

УДК 537.8:536

МАГНИТНЫЙ ДИПОЛЬНЫЙ МОМЕНТ, ОБРАЗОВАННЫЙ ВЗРЫВОМ МОЩНОСТЬЮ ОДНА КИЛОТОННА

Г. В. Коваленко, А. А. Кондратьев, Ю. И. Матвеев,
В. Н. Ногин, А. В. Петровцев

Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. Е. И. Забабахина,
456770 Снежинск

Приведены результаты численного моделирования образования магнитного дипольного момента в результате вытеснения геомагнитного поля Земли при подземном камуфлетном взрыве. Рассмотрены случаи химического и ядерного взрывов мощностью 1 кт в тротиловом эквиваленте. На основании расчетных данных сделан вывод возможности контроля за ядерными испытаниями по результатам электромагнитных измерений.

Введение. Одной из нерешенных проблем, возникающих при контроле за ядерными испытаниями согласно Договору о всеобщем запрещении ядерных испытаний, является проблема распознавания подземных ядерных взрывов (ЯВ) и крупномасштабных взрывов химических взрывчатых веществ (ВВ). Сейсмические методы международной системы мониторинга не позволяют отличить ядерный взрыв от мощного химического взрыва, если ВВ расположено компактно, так как по сейсмической волне невозможно определить характер протекания физических процессов на ранней стадии взрыва. Поэтому актуален поиск альтернативных методов контроля, одним из которых является регистрация электромагнитного сигнала от взрыва. Очевидно, при этом необходимо анализировать раннюю стадию процесса, когда проявляются эффекты, связанные с существенным различием начальных концентраций энергии при ЯВ и взрыве химических ВВ. В частности, различие электромагнитных сигналов может быть обусловлено эффектом вытеснения магнитного поля из “горячей” области повышенной проводимости вблизи центра взрыва. На более поздней стадии, когда формирование электромагнитного сигнала происходит за счет поляризации грунта на фронте ударной волны, подъема грунта и т. п., различие между ЯВ и взрывом химических ВВ несущественно.

Моделирование гидродинамических течений, возникающих при взрыве. Рассмотрены два типа подземных камуфлетных взрывов — химический и ядерный — с энерговыделением 1 кт в тротиловом эквиваленте. Расчеты выполнены для компактного ядерного взрыва, когда область энерговыделения, имитирующая заряд, расположена непосредственно в горном массиве [1]. В газодинамических расчетах геометрия задач была полностью сферической. В качестве химического ВВ рассматривался тротил с плотностью $\rho = 1 \text{ г/см}^3$, близкой к его насыпной плотности. Заряд химического ВВ радиусом 6,35 м расположен в грунте. Подрыв ВВ производился в центре с распространением детонационной волны к периферии. Граничные условия во всех задачах задавались на расстоянии 2 км от заряда.

Газодинамические расчеты выполнены с использованием комплекса программ ВОЛНА-96, основные алгоритмы которого представлены в [2]. Для описания термодина-

Работа выполнена при финансовой поддержке Международного научно-технического центра (код проекта 835-98).

мических свойств веществ использовались уравнения состояния ВВ и продуктов взрыва (ПВ) [3]. Рассматривался случай, когда горный массив состоит из прочной скальной породы, близкой по свойствам к кварциту. Уравнение состояния горных пород записывалось в соответствии с [4].

В случае подземных ЯВ в связи с высокой концентрацией энергии более точно описаны свойства веществ, расположенных в ближней зоне взрыва. В области энерговыделения $0 \leq r \leq r_e$ ($r_e = 20,7$ см) использовалось уравнение состояния для алюминия [5]. При описании свойств горной породы в ближней зоне учитывались происходящие в них фазовые изменения: испарение, плавление и полиморфный переход типа кварц — стишовит. Механизм указанных превращений, а также фазовая диаграмма горной породы соответствуют данным для кварца.

Для компактного ЯВ выделялась ближайшая к области энерговыделения зона $r_e \leq r \leq r_l$ ($r_l = 231$ см), в которой происходят испарение и плавление породы на фронте ударной волны ($P \geq 100$ ГПа [6]) при последующей разгрузке. Свойства горной породы в этой зоне описывались уравнением состояния [5]. В следующей по ходу распространения волны области $r_l \leq r \leq r_q$ ($r_q = 400$ см) учитывалось полиморфное превращение низкоплотной (кварцевой) фазы в высокоплотную (стишовитовую) и обратно (при разгрузке). Для описания неравновесного характера этого превращения применялась модель, близкая к предложенной в [4, 7–9]. Ход ударной адиабаты и изэнтроп разгрузки в области смеси фаз учитывается в модели заданием предельных зависимостей метастабильных концентраций стишовитовой фазы. При надлежащем выборе этих зависимостей могут быть описаны все особенности рассматриваемого превращения в кварците, в частности расщепление основной пластической волны, зарегистрированное в [10]. Принятые в расчетах зависимости для определения метастабильных концентраций в ходе превращения кварцитовой фазы в стишовитовую установлены по результатам работы [11], а для обратного превращения концентрации принимались близкими к равновесным [4]. Уравнения состояния для кварцитовой и стишовитовой фаз построены в соответствии с данными, представленными в [7, 12]. Упругопластические и прочностные свойства горной породы описаны в рамках модели, аналогичной использованной в [1]. При описании упругопластического течения горных пород использован подход, основанный на уравнениях Прандтля — Рейсса (см. [13]). При рассмотрении подземных ЯВ учитывалось литостатическое давление, соответствующее принятым для таких взрывов глубинам (200 м для 1 кт в тротиловом эквиваленте).

Метод вычисления дипольного магнитного момента. Для нахождения дипольного магнитного момента решаются уравнения Максвелла в предположении, что движение является сферически-симметричным. При этом вектор-потенциал \mathbf{A} в сферических координатах (r, θ, φ) имеет одну компоненту: $\mathbf{A} = \mathbf{e}_\varphi A_0(r, t) \sin \theta$.

Уравнение для A_0 в лагранжевых координатах записывается в виде

$$\frac{d(rA_0)}{dt} = \frac{c^2}{4\pi\sigma} \left(\frac{\partial^2(rA_0)}{\partial r^2} - \frac{2A_0}{r} \right),$$

где σ — проводимость. Выражение для плотности тока \mathbf{j} имеет вид

$$\mathbf{j} = \mathbf{e}_\varphi j_0(r, t) \sin \theta, \quad j_0 = -\frac{c}{4\pi} \left(\frac{\partial^2(rA_0)}{\partial r^2} - \frac{2A_0}{r} \right),$$

для магнитного дипольного момента —

$$\mathbf{M} = \frac{1}{2c} \int [\mathbf{r} \times \mathbf{j}] dV.$$

В данной задаче магнитный дипольный момент направлен вдоль оси z (направления магнитного поля Земли B_0):

$$M_z = \frac{1}{3c} \int j_0(r, t) r^3 dr.$$

Уравнение для вектор-потенциала решается неявно методом прогонки с граничными условиями:

- в центре ($r = 0$) $A_0 = 0$, $j_0 = 0$;
- снаружи шара $A_0 = rB_0/2 + M_z/r^2$.

По вектору магнитного момента можно восстановить вектор напряженности \mathbf{H} магнитного поля

$$\mathbf{H} = 3\mathbf{r}(\mathbf{M} \cdot \mathbf{r})/r^5 - \mathbf{M}/r^3. \quad (1)$$

Данные по проводимости ПВ различных химических ВВ существенно различаются. Кроме того, имеющиеся экспериментальные данные в основном относятся к состоянию непосредственно за фронтом детонационной волны, и отсутствуют достоверные данные о зависимости проводимости ПВ от плотности и температуры. Поэтому в расчетах использовалось постоянное значение проводимости ПВ $\sigma = 0,15 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, соответствующее результатам измерений для типичного промышленного ВВ — аммонита [14].

При подземном ЯВ мощностью 1 кт в тротиловом эквиваленте в расчетах учитывалась зависимость проводимости веществ от температуры и плотности. Зависимость проводимости грунта (SiO_2) σ_1 [$\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$] от температуры построена на основе аппроксимации данных [15, 16]. В диапазоне плотности $10^{-3} \text{ г/см}^3 < \rho < 10 \text{ г/см}^3$ и температуры $0,25 \text{ эВ} < T < 15 \text{ эВ}$ ее можно представить в следующем виде:

$$\sigma_1 = f_1 f_2 / (f_1 + f_2),$$

где $f_1 = 10^6 \exp(-0,5|3,7 - \ln T|^{2,2})$; $f_2 = 100 T(\rho/0,005)^{0,4-T/300}$. Отметим, что при $T > 1 \text{ эВ}$ зависимость проводимости от температуры и плотности SiO_2 определяется функцией f_2 .

Аналогично были построены интерполяционные формулы для проводимости алюминия σ_2 [$\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$] по результатам, приведенным в [16]:

$$\sigma_2 = 77 T^{0,57+0,067 \ln T} (\rho/(1,82 \cdot 10^{-4}))^{0,36-0,042 \ln T}$$

при $10^{-3} \text{ г/см}^3 < \rho < 0,1 \text{ г/см}^3$, $0,1 \text{ эВ} < T < 100 \text{ эВ}$.

Анализ результатов численного моделирования. На рис. 1, 2 представлены $(r-t)$ -диаграммы. Характерное время детонации заряда химического ВВ при его подрыве в центре составляет 1,3 мс. В горной породе распространяется волна напряжений, в силу низкой интенсивности нагружения частиц горной породы имеющая характер упругой волны. За ней следуют плавная волна сжатия и волна разгрузки, в которых происходит основное пластическое течение породы и ее разрушение при растяжении, возникающее из-за сферического характера движения. Движение стенки полости при взрыве химических ВВ существенно менее интенсивное, чем при компактном ЯВ. Внутри полости происходит интенсивное движение, обусловленное циркуляцией волн, отражающихся от стенки полости и центра. При ЯВ в основном нагреву подвергается вещество (массой примерно 70 т) в области его испарения, в то время как при взрыве химических ВВ энергия распределяется по всей массе ПВ (10^3 т). В случае химического взрыва размер области высокой проводимости совпадает с размером полости, так как температура горной породы низка.

Зависимость проводимости от радиуса для ядерного взрыва представлена на рис. 3. Отметим, что скачкообразное изменение проводимости на границе веществ Al и SiO_2 связано с тем, что в расчетах не учитываются теплопроводность (лучистая теплопроводность) и разогрев грунта нейтронами и гамма-квантами ЯВ.

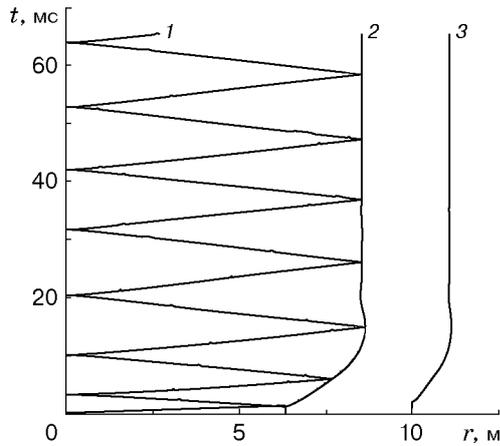


Рис. 1

Рис. 1. $(r-t)$ -диаграмма для подземного взрыва химического ВВ:

1 — траектория движения ударной волны; 2, 3 — траектории движения частиц горной породы, расположенных на расстоянии $r_0 = 6,35; 10$ м от центра заряда

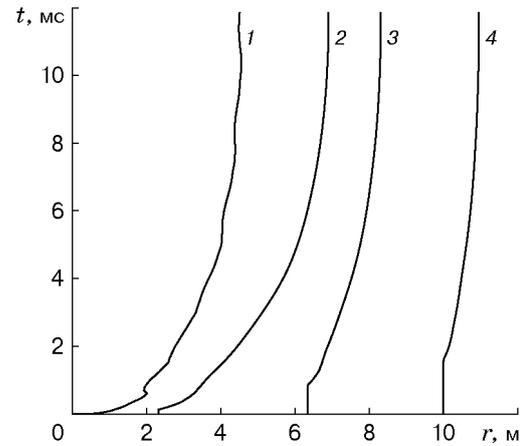


Рис. 2

Рис. 2. $(r-t)$ -диаграмма для подземного ядерного взрыва:

1 — граница области энерговыделения в горной породе; 2–4 — траектории движения частиц горной породы, расположенных на расстоянии $r_0 = 2,31; 6,35; 10$ м от центра заряда

Результаты расчета дипольного магнитного момента, образованного при взрыве химических ВВ, приведены на рис. 4, а. Согласно (1) на расстоянии $r = 1$ км максимальное значение магнитного поля составляет $B = 2 \cdot 10^{-14}$ Тл. Особенностью результатов является наличие осцилляций магнитного сигнала и сильная зависимость его от проводимости ПВ, что объясняется малой проводимостью ПВ. Характерное время диффузии магнитного поля в неподвижную область размера L с проводимостью σ составляет $\tau = 4\pi\sigma L^2/c^2$. При $\sigma = 10^{11} \text{ с}^{-1}$ ($\sigma \approx 0,1 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$), $L = 635$ см характерное время диффузии $\tau = 3,9 \cdot 10^{-4}$ с. Оно существенно меньше времени протекания гидродинамических процессов в полости, которое зависит от ее размера. Поэтому сигнал регистрируется до тех пор, пока движутся ПВ. После остановки движения сигнал уменьшается до нуля в течение времени порядка τ . Движение ПВ в обратном направлении вызывает появление сигнала противоположной полярности. Таким образом, магнитный сигнал имеет тот же период осцилляций, что и гидродинамические процессы в полости.

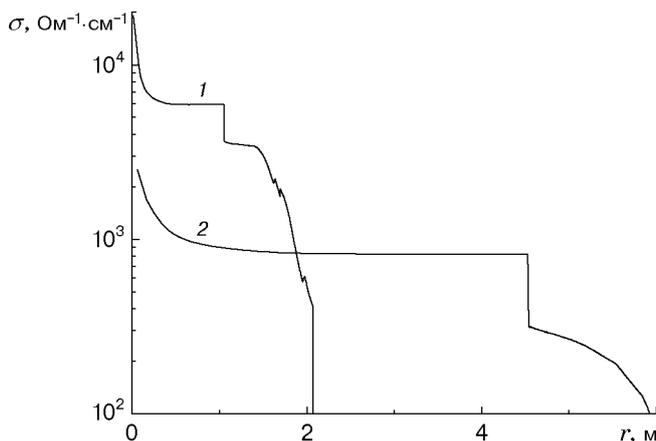


Рис. 3. Пространственные профили проводимости при ядерном взрыве:
1 — $t = 0,1$ мс; 2 — $t = 10$ мс

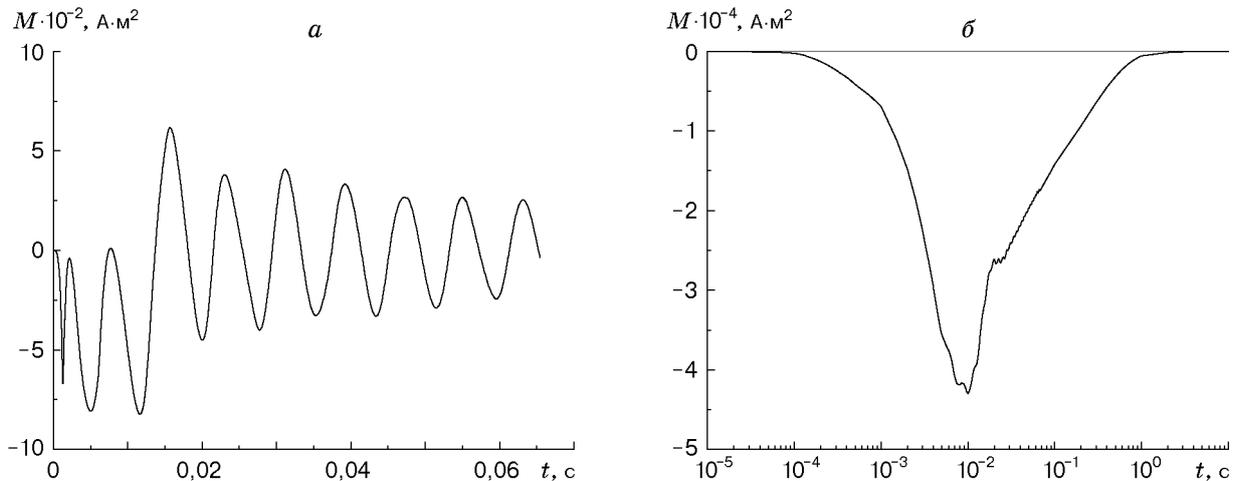


Рис. 4. Зависимости магнитного дипольного момента от времени при подрыве химического ВВ (а) и подземном ядерном взрыве (б)

Результаты расчетов для компактного ЯВ представлены на рис. 4, б. На расстоянии $r = 1$ км амплитуда магнитного поля $B = 1,5 \cdot 10^{-12}$ Тл, что на два порядка выше, чем при взрыве химических ВВ. При этом существенно изменяется форма сигнала. Так как проводимость вещества в полости при ЯВ на четыре порядка выше, чем при взрыве химических ВВ, характерное время диффузии τ значительно больше, и движение газа внутри образовавшейся полости не оказывает влияния на форму сигнала.

Заключение. В работе [17] приведены результаты электромагнитных измерений подземного ЯВ мощностью 1 кт в тротиловом эквиваленте на расстоянии 500 м от эпицентра. Измеренная компонента магнитного поля B_z обусловлена образованием магнитного дипольного момента ядерного взрыва. Оценки результатов представленных выше расчетов дают значения амплитуды $B \approx 10^{-11}$ Тл и ширины импульса $\Delta\tau \approx 30$ мс. С учетом возможных различий в постановках расчетов и экспериментов можно отметить хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных [17].

При ЯВ амплитуда магнитного сигнала примерно на два порядка выше, чем при взрыве химического ВВ той же мощности. Существенно изменяется форма сигнала. При взрыве химических ВВ мощностью 1 кт в тротиловом эквиваленте сигнал является осциллирующим с периодом $\tau \approx 4$ мс. При ЯВ мощностью 1 кт в тротиловом эквиваленте сигнал увеличивается до максимального значения за время порядка 10^{-2} с, а затем плавно уменьшается за время порядка $0,1 \div 1$ с.

Авторы выражают благодарность М. И. Авраменко и М. М. Горшкову за полезные обсуждения результатов работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Быченков В. А., Демьяновский С. В., Коваленко Г. В. и др. Сейсмическая эффективность камуфлетного подземного ядерного взрыва // Вопр. атом. науки и техники. Сер. Теорет. и прикл. физика. 1992. Вып. 2. С. 22–30.
2. Куропатенко В. Ф., Коваленко Г. В., Кузнецова В. И. и др. Комплекс программ ВОЛНА и неоднородный разностный метод расчета движений сжимаемых сред // Вопр. атом. науки и техники. Сер. Методики и программы числ. решения задач мат. физики. 1989. Вып. 2. С. 9–25.

3. Куропатенко В. Ф. Уравнения состояния продуктов детонации плотных ВВ // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 26, № 6. С. 112–117.
4. Swegle J. W. Irreversible phase transitions and wave propagation in silicate geologic materials // J. Appl. Phys. 1990. V. 68, N 4. P. 1563–1579.
5. Елисеев Г. М., Клинишов Г. Е. Уравнение состояния твердых веществ и его сплайн-аппроксимация. М., 1982. (Препр. / АН СССР. Ин-т прикл. математики; № 173).
6. Lyzenga G. A., Ahrens T. J., Mitchel A. C. Shock temperatures of SiO₂ and their geophysical implications // J. Geophys. Res. 1983. V. 88. P. 2431–2444.
7. Куропатенко В. Ф., Минаева И. С. Математическая модель уравнения состояния кварца // Вопр. атом. науки и техники. Сер. Методики и программы числ. решения задач мат. физики. 1979. Вып. 4. С. 3–11.
8. Boettger J. C., Wallace D. C. Metastability and dynamics of the shock-induced phase transition in iron // Phys. Rev. B. Solid State. 1997. V. 55. P. 2840–2848.
9. Boettger J. C., Furnish M. D., Dey T. N., Grady D. E. Timeresolved shock-wave experiments on granite and numerical simulations using dynamic phase mixing // J. Appl. Phys. 1995. V. 78, N 15. P. 5155–5165.
10. Вильданов В. Г., Горшков М. М., Слободенюков В. М. и др. Фазовый переход в кварците и масштабный эффект // Хим. физика. 1995. Т. 14, № 2/3. С. 122–125.
11. Zhugin Yu. N. The behavior of α -quartz under high dynamic and static pressures: new results and views // Proc. of the AIP conf. on shock compression of condensed matter, Seattle, USA, 13–18 Aug., 1995. N. Y.: AIP Press, 1996. P. 97–100.
12. Горшков М. М., Жугин Ю. Н., Крупников К. К. и др. О некоторых особенностях динамической сжимаемости кварца // Физика Земли. 1994. № 10. С. 16–22.
13. Уилкинс М. Л. Расчет упругопластических течений. Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967.
14. Бриш А. А., Тарасов М. С., Цукерман В. А. Электропроводность продуктов взрыва конденсированных веществ // Журн. эксперим. и теорет. физики. 1959. Т. 37, № 6. С. 1543–1550.
15. Kondo K., Ahrens T. J., Sawaoka A. Electrical and optical measurements on fused quartz under shock compression // Proc. of the AIP conf. on shock waves in condensed matter, Menlo Park, California, USA, 23–25 June, 1981. N. Y.: AIP Press, 1982. P. 299–303.
16. Калиткин Н. Н., Кузьмина Л. В., Рогов В. С. Таблицы термодинамических функций и транспортных коэффициентов плазмы. М., 1972. (Препр. / АН СССР. Ин-т прикл. математики; № 153).
17. Sweeney J. J. Low-frequency electromagnetic measurements at the NPE and Hunter's trophy: A comparison // Proc. of the Symp. on the non-proliferation experiment: Results and implications for test ban treaties, Rockville, Maryland, USA, 19–21 Apr., 1994. Livermore, USA: Lawrence Livermore Nat. Lab., 1994. P. 8–21.

Поступила в редакцию 22/XI 2000 г.