

УДК 550 388.2

ИОНОСФЕРНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ НАД ЭПИЦЕНТРОМ ПРОМЫШЛЕННОГО ВЗРЫВА

В. И. Дробжжев, Е. В. Железняков, И. К. Идрисов,
М. З. Калиев, В. В. Казаков, В. М. Краснов, Г. М. Пеленицын,
В. Л. Савельев, Н. М. Салихов, А. Д. Шингаркин

Приводится сопоставление результатов экспериментов, полученных во время двух промышленных взрывов. Констатируется появление одинаковых минутных пульсаций в геомагнитном поле. Подтверждена эффективность воздействия наземных промышленных взрывов на ионосферу энергией в несколько сотен тонн ТНТ, зависимость длительности ионосферного отклика от энергии взрыва. По доплерограмме восстановлен временной профиль скорости нейтрального газа в акустическом возмущении в точке отражения зондирующей радиоволны на высоте ~ 200 км.

В ноябре 1981 г. Институтом ионосферы АН КазССР в рамках проекта «Масса» при содействии треста Казахвзрывпром под Алма-Атой был проведен специальный исследовательский взрыв [1,2]. Получен уникальный экспериментальный материал [1,2], подтвердивший эффективность воздействия на атмосферу, ионосферу и магнитосферу взрывов мощностью сотни тонн ТНТ [3]. Для дальнейшего накопления экспериментальных результатов по искусственным воздействиям на атмосферу и ионосферу был проведен дополнительный эксперимент.

Взрыв мощностью 450 т ТНТ был произведен 24 октября 1984 г. в 12 ч 43 мин 20 с по Гринвичу в 60 км южнее г. Бухары Узбекской ССР. Производился выброс песчаной породы при строительстве трехсотметрового канала. Заряд распределялся по скважинам глубиной порядка 20 м. Масса эквивалентного по интенсивности излучения ударной воздушной волны сосредоточенного заряда, рассчитанная на основе работы [5], составила ~ 60 т ТНТ.

Комплекс измерительной аппаратуры в зоне взрыва включал в себя: квантовый магнитометр «М-33», электростатический флюксметр струнного типа и две доплеровские установки. Регистрирующая аппаратура устанавливалась в районе озера Денгиз-Куль (рис. 1). Две высокостабильные частоты 2 и 4,9 МГц для доплеровских измерений излучались из пункта Караул-Базар. Одновременно проводился прием этих же частот на доплеровских установках в г. Алма-Ате.

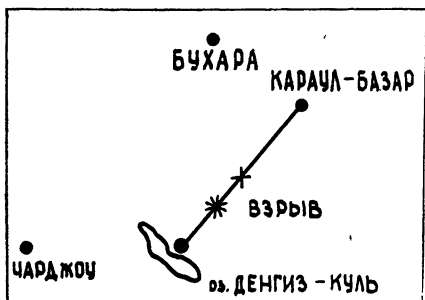


Рис. 1.

Расстояние между Денгиз-Кулем и Караул-Базаром ~ 70 км, а расстояние от середины радиотрассы (крестик на схеме) до места взрыва ~ 13 км.

Точность измерений вариаций геомагнитного поля квантовым магнитометром составляла 0,1 нТл при дискретности измерений 15 с. Измерения были начаты за сутки до события и завершились через 30 часов после взрыва.

Результаты измерений сопоставлялись с записями стандартного T -вариометра магнитной обсерватории Алма-Ата. На рис. 2а приве-

дены графики вариаций полного вектора геомагнитного поля в пункте Денгиз-Куль. Видно, что через 14 мин после взрыва на вариации T отмечена геомагнитная пульсация с периодом ~ 1 мин и амплитудой $\sim 1,5$ нТл. На обсерваторской записи этой пульсации не наблюдалось (возможно, из-за низкой чувствительности магнитометра 2 нТл/мм). В эксперименте «Масса» [1,2] примерно такая же пульсация наблюдалась через 10 мин после взрыва (рис. 2б).

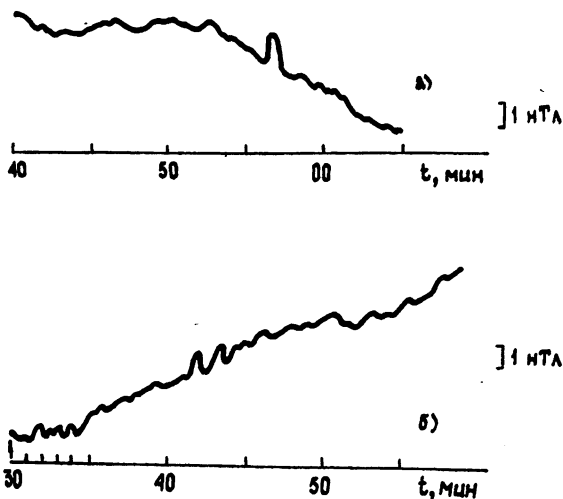


Рис. 2.

Подробный анализ геомагнитной активности в этот период [2] показал, что возможным источником наблюдаемых геомагнитных пульсаций могла быть изолированная суббуря в ночном секторе авральной зоны на магнитоспокойном фоне. В эксперименте, проведенном в районе поселка Денгиз-Куль, пульсация наблюдалась также во время фазы спада небольшой суббури, но на фоне остаточных явлений после магнитной бури 18.10.1984 г. Согласно [4] период таких геомагнитных пульсаций (типа $P_i 2$) уменьшается с ростом магнитной возмущенности, что не наблюдалось в рассматриваемых экспериментах. Следует также отметить, что при проведении обоих экспериментов в течение контрольного срока измерений (сутки до и после взрыва) подобных вариаций не отмечалось. Поэтому приуроченность появления указанных геомагнитных пульсаций к моментам проведения промышленных взрывов может быть не случайной.

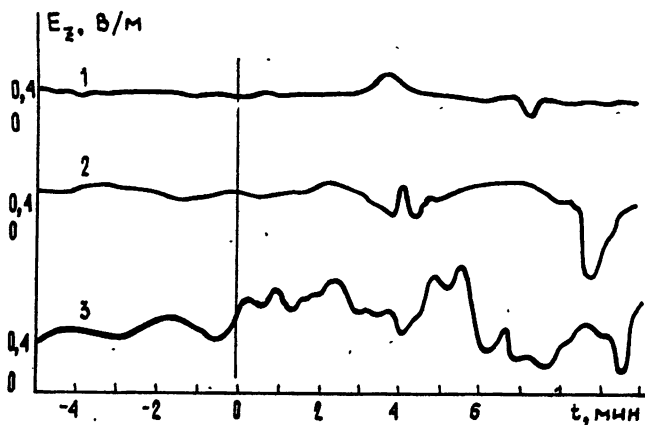


Рис. 3.

Одновременно на месте эксперимента проводились измерения E_z -компоненты атмосферного электрического потенциала с помощью

электростатического флюксметра струнного типа в диапазоне напряженностей поля ± 1500 В/м с чувствительностью 10 В/м на единицу выходного напряжения датчика.

Для выявления характерных вариаций E_z от взрыва предварительно была проведена серия калибровочных измерений с использованием малых накладных зарядов (5—10 кг ТНТ). При этом датчик электростатического поля помещался на расстоянии ~ 1 км от места взрыва. Примеры вариаций E_z при малых взрывах приведены на рис. 3.

Графики 1, 2 и 3 построены по результатам измерений величины E_z 27.09.1984 г. в 10 ч 13 мин, 12 ч 18 мин и 12 ч 49 мин УТ соответственно. Наблюдения проводились в безветренную погоду и при малых амплитудах вариаций фоновых колебаний электрического потенциала. Во всех случаях через 3—4 минуты после взрыва наблюдалось увеличение потенциала на ~ 30 В/м длительностью ~ 1 мин. Характерно, что через 6—9 мин отмечается такая же вариация, но с отрицательным знаком.

Следует отметить, что при взрыве 24.10.84 г. вышеуказанные вариации E_z не выявлены. Возможная причина этого — большой уровень фоновых колебаний.

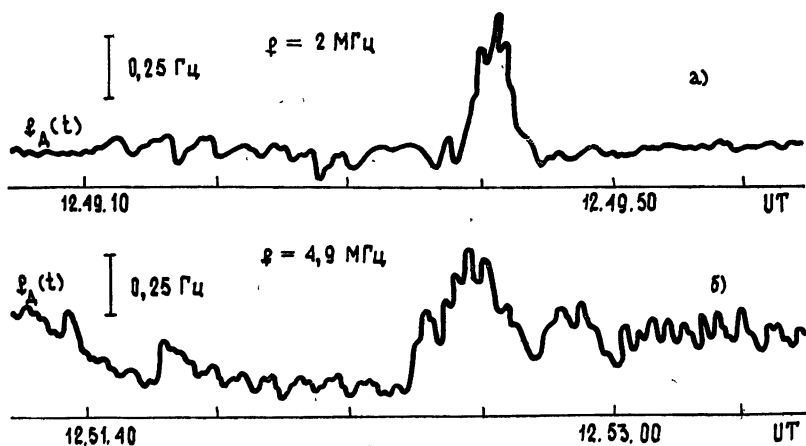


Рис. 4.

Первый отклик ионосферы на взрыв был зарегистрирован в E -области (частота наклонного радиозондирования $f=2$ МГц) на трассе Караул-Базар — Денгиз-Куль в 12 ч 49 мин 38 с, т. е. через 6 мин 18 с после взрыва (рис. 4а). Из рисунка видно, что положительный выброс доплеровского сдвига частоты, равный 0,6 Гц, значительно превышает фоновый уровень и имеет длительность ~ 6 с (постоянная времени аппаратуры 0,5 с).

Таблица 1

Место эксперимента	Время прихода возмущения в E -область ($f = 2$ МГц)	Время прихода возмущения в F -область ($f = 4,9$ МГц)
Алма-Ата	6 мин 55 с	8 мин 40 с
Денгиз-Куль	6 мин 18 с	9 мин 10 с
Время распространения возмущения от E - до F -области	Длительность возмущения для $f=2$ МГц	Длительность возмущения для $f=4,9$ МГц
1 мин 45 с	20 с	65 с
2 мин 52 с	6 с	30 с

Высот F -области ионосферы возмущение от взрыва достигло в 12 ч 52 мин 30 с и длилось в течение ~ 30 с (запись $f_d(t)$ для частоты зондирования $f=4,9$ МГц представлена на рис. 4б). Время распространения возмущения от высоты отражения сигнала с частотой 2 МГц до высоты отражения сигнала с $f=4,9$ МГц составило 2 мин 52 с.

В табл. 1 для сравнения представлены результаты наблюдений за возмущениями в ионосфере при взрыве под Алма-Атой и Денгиз-Кулем. Отмечается приближенное совпадение времени прихода возмущения на высоты E - и F -областей ионосферы (ввиду отсутствия сведений о профилях электронной концентрации, температуры и ветров в месте проведения эксперимента эти факты затруднительно проанализировать). В то же время наблюдается различие длительностей возмущений, что в соответствии с [5, 8] может быть объяснено разной мощностью взрывов.

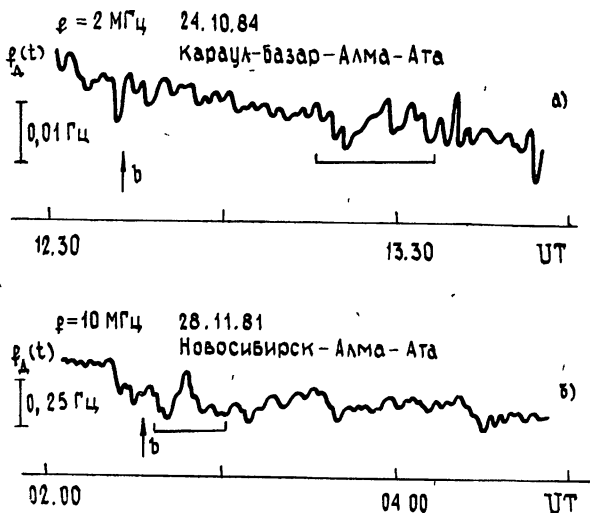


Рис. 5.

На рис. 5а представлена запись $f_d(t)$, полученная на трассе Караул-Базар—Алма-Ата ($f=2$ МГц). Расстояние от места взрыва до проекции на землю точки отражения радиоволны составляло ~ 500 км, стрелкой обозначено время взрыва. Через 34 мин после взрыва на записи $f_d(t)$ появилось небольшое возмущение длительностью ~ 12 мин. Интересно отметить, что возмущение длительностью ~ 15 мин наблюдалось также на записи $f_d(t)$ во время взрыва под Алма-Атой ($f=15$ МГц, трасса Новосибирск—Алма-Ата, рис. 5б).

Запись доплеровского сдвига частоты $f_d(t)$ (рис. 6а) во время взрыва под Алма-Атой [4] на слабонаклонной трассе Тургенъ—Капчагай на частоте 4,9 МГц дала возможность восстановить временной профиль скорости нейтрального газа $V_n(t)$ в точке отражения радиоволны.

Расчет $V_n(t)$ проводился по формуле [6]

$$V_n(t) = -L_0 \int_0^{\infty} \frac{dt'}{T} e^{-t'/T} \omega_d(t+t'),$$

где L_0 , T — коэффициенты, учитывающие характеристики нейтральной и заряженной компонент, направление распространения радиоволны и акустического импульса, а также направление магнитного поля, $\omega_d = 2\pi f_d$.

При этом использовались следующие значения параметров, близкие к условию эксперимента [7]: $\cos \theta_{Az} = 0,9830$, $\cos \theta_{Bc} = -0,8761$,

$\cos \theta_{Bz} = -0,8844$, $\cos \theta_{cz} = 0,9658$, $f = 4,9$ МГц, $c_s = 720$ м/с, $H_e = 18,21$ км, $H = 50$ км, $z_0 = 200$ км, где θ_{hz} , θ_{Bc} , θ_{Bz} — соответственно углы между начальным направлением радиоволны и вертикалью, между магнитным полем и направлением распространения акустического импульса, между магнитным полем и вертикалью. Высота отражения радиоволны (z_0) определялась по профилю электронной концентрации, построенному по ионограмме, полученной на Алма-Атинской ионосферной станции спустя ~ 5 мин после взрыва ($LT = 7^h35^m$); $H_e = [(d/dz) \ln N_e]^{-1}$ — высота однородной ионосферы — рассчитывалась по доплерограмме и хорошо согласуется со значением, полученным из профиля электронной концентрации $H_e \sim 18$ км. Скорость звука (c_s) и высота однородной атмосферы (H) определялась по модели атмосферы CIRA-61 [6].

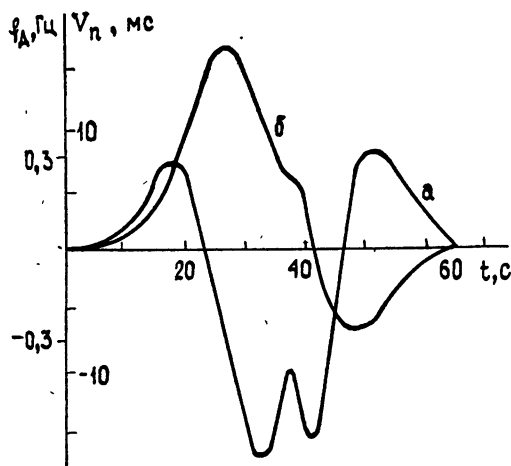


Рис. 6.

Восстановленная зависимость возмущения скорости нейтрального газа от времени на высоте ~ 200 км и ~ 54 км на восток от эпицентра взрыва приведена на рис. 6б.

Таким образом, анализ результатов наблюдений во время двух взрывов выявил следующее.

Имеет место совпадение времени появления минутных пульсаций на записях геомагнитного поля спустя 10—15 мин после взрывов. Подтверждена эффективность воздействия промышленных взрывов мощностью сотни тонн ТНТ на ионосферу, а также зависимость длительности ионосферного отклика от эквивалентной мощности взрыва.

Ионосферный отклик на взрыв (~ 250 т ТНТ) дал возможность определить временной профиль скорости движения нейтрального газа в точке отражения радиоволн на высоте примерно 200 км. Форма возмущения скорости представляет собой двухполярный импульс (максимальное значение скорости ~ 15 м/с), согласующийся с теоретическими представлениями [8] о распространении в атмосфере акустического возмущения от взрыва на большие расстояния.

В заключение выражаем благодарность сотрудникам Института физики Земли АН СССР А. М. Булошникову и И. Л. Гуфельду за помощь в организации экспедиционных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дробжев В. И., Краснов В. М., Калиев М. З. и др. — Вестник АН КазССР, 1982, № 8, с. 64.
2. Альперович Л. С., Вугмейстер Б. О., Гохберг М. Б., Дробжев В. И. и др. — Изв. АН СССР Сер. Физика Земли, 1985, № 11, с. 83.
3. Вланс Е. — Ann. Geophys., 1985, 3, № 6, p. 673.
4. Гульельми А. В., Троицкая В. А. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. — М.: Наука, 1973. — 208 с.

5. Цейтлин Я. И., Смолий Н. И. Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов. — М.: Недра, 1981.
6. Савельев В. Л. — В сб.: Волновые возмущения в ионосфере. — Алма-Ата: Наука, 1987, с. 60.
7. Справочник по геофизике. — М.: Наука, 1965.
8. Орлов В. В., Уралов А. М. — Изв. АН СССР. Сер. ФАО, 1984, № 6, с. 476.

Институт ионосферы
АН КазССР

Поступила в редакцию
28 февраля 1986 г.,
после переработки
6 августа 1986 г.

IONOSPHERIC RESPONSES TO THE ACOUSTIC WAVES ABOVE EXPLOSION EPICENTER

V. I. Drobzhev, E. V. Zheleznyakov, I. K. Idrisov, M. Z. Kaliev, V. V. Kazakov,
V. M. Krasnov, G. M. Pelenitsyn, V. L. Savel'ev, N. M. Salikhov, A. D. Shingarkin

From comparison of experimental results of the industrial explosions the rise of minute geomagnetic field pulsations, the acoustic energy propagation up to 200 km, the independence of the wave propagation velocity on place, time and power of the explosion were revealed. Neutral gas velocity time profile in acoustic disturbance of the point of probe wave reflection (~200 km height) has been restored by the dopplerogram.

Аннотации депонированных статей

УДК 535.21:538.97

ДИНАМИКА ФОРМИРОВАНИЯ АЭРОЗОЛЬНОГО МИКРОФАКЕЛА ПРИ НИЗКОПОРОВОМ ОПТИЧЕСКОМ ПРОБОЕ

В. А. Вдовин, Ю. М. Сорокин

На основе замкнутой газодинамической модели проведено детальное численное исследование формирования и разогрева плазменного микрофакела на аэрозольной частице для условий, соответствующих возникновению низкорогового коллективного оптического разряда (НКОР) в плотных аэродисперсных системах.

Установлено, что построенной ранее для НКОР пороговой модели коллективного разогрева (КР) соответствует предельный режим объемного энерговыделения при развитом испарении изолированной частицы (ПОР), реализующийся при интенсивно-

стях падающего излучения $I > I_{пор} \sim \Delta p_{\infty} \sqrt{\frac{c_p t_a}{c_v R \Gamma_k}}$. Показано наличие в развитом паровоздушном ореоле двух пространственных областей, различающихся между собой преобладающим характером теплопереноса (конвективным или теплопроводностным). Установлена определяющая роль периферийной области ореола с теплопроводностным характером теплопереноса и приближенно постоянным (атмосферным) давлением для разогрева микрофакела.

На основе анализа динамики микрофакела в сверхпороговых для ПОР условиях сформулированы качественные условия перехода микрофакела в самоподдерживающийся режим разогрева; предложена концепция критической массы аэрозольной частицы, необходимой для разогрева ее паровоздушного ореола. Приведена довольно грубая линейная аппроксимация по численным данным зависимости критической массы m_* от интенсивности падающего излучения I :

$$m_* = m_*^0 - \beta I, \quad m_*^0 \sim 10^{-10} \text{ кг}, \quad \beta \sim 10^{-19} \text{ кг} \cdot \text{см}^2 / \text{Вт}.$$

Численно смоделированы генерация и эволюция сильных высокочастотных ($f \sim 1$ МГц) акустических возмущений при различных режимах развития НКОР.

Статья депонирована в ВИНТИ,
рег. № 7038-В 87. Деп. от 30 сентября 1987 г.