

УДК 550.388.2

Я. В. ДРОБЖЕВА, А.Н. МАСЛОВ

## О РОЛИ СФЕРИЧЕСКОЙ РАСХОДИМОСТИ ВОЛНОВОГО ФРОНТА АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ ПРИ ЕЕ РАСПРОСТРАНЕНИИ ВВЕРХ ЧЕРЕЗ АТМОСФЕРУ

На основе экспериментально проверенной модели распространения акустических волн в неоднородной атмосфере проведены расчеты параметров акустического импульса для сферической и плоской волн при их распространении вверх через атмосферу. Показано, что в области высот 100–130 км для сферической волны в высотном профиле амплитуды акустического импульса наблюдается максимум, тогда как для плоской волны – лишь перегиб.

Исследование роли сферической расходимости волнового фронта акустической волны при ее распространении вверх через атмосферу необходимо для понимания физики распространения волн и объяснения некоторых закономерностей, полученных авторами ранее на основе адекватной эксперименту модели [1]. Данная модель описывает эволюцию формы акустического импульса и время его распространения от различных источников акустической энергии в неоднородной атмосфере с учетом поглощения, нелинейных эффектов и геометрической расходимости волнового фронта. Следует отметить, что решения уравнений, которые легли в основу модели, не ограничены приближением геометрической акустики и позволяют рассчитывать параметры акустического импульса, когда его пространственные размеры соизмеримы или больше вертикальных масштабов изменения фоновых параметров атмосферы. Модель была протестирована на основе экспериментальных данных, полученных во время калибровочного точечного наземного химического взрыва Mill Race. При этом сопоставления экспериментальных данных и расчетов проводились для 8 точек пространства одновременно и высот атмосферы от 9 до 262 км; ошибка расчетов не превышала 10%.

Модель и соответствующий комплекс программ включают в себя:

процесс генерации акустического импульса точечным взрывом;

наклонное распространение акустического импульса вверх через реальную атмосферу;

расчет высотных профилей параметров атмосферы.

Высотные профили атмосферы рассчитывались на основе модели нейтральной атмосферы

MSIS-90 [2], которая является эмпирической и требует для расчета следующие входные параметры: дату, время, координаты, средний за три месяца индекс солнечной активности  $F_{10.7A}$ , индекс солнечной активности за предыдущий день  $F_{10.7}$  и индекс геомагнитной активности  $A_p$ . Данная модель позволяет получить временные и пространственные зависимости параметров атмосферы для любой области земного шара.

На основе данной модели проводились расчеты распространения двух типов волн: сферической и плоской вверх через атмосферу. В сферической волне распределение плотности, скорости и т.д. зависит только от расстояния до некоторого центра. В сферической волне амплитуда падает обратно пропорционально расстоянию до центра. Плоская волна отличается тем свойством, что направление ее распространения и ее амплитуда одинаковы во всем пространстве.

В качестве источника акустической волны рассматривался точечный наземный химический взрыв, генерирующий сферическую акустическую волну. Затем для различных мощностей взрыва рассчитывались параметры начальных акустических импульсов. Далее в целях установления роли сферической расходимости волнового фронта исследовалось распространение вверх через атмосферу акустической волны с учетом сферической расходимости и без ее учета, т.е. распространение плоской волны.

Расчеты зависимости параметров акустического импульса (амплитуды и длительности) от высоты атмосферы, генерируемого точечным взрывом различной мощности  $Q$ , проведены для 20 ноября 1998 г.

Координаты взрыва 46.3 N; 63.5 E, время взрыва 06:40:00 UT. Геофизические условия: ин-

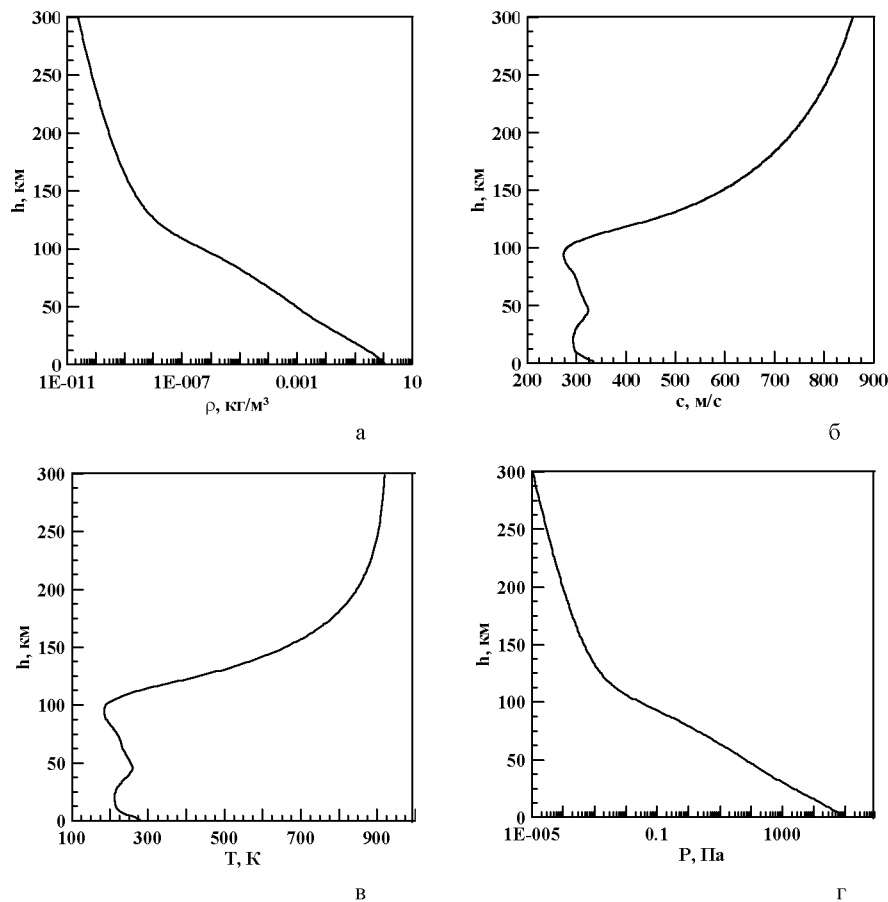


Рис. 1. Высотные профили атмосферы, рассчитанные по модели MSIS-90: а – профиль плотности атмосферы; б – профиль скорости звука; в – профиль температуры атмосферы; г – профиль давления атмосферы

декс солнечной активности  $F_{10.7}=116,5$ ,  $F_{10.7A}=130,5$  (среднее значение за три месяца), индекс геомагнитной активности  $A_p = 10$ , давление на поверхности Земли  $101813,2$  Па скорость звука  $336,8$  м/с. Высотные профили плотности атмосферы, скорости звука и коэффициента поглощения, рассчитанные по модели MSIS-90, приведены на рис. 1.

На рис. 2 для примера представлен начальный акустический импульс (импульс, рассчитанный на границе перехода ударной волны в акустическую), рассчитанный для взрыва мощностью  $5$  кг ТНТ.

Далее этот импульс использовался для расчетов по модели, описанной выше, для исследования распространения акустической волны вертикально вверх через атмосферу. На рис. 3 представлены акустические импульсы (изменение скорости гидродинамических частиц со временем ( $V$ )) для этих двух случаев и высоты атмосферы  $180$  км.

Из рис. 3 видно, что с учетом сферической расходимости амплитуда импульса по сравнению с начальной уменьшилась в  $13$  раз, тогда как неучет сферической расходимости привел к увеличению амплитуды в  $10$  раз при распространении на данную высоту атмосферы. При этом увеличение длительности (величина между пиками

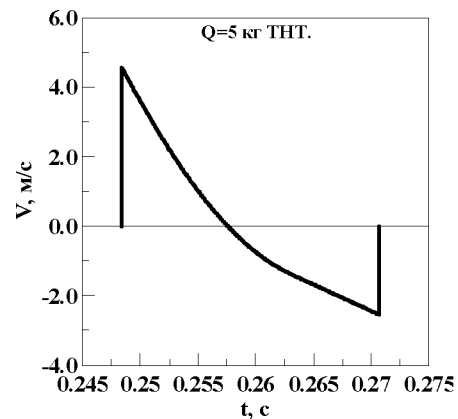


Рис. 2. Начальный акустический импульс, генерированный точечным взрывом мощностью  $Q=5$  кг ТНТ

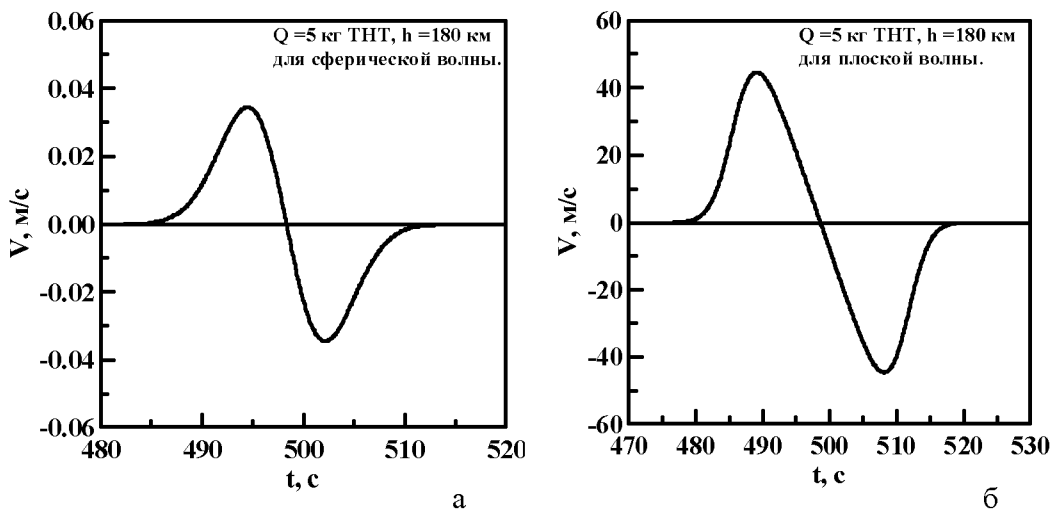


Рис. 3. Акустический импульс на высоте 180 км для сферической (а) и плоской (б) волны; мощность взрыва  $Q=5$  кг ТНТ

импульса) произошло на близкую величину для обоих случаев, приблизительно в  $10^3$  раз.

Как отмечалось выше, модель помимо геометрической расходимости волнового фронта учитывает неоднородность атмосферы, поглощение и нелинейные эффекты. На рис. 4 представлены вариации амплитуды и длительности акустического импульса с высотой для волны со сферически расходящимся фронтом. Расчеты сделаны для мощностей взрыва 500, 2000, 4000 и 5000.

Из рис. 4,а видно, что скорость гидродинамических частиц импульса достигает максимума в области высот 110–130 км. Наличие максимума можно объяснить следующим образом: в соответствии с законом сохранения площади акустического импульса, распространяющегося в

неоднородной атмосфере, амплитуда скорости гидродинамических частиц строго зависит от плотности атмосферы. Начиная с высоты порядка 120 км скорость падения атмосферной плотности с высотой уменьшается, из-за этого замедляется скорость роста амплитуды частиц импульса, тогда как воздействие эффектов поглощения увеличивается. В результате формируется максимум.

Исследование изменения длительности фазы сжатия импульса с высотой (рис. 4, б) для данных мощностей взрыва показало, что до высоты около 70 км длительность увеличивается практически одинаково для всех мощностей. Выше данной высоты с увеличением мощности увеличивается скорость роста длительности импульса с высотой, и чем больше мощность взрыва,

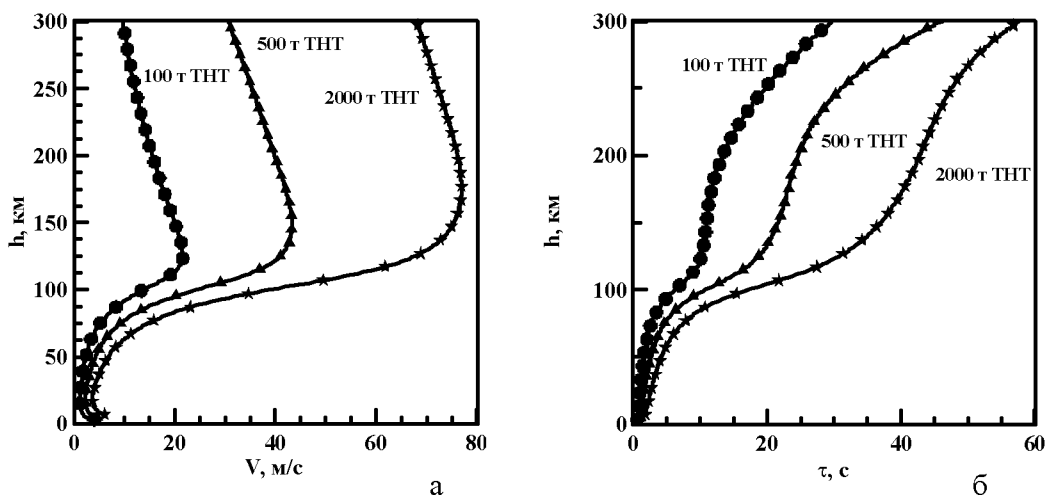


Рис. 4. Изменение максимальной скорости гидродинамических частиц (а) и длительности акустических импульсов (б) с высотой для взрывов различной мощности

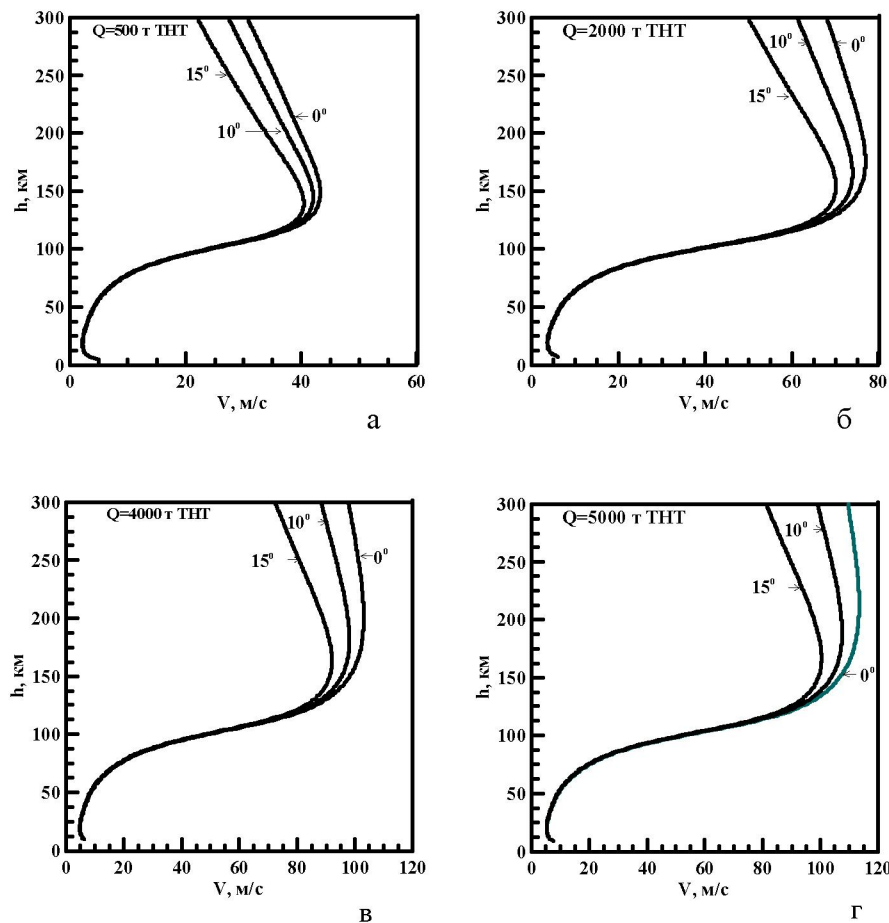


Рис. 5. Изменение амплитуды акустических импульсов с высотой для взрывов мощностью 500 (а), 2000 (б), 4000 (в) и 5000 т ТНТ (г) и различных углов выхода акустического луча

тем больше длительность для каждой высоты атмосферы. Из рис. 4, а видно, что с увеличением мощности максимум становится менее явным. Это можно объяснить тем, что с повышением мощности возрастает длительность акустического импульса, а поглощение атмосферы меньше влияет на импульсы большой длительности. Для меньших мощностей, а именно от 1 до 100 т ТНТ, наблюдается идентичная зависимость, но максимум проявляется более четко. На рис. 5 представлены результаты расчета амплитуды и длительности импульса в зависимости от высоты для разных углов выхода луча.

Как видно из рис. 5, максимум в районе обозначенных высот 120 км более или менее явно присутствует и для других углов начального выхода акустического луча. Стоит лишь заметить, что для больших углов выхода луча максимум проявляется более четко для данной мощности взрыва. С ростом угла выхода увеличивается

путь, пройденный импульсом, а следовательно, накапливается эффект, связанный с поглощающими свойствами атмосферы.

Расчеты для случая распространения плоской волны (без учета геометрической расходимости волнового фронта) представлены на рис. 6, где представлены вариации амплитуды и длительности акустического импульса с высотой атмосферы в случае плоской волны для различных мощностей взрыва. Для каждой мощности сначала был рассчитан начальный акустический импульс, а затем исследовалось изменение его параметров при распространении вверх через атмосферу.

Как видно, что в области высот от 100 до 130 км на кривой зависимости скорости гидродинамических частиц в импульсе (см. рис. 6, а) от высоты атмосферы наблюдается резкий перегиб. Ниже этого перегиба амплитуда акустического импульса увеличивается с высотой, а

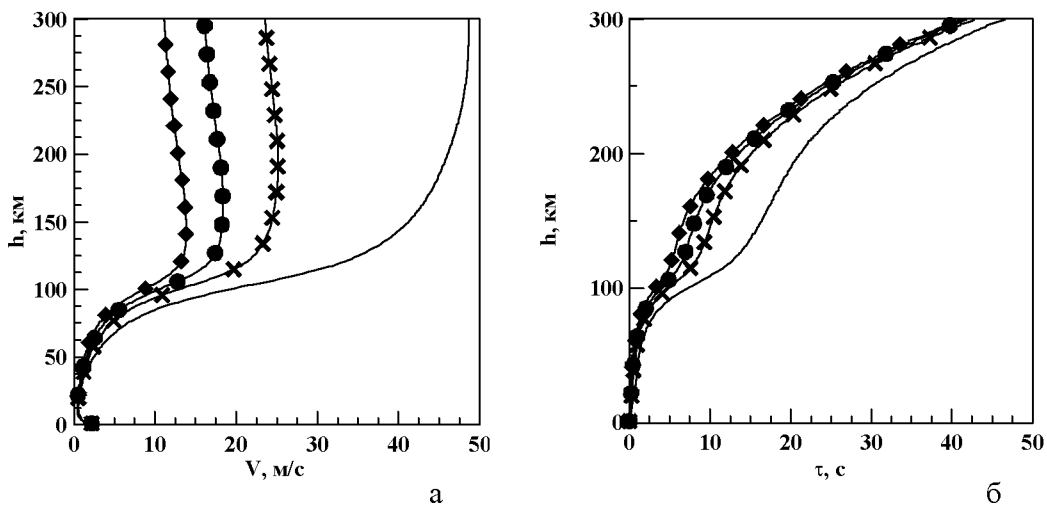


Рис. 6. Изменение максимальной скорости гидродинамических частиц (а) и длительности акустических импульсов (б) с высотой для плоской волны, движущейся вертикально через атмосферу от поверхности Земли, для взрывов различной мощности (кг ТНТ): 0,05 (ромбы); 0,15 (кружочки); 0,5 кг (крестики) и 5 (сплошная)

выше него остается практически постоянной. Если сопоставить данные расчеты с аналогичными расчетами, проведенными для волны со сферически расходящимся фронтом (см. рис. 4, а), то можно отметить следующую особенность. Например, для сферической волны и высоты атмосферы 120 км величина амплитуды составляет около 35 м/с для мощности взрыва 500 т ТНТ, аналогичная величина амплитуды в случае плоской волны наблюдается при мощности взрыва 5 кг ТНТ, при этом длительность импульса для обоих типов волн около 15 с. Следовательно, при практически одинаковой амплитуде и длительности акустического импульса в случае сферической волны на высотном профиле амплитуды скорости виден максимум в районе 120 км, а для плоской волны – лишь перегиб. При этом необходимо повторить, что в расчетах для обоих типов волн учитывались неоднородность атмосферы, поглощение и нелинейные эффекты.

Таким образом, результаты, полученные на основе модельных расчетов, показали, что учет сферической расходимости волнового фронта акустической волны на расстояниях 100–140 км играет важную роль в изменении ее параметров. Использование приближения плоских волн для исследования распространения акустических волн в атмосфере может привести к серьезным ошибкам.

*Работа выполнена в рамках проекта 221 (контракт № 8 от 2 марта 2006 года) по программе фундаментальных исследований (шифр Ф.0351) по Государственному заказу.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Drobzheva Ya., Krasnov V. The acoustic field in the atmosphere and ionosphere caused by a point explosion on the ground. // J. Atmos. and Solar-Terr. Phys. 2003. V. 65. Issue 3. P. 369-377.
2. Hedin A.E. Extension of the MSIS thermospheric model into the middle and lower atmosphere // J. Geophys. Res. 1991. A96. P. 1159-1172.

#### Резюме

Модельдік есептеулер негізінде мына жайт көрсетілген: акустикалық толқын фронтының сфералық алшақтылығы оның параметрлерінің өзгеруінде айтарлықтай рөл атқарады. Акустикалық толқынның атмосфера арқылы жоғары таралуын зерттеу барысында жазық толқындардың жуықтауын пайдалану елеулі қателіктерге әкеп соғуы мүмкін.

#### Summary

On the basis of model calculations was shown that spherical divergence of wave front of acoustic wave plays very important role in the variations of its parameters. Using approach of plate wave for investigation of propagation of acoustic waves upward through the atmosphere can give the serious errors.

*Институт ионосферы МОН РК,  
г. Алматы*