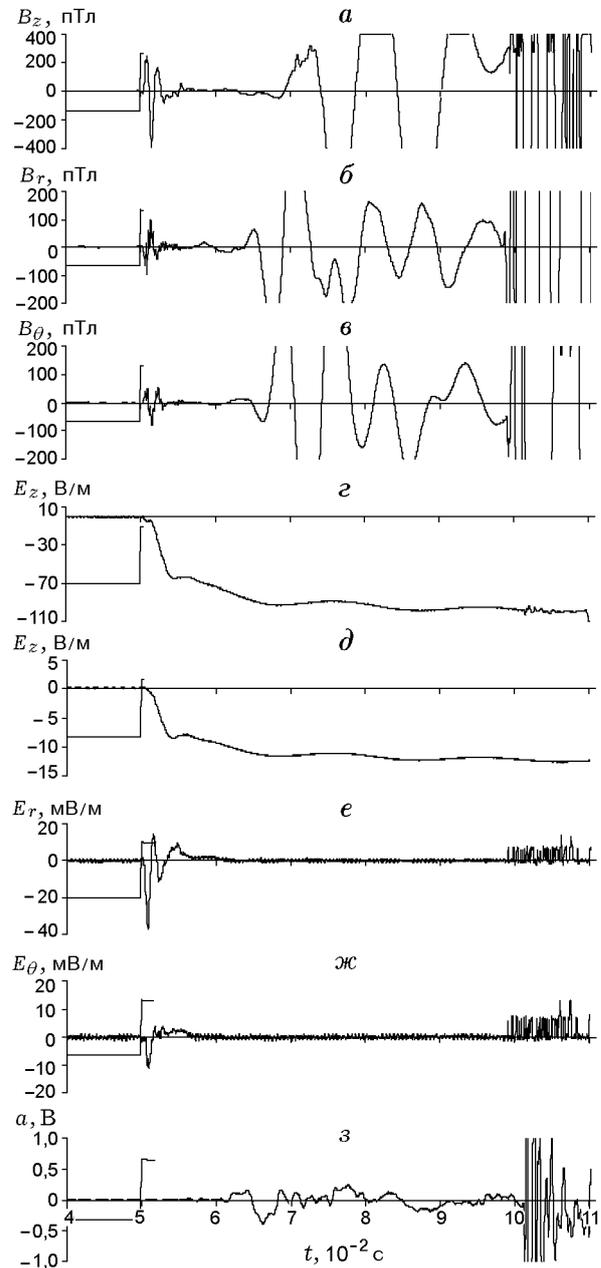


Рис. 3. Сигналы магнитного и электрического поля при взрыве заряда ВВ массой 2 кг на поверхности гранита:

$a$ – $в$  — компоненты магнитного поля на расстоянии  $r = 20$  м;  $г$ ,  $д$  — вертикальная компонента электрического поля на расстояниях  $r = 20$  и 30 м соответственно;  $е$ ,  $ж$  — горизонтальные компоненты электрического поля в грунте на расстоянии  $r = 17,2$  м;  $з$  — вертикальная компонента ускорения грунта на расстоянии  $r = 21,5$  м от заряда ВВ

на начальной стадии взрыва заряда ВВ как при взрыве в воздухе, так и при взрыве на поверхности грунта [8, 9].

Сравнивая сигналы электрического и магнитного поля, генерируемые на начальной стадии взрыва заряда химического ВВ в воздухе и на поверхности грунта, можно сделать следующие заключения.

1. Как при взрыве в воздухе, так и при взрыве на поверхности грунта регистрируются возмущения вертикальной компоненты электрического поля в атмосфере. При взрыве зарядов ВВ массой  $2 \div 5$  кг амплитуды электрических сигналов достигают десятков вольт на метр на расстояниях  $15 \div 25$  м от заряда ВВ. При этом амплитуды сигналов  $E_z(t)$ , регистрируемых на одинаковых расстояниях от заряда ВВ, в случае взрыва на поверхности грунта, как правило, выше, чем при взрыве в воздухе.
2. На начальной стадии взрывов заряда ВВ массой  $2 \div 5$  кг в воздухе и на поверхности грунта характер затухания вертикальной составляющей электрического поля  $E_z(t)$  в диапазоне расстояний  $15 \div 80$  м отличается:  $E_z(t)$  убывает с расстоянием приблизительно пропорционально  $r^{-n}$ , при этом среднее значение  $n$  для взрыва заряда ВВ в воздухе составляет  $\approx 3,3$ , а для взрыва заряда ВВ на поверхности грунта —  $n \approx 4,1$ .
3. При взрывах на поверхности грунта регистрируются возмущения вертикальной компоненты  $E_z$  электрического поля в воздухе, горизонтальных компонент  $E_r$  и  $E_\theta$  электрического поля в грунте и трех компонент магнитного поля. При взрывах в воздухе магнитные возмущения и возмущения компонент  $E_r$  и  $E_\theta$  электрического поля в грунте заметны лишь в отдельных случаях, а при увеличении высоты размещения заряда ВВ возмущения этих компонент поля практически не выделяются среди фоновых пульсаций магнитного и электрического поля.
4. При взрыве на поверхности грунта возмущения всех компонент электрического и магнитного поля возникают практически одновременно, непосредственно после момента детонации заряда ВВ. Амплитуды компонент индукции магнитного поля, зарегистрированные на расстояниях  $15 \div$

25 м от заряда ВВ, составляют десятки — сотни пикотесла и заметно превышают уровень фоновых колебаний магнитного поля.

Сигналы электрического поля, возникающие при взрыве на поверхности грунта на поздней стадии расширения облака продуктов взрыва и в процессе подъема облака в атмосфере, рассмотрены в работах [4, 5, 7]. При проведении серий взрывов на поверхности грунта было обнаружено, что возмущения электрического поля в атмосфере наблюдаются вплоть до тысяч секунд в зависимости от масштаба взрыва. Так, возмущения электрического поля при взрыве заряда ВВ массой 500 т наблюдаются в течение  $\approx 900$  с после взрыва, при взрыве заряда ВВ массой 4,8 кг — приблизительно 50 с.

При взрывах зарядов ВВ на поверхности грунта происходит выброс в атмосферу частиц разрушенного грунта в широком диапазоне размеров. Продукты взрыва, перемешанные с воздухом и частицами грунта, образуют нагретое пылегазовое облако, которое поднимается в атмосфере под действием архимедовой силы. В [12] на основе комплексной модели взрыва химического ВВ описана картина развития пылегазового облака при взрыве заряда ВВ массой 500 т в широком временном интервале: от стадии расширения продуктов детонации до подъема облака на высоту нескольких километров. Частицы раздробленного грунта, которые увлекаются облаком продуктов взрыва, несут на себе электрический заряд, приобретаемый ими в процессе интенсивной деформации и разрушения грунта, в процессе электризации при разрыве контактов твердых тел, а также при контакте с высокотемпературными продуктами взрыва. Макроразделение электрических зарядов в атмосфере происходит под влиянием силы тяжести, когда положительные и отрицательные электрические заряды связаны с материальными частицами разных размеров. Макроскопическое разделение электрических зарядов и будет определять возмущения электрического поля в приземном слое атмосферы.

Имея в распоряжении записи изменений  $E_z(t)$  на различных расстояниях от облака взрыва и зная, как изменяется местоположение облака в атмосфере с течением времени, можно судить об изменении расположения электрических зарядов в пылегазовом облаке. Одна из

наиболее простых моделей расположения электрических зарядов, отвечающая геометрии пылегазового облака следующая: два эффективных электрических заряда  $q_1$  и  $q_2$  расположены на высотах  $h_1$  и  $h_2$  от поверхности земли; первый эффективный заряд является точечным, а второй представляет собой нить. В этом случае вертикальная компонента напряженности электрического поля на поверхности грунта, который считаем идеальным проводником, описывается выражением [1–5]

$$E_z(r, t) = \frac{q_1 h_1}{2\pi\epsilon_0(r^2 + h_1^2)^{3/2}} + \frac{q_2}{2\pi\epsilon_0 h_2} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{(r^2 + h_2^2)^{1/2}} \right), \quad (2)$$

где  $\epsilon_0$  — диэлектрическая постоянная. Модель содержит четыре неизвестных параметра, которые могут быть найдены на основе записей  $E_z(t)$ , полученных на различных расстояниях от заряда ВВ, при использовании метода наименьших квадратов. Параметры в выражении (2) являются функциями времени. Так, для взрыва на поверхности грунта заряда ВВ массой 500 т параметры в выражении (2), рассчитанные для момента времени  $t = 40$  с, который соответствует максимальным значениям напряженности электрического поля в записях  $E_z(t)$ , составляют:  $q_1 = (1,3 \pm 0,1)$  Кл,  $h_1 = (1,39 \pm 0,06) \cdot 10^3$  м,  $q_2 = (-0,4 \pm 0,1)$  Кл,  $h_2 = (3,0 \pm 0,6) \cdot 10^2$  м [4, 5]. Если на начальной стадии взрыва облако продуктов взрыва можно считать электрически нейтральным, то с течением времени облако приобретает избыточный электрический заряд. Это связано с различием в скоростях выпадения крупных и мелких электрически заряженных частиц грунта.

При обработке записей  $E_z(t)$  с использованием выражения (2) были вычислены значения эффективных электрических зарядов в пылегазовом облаке взрыва для масс ВВ от 0,023 до  $10^6$  кг [4]. На рис. 4,а приведена зависимость абсолютного значения избыточного электрического заряда ( $Q$ ) пылегазового облака от массы ( $C$ ) заряда ВВ. Эта зависимость может быть описана эмпирической формулой

$$Q = k_1 C^{0,65 \pm 0,05}, \quad (3)$$

где размерность  $Q$  — Кл,  $C$  — кг;  $k_1 = 2,92 \times 10^{-4}$ .

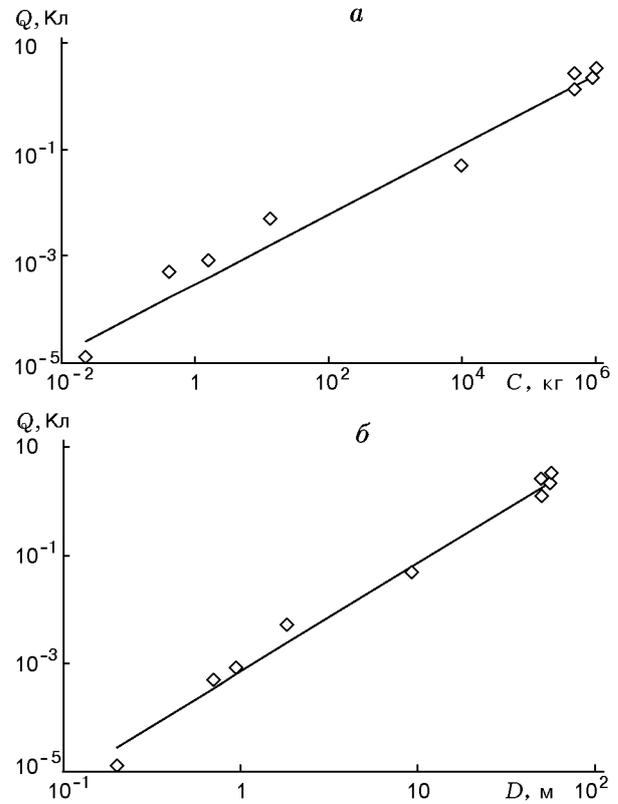


Рис. 4. Зависимости избыточного электрического заряда пылегазового облака от массы заряда ВВ (а) (сплошная линия — зависимость (3)) и диаметра воронки выброса (б) (сплошная линия — зависимость (4))

Эмпирическая зависимость абсолютного значения избыточного электрического заряда от диаметра воронки выброса ( $D$ ) имеет вид

$$Q = k_2 D^{2,0 \pm 0,1}, \quad (4)$$

где размерность  $Q$  — Кл,  $D$  — м;  $k_2 = 7,2 \cdot 10^{-4}$ . Выражения (3) и (4) позволяют сделать оценки электрического заряда, находящегося в пылегазовом облаке, по диаметру воронки выброса или по массе заряда ВВ и, в частности, могут быть использованы для экстраполяции на более крупный масштаб взрыва.

### ПОДЗЕМНЫЕ ВЗРЫВЫ ЗАРЯДОВ ВВ

Электромагнитные эффекты при взрыве в горной среде, так же как и механическое действие такого взрыва, существенно отличаются от случая взрыва в воздухе и на поверхности грунта. Электромагнитные эффекты сопровождают процесс развития взрыва и зависят от

условий проведения взрыва и характеристик среды, окружающей заряд ВВ. Исследования в полевых и лабораторных условиях [1–4, 10, 22–25] показывают, что разрушение горной среды сопровождается целым рядом электромагнитных эффектов, характерных именно для подземных взрывов.

Экспериментальные исследования, проведенные при взрывах зарядов ВВ в скважинах, пробуренных в супеси и граните [10], показывают, что на начальной стадии подземного взрыва наблюдаются возмущения трех компонент электрического поля (вертикальной компоненты  $E_z$  в атмосфере, горизонтальных компонент  $E_r$  и  $E_\theta$  в грунте) и трех компонент индукции магнитного поля  $\mathbf{B}$ . На рис. 5 представлены характерные записи сигналов электрического и магнитного поля при взрыве заряда ВВ массой 2 кг, который был размещен на глубине 3,3 м в скважине, пробуренной в граните [10]. Видно, что амплитуды сигналов электрического и магнитного поля, наблюдаемые непосредственно после детонации заряда ВВ, многократно превосходят фоновые пульсации поля: отношение сигнал/шум превышает значение 10 для большинства опытов из всей серии взрывов, проведенных в граните. На записях датчиков, расположенных на различных расстояниях от скважины, сигналы электрического и магнитного поля появляются одновременно, что говорит об их принадлежности единому источнику поля.

Иная картина наблюдается при взрывах в скважинах, пробуренных в супеси. Амплитуды сигналов электрического и магнитного поля для опытов в супеси характеризуются малыми значениями отношения сигнал/шум, т. е. в большинстве опытов амплитуды сигналов ненамного превышают фоновые значения. Из сравнения записей сигналов, полученных при проведении серий подземных взрывов в супеси и граните, следует, что амплитуды сигналов электрического и магнитного поля, зарегистрированные на одинаковых расстояниях, заметно выше при взрыве в гранитном массиве. Следует отметить, что после детонации зарядов ВВ в супеси наиболее заметные возмущения наблюдаются в радиальной компоненте электрического поля в грунте. Эти возмущения характеризуются относительно большими значениями отношения сигнал/шум на записях компонент электрического и магнитного поля.

Для описания изменения компонент элек-

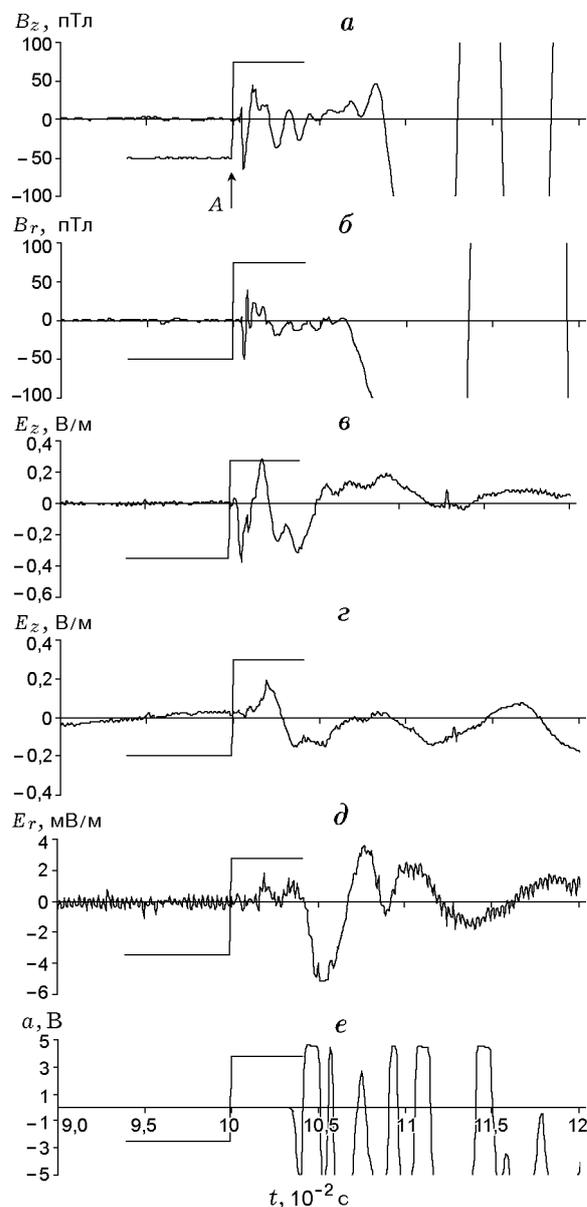


Рис. 5. Сигналы электрического и магнитного поля при взрыве заряда ВВ массой 2 кг в скважине, пробуренной в граните:

*a, б* — вертикальная и радиальная составляющие индукции магнитного поля на расстоянии  $r = 5$  м, стрелка *A* — момент подрыва; *в, г* — вертикальная составляющая напряженности электрического поля на расстоянии  $r = 5$  и 7,5 м соответственно; *д* — радиальная составляющая электрического поля в грунте на расстоянии  $r = 13$  м; *е* — вертикальная составляющая ускорения грунта на расстоянии  $r = 11,5$  м

трического и магнитного поля, регистрируемых непосредственно после детонации ВВ, в качестве источника поля был использован электрический диполь, дипольный момент которого имеет две компоненты — вертикальную ( $p_z$ ) и горизонтальную ( $p_x$ ) [10]. Оценки компонент дипольного момента проводились на основе обработки записей  $E_z(t)$ , полученных на различных расстояниях от заряда ВВ. Расчеты по модели, выполненные для взрывов в супеси и граните, показывают, что оценки компонент  $p_z$  и  $p_x$ , полученные для взрыва заряда ТНТ массой 2 кг в граните, более чем на порядок превосходят оценки для взрыва заряда массой 200 кг в супеси. Из анализа записей сигналов электрического и магнитного поля, полученных в сериях экспериментов при взрывах в различных грунтах, следует, что условия проведения эксперимента и, в частности, физико-механические свойства грунта оказывают существенное влияние на параметры электромагнитных сигналов, генерируемых при подземных взрывах.

В работе [25] проанализированы возможные механизмы генерации сигналов, зарегистрированных при проведении трех подземных химических взрывов, на основе записей радиальной компоненты  $E_r$  электрического поля в грунте. В этих экспериментах заряды ВВ массой 400 ÷ 500 кг размещались в скважинах длиной 35 ÷ 45 м. Авторы [25] отмечают, что форма полученных сигналов отлична в каждом из опытов, но записи  $E_r$  имеют следующие общие характеристики: 1) сигналы возникают практически сразу после детонации ВВ и их длительность не превышает 10 мс; 2) характерный период изменений сигналов составляет приблизительно 1 мс; 3) процесс генерации сигналов может моделироваться с помощью вертикального электрического диполя. Однако в [25] не приведены сигналы, рассчитанные по модели, и нет оценок величины момента электрического диполя.

На поздней стадии подземного взрыва в приземном слое атмосферы наблюдаются низкочастотные возмущения электрического поля, связанные с выходом продуктов взрыва в атмосферу [1–5]. Наиболее интенсивные возмущения электрического поля наблюдаются при взрывах на выброс. Характерной особенностью таких взрывов является разрушение поверхности горной среды с образованием грунтового купола выброса и последующим прорывом

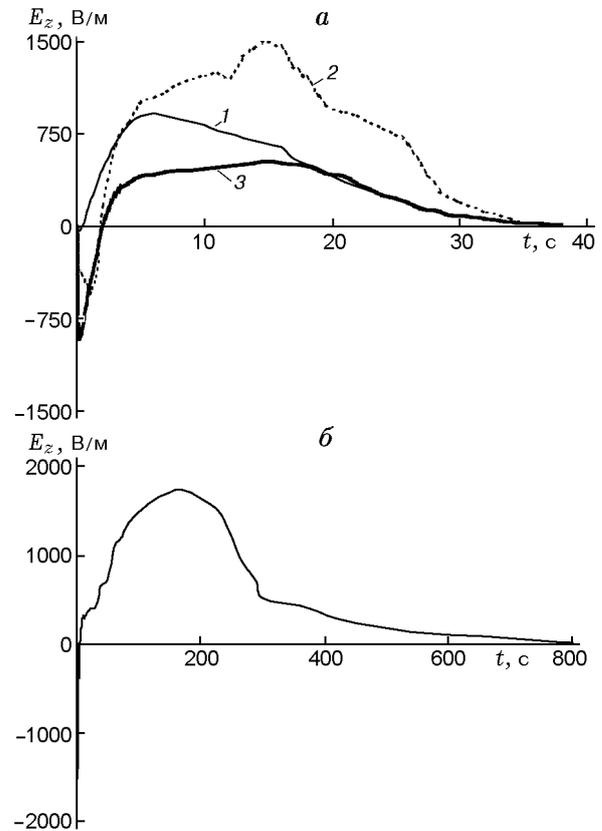


Рис. 6. Характерный вид возмущений вертикальной компоненты электрического поля в атмосфере при подземных взрывах:

а — взрывы в песке,  $C = 0,023$  кг,  $r = 5$  м, кривая 1 —  $W = 0$ , 2 —  $W = 1,5$  см, 3 —  $W = 10,5$  см; б — взрыв в суглинке,  $C = 2,6 \cdot 10^6$  кг,  $r = 2000$  м,  $W = 24$  м

купола расширяющимися продуктами взрыва, что приводит к возникновению в приземном слое атмосферы мощного пылегазового облака. Возмущения электрического поля в этом случае обусловлены движением электрически заряженных купола выброса и пылегазового облака и имеют много общего с возмущениями при взрывах зарядов ВВ на поверхности грунта, но есть и существенные отличия в параметрах сигналов электрического поля. При проведении серий опытов было обнаружено, что форма сигналов электрического поля существенно зависит от параметров заложения заряда ВВ, а также от физико-механических свойств грунта, в частности от его влажности, содержания пылеватых частиц [1, 2].

На рис. 6 представлены записи характерных изменений  $E_z(t)$ , полученные при взрывах зарядов ВВ с различными глубиной зало-

жения ( $W$ ) и массой ( $C$ ). Заряды ВВ массой 0,023 кг взрывались в песчаном грунте влажностью  $3 \div 4$  % (рис. 6, *a*), заряд массой  $2,6 \cdot 10^6$  кг был взорван в суглинках влажностью  $14 \div 15$  % (рис. 6, *б*). Для сигналов, приведенных на рис. 6, время существования возмущений электрического поля, которые заметно превышают уровень естественного фона в атмосфере, изменяется приблизительно от 30 до 800 с. При взрывах зарядов ВВ в грунте сигналы электрического поля имеют, как правило, знакопеременный вид. Начальная фаза сигнала характеризуется относительно малым временем нарастания. Продолжительность второй фазы сигнала многократно превосходит продолжительность первой фазы. Амплитуды положительной и отрицательной фаз сигнала зависят от глубины взрыва, что видно из рис. 6, *a*, на котором приведены записи  $E_z(t)$  при фиксированной массе  $C$  заряда ВВ и расстоянии  $r$  от эпицентра взрыва, изменяется только глубина взрыва. Для взрыва на поверхности грунта (кривая 1 на рис. 6, *a*) амплитуда начальной фазы сигнала в несколько раз меньше амплитуды второй фазы сигнала. По мере заглубления заряда ВВ амплитуда как отрицательной, так и положительной фазы сигнала  $E_z(t)$  увеличивается, проходит через максимум и затем уменьшается, стремясь к нулю. Максимальная величина амплитуды сигнала  $E_z(t)$  в опытах составляла  $3000 \div 4000$  В/м и наблюдалась при взрывах на приведенной глубине  $W/C^{1/3} = 0,2 \div 0,3$  м/кг<sup>1/3</sup> в ближайших к эпицентру точках регистрации, находившихся на приведенных расстояниях  $r/C^{1/3} = 10 \div 20$  м/кг<sup>1/3</sup>.

Для описания распределения электрических зарядов в пылегазовом облаке подземного взрыва может быть использована модель, подобная модели для взрыва на поверхности грунта, а вертикальная компонента напряженности электрического поля в атмосфере описывается выражением (2). Неизвестные параметры, входящие в выражение (2), являются функциями времени. Анализ результатов расчетов эффективных электрических зарядов в зависимости от основных параметров заложения заряда ВВ (его массы и глубины взрыва) показал, что максимальная величина заряда  $Q$  при фиксированной приведенной глубине взрыва зависит от массы ВВ следующим образом:

$$Q = kC^{0,05 \pm 0,09}, \quad (5)$$

где размерность  $C$  — кг,  $Q$  — Кл,  $k = 2 \times$

$10^{-4}$  [2, 4].

Некоторые механизмы генерации электрического поля в атмосфере при взрыве на выброс исследовались в работе [3]. В частности, был рассмотрен механизм, связанный с разделением электрических зарядов между ионизированными продуктами взрыва и частицами грунта при фильтрации продуктов взрыва в разрушенную среду. Соотношения, полученные в работе [3], позволяют оценить электрический заряд, захваченный разрушенной средой, для двух режимов фильтрации: в случае ламинарной фильтрации  $Q \sim C^{1/2}$ , в случае турбулентной фильтрации  $Q \sim C^{5/9}$ , что хорошо согласуется с экспериментальной зависимостью (5).

Данные регистрации возмущений электрического поля атмосферы совместно с другими экспериментальными материалами наблюдений при взрывах на поверхности грунта и подземных взрывах позволяют получить оценку концентрации и массы пылевых частиц в пылегазовом облаке взрыва [5]. Этот метод дает интегральную оценку концентрации частиц и позволяет наблюдать динамику изменения концентрации в процессе развития пылегазового облака взрыва. Использование данного метода оценки концентрации и массы пылевых частиц при проведении массовых взрывов на открытых карьерах может быть полезным для установления размеров санитарно-защитных зон карьеров по фактору запыленности, а также для оценки общего количества выбросов аэрозольных частиц в атмосферу при разработке карьеров.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Адушкин В. В., Соловьев С. П. Низкочастотные электрические поля в приземном слое атмосферы при подземных взрывах // Докл. АН СССР. 1988. Т. 299, № 4. С. 840–844.
2. Адушкин В. В., Соловьев С. П. Возмущения электрического поля атмосферы в ближней зоне подземного взрыва // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1989. № 3. С. 51–59.
3. Адушкин В. В., Соловьев С. П., Сурков В. В. Электрическое поле, возникающее при взрыве на выброс // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26, № 4. С. 117–121.
4. Adushkin V. V., Soloviev S. P. Generation of low-frequency electric fields by explosion crater formation // J. Geophys. Res. 1996. V. 101, N B9. P. 20165–20173.
5. Адушкин В. В., Соловьев С. П. О методе расчета пылевого загрязнения атмосферы по

- измерениям напряженности электрического поля // Физ.-техн. проблемы полез. ископаемых. 1994. № 4. С. 80–88.
6. **Соловьев С. П., Спивак А. А., Сурков В. В.** Электромагнитное поле, генерируемое в результате поляризации горных пород при химическом взрыве // Физические процессы в геосферах: их проявление и взаимодействие. М.: ИДГ РАН, 1999. С. 152–158.
  7. **Соловьев С. П., Сурков В. В.** Электростатическое поле и молнии, возникающие в пылегазовом облаке продуктов взрыва // Геомагнетизм и аэрономия. 2000. Т. 41, № 1. С. 68–76.
  8. **Соловьев С. П.** Электрическое и магнитное поле, возникающее при взрывах зарядов ВВ в воздухе и на поверхности грунта // Нестационарные процессы в верхних и нижних оболочках земли. М.: ИДГ РАН, 2002. С. 231–253.
  9. **Soloviev S. P., Surkov V. V., Sweeney J. J.** Quadrupolar electromagnetic field from detonation of high explosive charges on the ground surface // J. Geophys. Res. 2002. V. 107, N B6. 10.1029/2001JB000296.
  10. **Соловьев С. П.** Генерация электрического и магнитного поля при взрывах в скважинах // Геофизические процессы в нижних и верхних оболочках земли. М.: ИДГ РАН, 2003. Т. 2. С. 249–267.
  11. **Соловьев С. П., Сурков В. В.** Электрические возмущения в приземном слое атмосферы, обусловленные воздушной ударной волной // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30, № 1. С. 117–121.
  12. **Соловьев С. П., Шувалов В. В.** Динамические процессы при сильных тротильных взрывах // Физические процессы в геосферах: их проявление и взаимодействие. М.: ИДГ РАН, 1999. С. 369–377.
  13. **Горшунюв Л. М., Кононенко Г. П., Сиротинин Е. И.** Электромагнитные возмущения при взрывах // ЖЭТФ. 1967. Т. 53, вып. 3(9). С. 818–821.
  14. **Иванов А. Г.** Сейсмoeлектрический эффект второго рода // Изв. АН СССР. Сер. географ. и геофиз. 1940. Т. 4, № 5. С. 699–726.
  15. **Френкель Я. И.** К теории сейсмических и сейсмoeлектрических явлений во влажной почве // Изв. АН СССР. Сер. географ. и геофиз. 1944. Т. 8, № 4. С. 133–150.
  16. **Боронин А. П., Капинос В. Н., Крeнев С. А., Минеев В. Н.** О физическом механизме генерации электромагнитного поля при взрыве зарядов конденсированного ВВ. Обзор литературы // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26, № 5. С. 110–116.
  17. **Медведев Ю. А., Степанов Б. М.** Основные результаты исследований электромагнитных явлений при взрывах зарядов ВВ // Метрология быстропротекающих процессов. М.: Атомиздат, 1977. С. 27–46.
  18. **Боронин А. П., Капинос В. Н., Крeнев С. А.** О физическом механизме генерации электромагнитного поля при взрыве зарядов конденсированного ВВ. Результаты экспериментальных исследований // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26, № 5. С. 117–123.
  19. **Соловьев С. П., Барышев В. И., Вагг Л. Л. и др.** Аппаратурный комплекс для регистрации низкочастотных электрических и магнитных полей // Нестационарные процессы в верхних и нижних оболочках земли. М.: ИДГ РАН, 2002. С. 609–621.
  20. **Селиванов В. В., Соловьев В. С., Сысов Н. Н.** Ударные и детонационные волны. М.: Изд-во Московского гос. ун-та, 1990.
  21. **Ерохин М. А., Кондратьев А. А., Литвиненко И. В., Матвеев Ю. И.** Генерация электрических полей пылевыми частицами при воздушных взрывах зарядов конденсированного взрывчатого вещества // Журн. техн. физики. 2002. Т. 72, вып. 1. С. 125–128.
  22. **Brady B. T. and Rowell G. A.** Laboratory investigations of the electrodynamic of rock fracture // Nature. 1986. V. 321. P. 488–492.
  23. **Enomoto Y. and Hashimoto H.** Emission of charged particles from indentation fracture of rocks // Nature. 1990. V. 346. P. 641–643.
  24. **O'Keefe S. G. and Thiel D. V.** Electromagnetic emissions during rock blasting // Geophys. Res. Lett. 1991. V. 18. P. 889–892.
  25. **Tomizawa I. and Yamada I.** Generation mechanism of electric impulses observed in explosion seismic experiments // J. Geomag. Geoelectr. 1995. V. 47. P. 313–324.

*Поступила в редакцию 21/VI 2004 г.*