

лительная гидродинамика развивается уже более 50 лет. Решеточные же методы пока находятся в начале своего развития. Можно ожидать, что модификация подхода существенно расширяет круг решаемых задач.

Вместе с тем уже в нынешнем состоянии метод имеет уникальные особенности, позволяющие применять его для качественного описания стохастической «компоненты» сложных процессов. В сочетании с детерминированными методами можно надеяться на лучшее понимание многих явлений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Frish U., Hasslacher B., Pomeau Y. Lattice-gas automata for the Navier-Stokes Equation // *Phys. Rev. Letters.*— 1986.— 56, N 14.— P. 1505—1508.
2. Hargy J., de Pazzis O., Pomeau Y. Molecular dynamics of a classical lattice gas: transport properties and time correlation functions // *Phys. Rev. A.*— 1976.— 13, N 5.— P. 1949—1961.
3. Wolfram S. Cellular Automaton Fluids 1: Basic Theory // *Journ. Stat. Phys.*— 1986.— 45, N 3/4.— P. 471—526.
4. Toffoli T., Margolus N. Cellular automata supercomputers for fluid-dynamics modeling // *Phys. Rev. Letters.*— 1986.— 56, N 16.— P. 1694—1696.
5. Rivet J.-P., Hénon M., Frish U., D'Humières D. Simulating fully three-dimensional flow by lattice-gas methods // *Europhysics Letters.*— 1988.— 7(3).— P. 231—236.
6. Dahlburg J. P., Montgomery D., Doolen G. D. Noise and compressibility in lattice-gas fluids // *Phys. Rev. A.*— 1987.— 36, N 5.— P. 2471—2474.
7. Zanetti G. The hydrodynamics of lattice gas automata // *Ibid.*— 1989.— 40.— P. 1539—1548.
8. Bibliography for NATO workshop on lattice gas methods for PDE's: theory, applications and hardware // *Physica D.*— 1991.— 47.— P. 299—337.
9. Gunstensen A. K., Rotman D. H. A Galilean-invariant immiscible lattice gas // *Ibid.*— P. 53—63.
10. Chen S., Chen H., Doolen G. D. et al. Lattice gas models for monideal gas fluids // *Ibid.*— P. 97—111.
11. Gunstensen A. K., Rotman D. H. A lattice-gas model for three immiscible fluids // *Ibid.*— P. 47—52.
12. Clavin P., Lallemand P., Pomeau Y., Searby G. Simulation of free boundaries in flow systems by lattice-gas model // *Journ. Fluid Mech.*— 1988.— 188.— P. 437—464.
13. Chen S., Diemer K., Doolen G. D. et al. Lattice gas automata for flow through porous media // *Physica D.*— 1991.— 47.— P. 72—84.
14. Hayot F. Fingering instability in a lattice gas // *Ibid.*— P. 64—71.
15. Wells J. T., Janesku D. R., Travis B. J. A lattice gas automata model for heterogeneous chemical reactions at mineral surfaces and in pore networks // *Ibid.*— P. 115—123.
16. Chen H., Chen S., Doolen G. D. Sound wave propagation in FHP lattice gas automata // *Phys. Lett. A.*— 1989.— 140, N 4.— P. 161—165.
17. Chen S., Chen H., Doolen G. D. How the lattice gas model for the Navier-Stokes equation improves when a new speed is added // *Complex Systems.*— 1989.— 3.— P. 243—251.
18. Bernardin D., Sero-Guillaume O. E., Sun C. H. Multispecies 2D lattice gas with energy levels: diffusive properties // *Physica D.*— 1991.— 47.— P. 169—188.
19. Chen S., Lee M., Zhao K. H., Doolen G. D. A lattice gas model with temperature // *Ibid.*— 37.— P. 42—59.

630090, Новосибирск,
Институт гидродинамики
им. М. А. Лаврентьева
СО РАН

Поступила в редакцию 3/VI 1993

УДК 550.834.4:622.235

С. П. Соловьев, В. В. Сурков

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВОЗМУЩЕНИЯ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ВОЗДУШНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

Экспериментально и теоретически исследовано низкочастотное электрическое поле, связанное с распространением воздушной ударной волны в приземном слое атмосферы. В эксперименте регистрировались вариации вертикальной составляющей E_z напряженности электрического поля в атмосфере при помощи электростатических флюксометров и штыревых антенн,

© С. П. Соловьев, В. В. Сурков, 1994.

установленных на поверхности грунта. Анализ экспериментальных данных показывает, что возмущения электрического поля обусловлены изменениями в УВ плотности объемного электрического заряда, который образован тяжелыми ионами и аэрозольными частицами. Наблюдается приблизительная пропорциональность амплитуды возмущений электрического поля, параметров ударной волны и концентрации заряженных частиц в электродном слое атмосферы.

При воздушных и наземных взрывах конденсированных ВВ возникает ряд электромагнитных эффектов. В ближней зоне взрыва регистрируются сигналы электрического поля длительностью несколько миллисекунд, которые связаны с процессами ионизации и разлета продуктов детонации ВВ [1]. Низкочастотное электрическое поле, генерируемое продуктами взрыва, имеет дипольный характер и убывает обратно пропорционально кубу расстояния. При взрывах зарядов ВВ в грунте и на его поверхности, сопровождающихся выбросом разрушенной среды, наблюдается другой тип явлений, которые обусловлены появлением электрических зарядов на частицах грунта и в пылегазовом облаке взрыва [2, 3]. Величина амплитуды электрического сигнала достигала 2—4 кВ/м на приведенных расстояниях $R/C^{1/3} = 10 \div 20 \text{ м/кг}^{1/3}$ от эпицентра взрыва, а его длительность составляла десятки и сотни секунд. Типичная форма сигнала при взрыве заряда ВВ на поверхности грунта приведена на рис. 1.

Первоначальный пик в сигнале возникает в момент прохождения мимо пункта регистрации воздушной ударной волны (УВ). Последующее нарастание электрического поля обусловлено влиянием поднимающегося вверх пылегазового облака взрыва. Данный эффект рассматривался в [2, 3]. В настоящей работе экспериментально и теоретически исследуется вступительная часть сигнала, связанная с воздействием УВ (рис. 2, а). Цель исследования заключается в выяснении физических механизмов явления и изучении закономерностей распространения и затухания возмущений, инициированных УВ.

Вариации вертикальной составляющей E_z напряженности электрического поля в атмосфере регистрировались электростатическими флюксметрами, установленными на поверхности грунта на приведенных расстояниях $R/C^{1/3} = 10 \div 100 \text{ м/кг}^{1/3}$. Измерения велись в диапазоне 0—200 Гц. В некоторых случаях регистрация $E_z(t)$ проводилась при помощи штыревой антенны, имевшей частотный диапазон 0,001— 10^4 Гц. Электрический сигнал возникал в момент прихода воздушной УВ к месту установки датчиков поля. Возмущения электрического поля распространялись со скоростью УВ, затухая после ее прохождения. Следовательно, источником электрических вариаций являлась локальная область изменения давления в воздушной УВ.

Заметим, что электрические поля, обусловленные сейсмической волной, распространяющейся в электропроводящем грунте, составляют десятки микроватт в секунду [4], т. е. оказываются гораздо ниже рассматриваемого эффекта.

Анализ экспериментальных данных показывает, что возмущения атмосферного электрического потенциала обусловлены изменениями в УВ плотности объемного электрического заряда, который образован тяжелыми ионами, аэрозольными частицами и т. п. Объемный электрический заряд, содержащийся в атмосфере у поверхности земли, $\approx 10\text{—}500 \text{ пКл/м}^3$ [5], что соответствует избыточной концентрации тяжелых ионов $N_0 \approx 10^8 \div 10^9 \text{ м}^{-3}$ при общей их концентрации $\approx 5 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$. Присутствие аэрозоля в атмосфере оказывает существенное влияние на электрические характеристики атмосферы, структуру электродного слоя, приводит к изменению концентрации легких ионов. Как показывают данные экспериментальных исследований [6],

в приземном слое атмосферы практически всегда содержатся аэрозольные частицы, часть которых нейтральна, а часть заряжена.

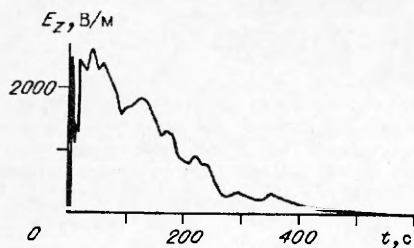


Рис. 1. Характерный вид изменения напряженности электрического поля от времени при взрыве накладного заряда ВВ массой 500 т, $R = 1500 \text{ м}$.

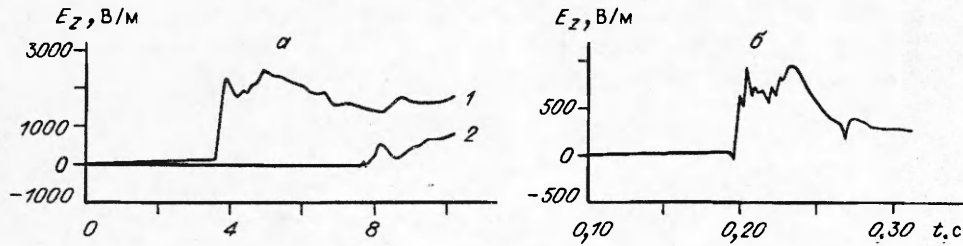


Рис. 2. Типичный вид сигнала, вызываемого воздушной УВ.
 а — масса заряда ВВ 500 т, $R = 1500$ (1) и 2800 м (2); б — масса заряда ВВ 570 кг, $R = 75$ м.

Концентрация аэрозольных частиц зависит от характера местности; например, для частиц размером $0,01—0,2$ мкм концентрация в сельской местности вблизи городов составляет $10^9—10^{10}$ м $^{-3}$, в городах — $10^{10}—10^{11}$ м $^{-3}$. Численные расчеты, учитывающие влияние аэрозольных частиц на структуру электродного слоя, показывают, что при общей концентрации аэрозольных частиц, положительных и отрицательных ионов $\approx 10^{10}$ м $^{-3}$, ролью легких ионов можно пренебречь [7], а толщина электродного слоя увеличивается с ростом концентрации аэрозольных частиц. Характерный масштаб l толщины электродного слоя определяется процессом турбулентного перемешивания воздуха вблизи земли, $l \approx 100$ м.

Рассмотрим плоскую воздушную Ув, распространяющуюся в направлении оси x вдоль поверхности земли. Уравнение движения отдельной микрочастицы, увлекаемой воздушным потоком за фронтом УВ, имеет вид

$$m\vec{v} = q\vec{E} + m\vec{g} + m(\vec{V} - \vec{v})/\tau, \quad \tau = m/(6\pi\eta a), \quad (1)$$

где m (a) и q (a) — масса и заряд частицы; a — ее радиус; \vec{v} — скорость частицы; \vec{V} — скорость газа; \vec{g} — ускорение свободного падения; \vec{E} — напряженность электрического поля; η — коэффициент вязкости воздуха. Концентрация частиц заданного размера $N(\vec{r}, a)$ и потенциал электрического поля φ удовлетворяют уравнениям непрерывности и Пуассона

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \text{div}(N\vec{v}) = 0, \quad \Delta\varphi = \frac{1}{\epsilon_0} \int_0^\infty q(a) N(r, a) da. \quad (2)$$

Невозмущенная концентрация $N_0(z, a)$ частиц, создающих объемный электрический заряд, и атмосферный электрический потенциал $\varphi_0(z)$ связаны условием:

$$\varphi_0(z) = -\frac{1}{\epsilon_0} \int_0^z dz' \int_0^{z'} dz'' \int_0^\infty q(a) N_0(z'', a) da + zE_0, \quad (3)$$

где E_0 — напряженность геоэлектрического поля на уровне земли; $z = 0$.

Будем искать решение (1), (2) в виде $N = N_0 + n$, $\varphi = \varphi_0 + \psi$, где n и ψ — малые возмущения. Учитывая выражение (3) и полагая, что перед фронтом УВ частицы находятся в равновесии, преобразуем уравнения (1), (2) к виду

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \frac{1}{\tau}\right) v_x = -\frac{q}{m} \frac{\partial \psi}{\partial x} + \frac{V_x}{\tau}, \quad \left(\frac{\partial}{\partial t} + \frac{1}{\tau}\right) v_z = -\frac{q}{m} \frac{\partial \psi}{\partial z} + \frac{V_z}{\tau}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} + N_0 \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0}, \quad \rho = \int_0^\infty q(a) n(r, a) da. \quad (6)$$

Здесь V_x, V_z — заданные функции, определяющие скорость газа; ρ — плотность электрического заряда в атмосфере. Действуя на уравнение (5) опера-

тором $(\partial/\partial t + \tau^{-1})$, исключим из него при помощи (4) компоненты скорости \vec{v} . Подставим в полученное выражение $\Delta\psi$ из (6), а затем умножим его на $q(a)$ и проинтегрируем по a от 0 до ∞ . В результате получаем

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} + \frac{\partial}{\partial t} \left\langle \frac{\rho}{\tau} \right\rangle + \omega_0^2 \rho - \left\langle \frac{\rho_0}{\tau} \right\rangle \frac{1}{S_0} \frac{\partial S}{\partial t} = 0, \quad (7)$$

$$\omega_0^2(z) = \frac{1}{\varepsilon_0} \int_0^\infty \frac{q^2(a) N_0(z, a) da}{m(a)}, \quad \left\langle \frac{\rho}{\tau} \right\rangle = \int_0^\infty \frac{q(a) n(r, a) da}{\tau(a)},$$

$$\left\langle \frac{\rho_0}{\tau} \right\rangle = \int_0^\infty \frac{q(a) N_0(z, a) da}{\tau(a)},$$

$\omega_0(z)$ — ленгмюровская частота колебаний заряженных частиц; S_0 — начальная плотность газа; S — возмущение плотности. Для упрощения задачи в дальнейшем полагаем $\langle \rho/\tau \rangle \sim \rho/\langle \tau \rangle$, $\langle \rho_0/\tau \rangle \sim \rho_0/\langle \tau \rangle$, ρ_0 — невозмущенная плотность электрического заряда.

Граничные условия для возмущений потенциала на поверхности идеальной проводящей земли имеют вид: $\psi = 0$, $\partial\psi/\partial x = 0$. При этом решение (6) выглядит так ($z \geq 0$):

$$\psi(x, z, t) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \int_0^\infty dz' \int_0^\infty \rho(x', z', t) \ln \frac{(x-x')^2 + (z+z')^2}{(x-x')^2 + (z-z')^2} dx'. \quad (8)$$

С помощью (8) нетрудно найти возмущения напряженности электрического поля при $z = 0$.

$$E_z(x, t) = -\frac{1}{\pi\varepsilon_0} \int_{-\infty}^\infty dx' \int_0^\infty \frac{z'\rho(x', z', t)}{(x-x')^2 + (z')^2} dz', \quad E_x = 0. \quad (9)$$

Подставляя решение (7) в (9), можно найти возмущение E_z в приземном слое атмосферы, генерируемое УВ.

Используя для оценки параметров уравнения (7) величины $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, $a = 0,01 \div 0,2$ мкм, $N_0 = 10^9 \div 10^{10}$ м $^{-3}$, плотность вещества аэрозольных частиц $2 \cdot 10^3$ кг/м 3 , $\eta = 1,7 \cdot 10^{-5}$ Па·с, получаем $\langle \tau \rangle = \tau_0 \approx 3 \cdot 10^{-9} \div 10^{-6}$ с, $\omega_0^{-1} \approx 2 \cdot 10^{-1} \div 0,6 \cdot 10^2$ с. Отсюда следует, что ленгмюровскими колебаниями частиц в УВ можно пренебречь. Однако в некоторых случаях, когда N_0 велико (сильно запыленная атмосфера), под действием УВ могут возникать коллективные явления в пылевой плазме.

Рассмотрим плоскую стационарную УВ, распространяющуюся со скоростью U вдоль оси x . Опуская колебательный член в уравнении (7), запишем его решение в виде

$$\rho(x, z, t) = \frac{\rho_0(z)}{\tau_0 S_0} \theta \left(t - \frac{x}{U} \right) \int_{x/U}^t \exp \left(\frac{t'-t}{\tau_0} \right) S(x - Ut') dt', \quad (10)$$

где θ — единичная функция. Если характерное время фазы сжатия УВ $\tau_+ \ll \tau_0$, то экспонента в (10) ≈ 1 и максимальное значение возмущения плотности электрического заряда $\rho_* \approx \rho_0 V_+ \tau_+ / (\tau_0 U)$, где V_+ — амплитуда скорости среды. В этом случае $\rho_* \ll \rho_0$, поскольку частицы вследствие своей инерции не успевают заметно уплотниться за малые времена.

Рассмотрим УВ на больших расстояниях, когда выполняется условие $\tau_+ \gg \tau_0$. Учитывая, что интеграл в (10) набирается в основном на верхнем пределе, получаем

$$\rho = \frac{\rho_0(z) V(x - Ut) \Theta(t - x/U)}{U} \left[1 - \exp \left(\frac{x - Ut}{\tau_0 U} \right) \right]. \quad (11)$$

Как видно из выражения (11), в данном случае $\rho_* \approx \rho_0 V_+ / U$.

Для оценки эффекта зададим профиль скорости среды в виде двух следующих друг за другом прямоугольных импульсов положительной и отрицательной полярностей, амплитуда и протяженность которых связаны условием $V_+\lambda_+ = V_-\lambda_-$. Начальную плотность электрического заряда определим в виде $\rho_0(z) = \rho_0\theta(l-z)$. Тогда подставляя (11) в (9) и пренебрегая экспонентой, находим

$$E_z = -\frac{\rho_0 l}{\epsilon_0 U} \left[(V_+ + V_-) F\left(\frac{\lambda_+ - \xi}{l}\right) + V_+ F\left(\frac{\xi}{l}\right) - V_- F\left(\frac{\lambda_+ + \lambda_- - \xi}{l}\right) \right], \quad (12)$$

$$F(y) = y \lg(1 + y^{-2}) + 2 \operatorname{arctg}(y), \quad \xi = x - Ut.$$

Анализ выражения (12) показывает, что электрические возмущения представляют собой два «размытых» импульса противоположных полярностей, соответствующих фазам сжатия и разрежения в УВ. Характерно, что электрический сигнал возникает раньше момента прихода УВ. Это связано с влиянием слабого рассеянного электрического поля перед фронтом УВ.

При условии $\lambda_+ \ll l$, упрощая формулу (12), получаем следующую оценку амплитуды возмущений: $E_m \approx \rho_0 \lambda_+ V_+ \ln(l/\lambda_+) / (\epsilon_0 U)$. Этот результат, полученный для короткой УВ, физически соответствует полю заряженной тонкой поперечной полосы и ее электрического изображения в земле.

В обратном пределе, когда $\lambda_+ \gg l$, получаем $E_m \approx \rho_0 V_+ / (\epsilon_0 U)$. Данный результат (для протяженной УВ) отвечает полю плоского конденсатора, образованного зарядами тяжелых ионов, уплотненными в электродном слое атмосферы ударной волной, и зарядами противоположного знака, индуцированными в земле.

Анализ экспериментальных данных показывает, что наблюдается приблизительно пропорциональность величин E_m и $\lambda_+ V_+$, сохраняющаяся для различных приведенных расстояний и масс ВВ. Используя параметры $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, $N_0 = 5 \cdot 10^9 \div 5 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$, $\lambda_+ \approx 10 \text{ м}$, $V_m \approx 35 \text{ м/с}$, $U \approx 350 \text{ м/с}$, $l = 100 \text{ м}$, получаем теоретическую оценку $E_m \approx 200 \div 2000 \text{ В/м}$, которая соответствует сигналу, приведенному на рис. 2, б. Заметим, что ударное сжатие способствует освобождению ионов, находящихся в связанном состоянии, что приведет к увеличению плотности электрического заряда в УВ и, как следствие, к росту амплитуды электрического сигнала.

Проведенные в работе исследования показали, что теоретические оценки амплитуд сигналов согласуются с экспериментальными данными. Таким образом, находят подтверждение физические представления, лежащие в основе этих оценок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боронин А. П., Капинос В. Н., Минеев В. Н. О физическом механизме генерации электромагнитного поля при взрыве зарядов конденсированного ВВ. Обзор литературы // ФГВ.— 1990.— 26, № 5.— С. 110—116.
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 // ФГВ.— 1990.— 26, № 4.— С. 117—121.
4. Соболев Г. А., Демин В. А. Механоэлектрические явления в Земле.— М.: Наука, 1980.— 216 с.
5. Чалмерс Дж. А. Атмосферное электричество.— Л.: Гидрометиздат, 1974.
6. Бикар Дж. Влияние радиоактивности и загрязнений на элементы атмосферного электричества // Проблемы атмосферного электричества: Тр. III Международной конференции по электричеству атмосферы и космического пространства.— Л.: Гидрометеоздат, 1969.— С. 68—104.
7. Noppel W. A. Theory of electrode effect // J. Atm. Terrest. Phys.— 1967.— 29, N 4.— P. 709—721.

117334, г. Москва
Институт динамики геосфер
РАН

Поступила в редакцию
15/VI 1992