

УДК 523.6

УДАРНЫЕ ВОЛНЫ ОТ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ВЗРЫВОВ, МОДЕЛИРУЮЩИХ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЕ ПРИ ПОЛЕТЕ МЕТЕОРОИДОВ В АТМОСФЕРЕ

© 2025 г. В. В. Шувалов*

*Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия***E-mail: shuvalov@idg.ras.ru*

Методами компьютерного моделирования рассматриваются цилиндрические взрывы в воздухе, моделирующие энерговыделение в атмосфере при пролете метеороидов радиусом 1–10 м. Показано, что ударная волна, генерируемая такими взрывами, на больших расстояниях становится сферической, но ее амплитуда зависит от угла между направлением ее распространения и траекторией метеороида. Максимальную амплитуду имеет волна, распространяющаяся перпендикулярно траектории. Зависимость от угла усиливается при уменьшении радиуса метеороида. Определяются области пространства, в которых при регистрации акустических возмущений, генерируемых падением метеороида, сначала наблюдается приход слабой цилиндрической волны, потом более сильной сферической, и области пространства, в которых наблюдается только приход сферической волны.

Ключевые слова: цилиндрический взрыв, метеороид, численное моделирование, ударная волна.

Для цитирования: Шувалов В.В. Ударные волны от цилиндрических взрывов, моделирующих энерговыделение при полете метеороидов в атмосфере // Динамические процессы в геосферах. 2025. Т. 17. № 4. С. 71–81. https://doi.org/10.26006/29490995_2025_17_4_71

Введение

При движении метеороидов в атмосфере, как и при движении любого тела, движущегося со сверхзвуковой скоростью, генерируется баллистическая ударная волна. После разрушения и торможения метеороида (если он не долетает до поверхности) ударная волна продолжает распространяться в атмосфере. Если энергия падающего тела достаточно велика, то ударная волна может вызвать заметные разрушения на поверхности, как это было при падении Тунгусского космического тела [Васильев, 2004] и Челябинского метеорита [Popova et al., 2013]. На больших расстояниях от эпицентра удара (т.е. от точки, где энерговыделение максимально) ударная волна ослабевает и превращается в звуковую или инфразвуковую. Регистрация инфразвуковых возмущений, наряду с регистрацией световой вспышки, позволяет оценить энергию метеороида и получить некоторую информацию о его фрагментации и энерговыделении в атмосфере [Edwards, 2009].

Энерговыделение в атмосфере при пролете метеороида грубо можно оценить величиной $c_d \rho u^2 S$, где c_d – коэффициент порядка единицы, который характеризует форму метеороида, ρ – плотность воздуха, u – скорость метеороида, S – площадь эффективного поперечного сечения метеороида (или облака его фрагментов). На больших высотах (до начала фрагментации и заметного торможения) энерговыделение в атмосфере экспоненциально увеличивается в соответствии с увеличением плотности воздуха. Метеороиды размером более метра перед тем как затормозиться, как правило, испытывают несколько фрагментаций [Ceplecha, 1994]. Каждая фрагментация приводит к увеличению эффективного сечения метеороида и, соответственно, увеличению энерговыделения в атмосфере. При торможении метеороида скорость u стремится к нулю и энерговыделение тоже. В результате кривая энерговыделения имеет колоколообразную форму, на фоне которой могут выделяться отдельные пики, соответствующие моментам фрагментации.

При анализе инфразвуковых возмущений, генерируемых пролетом метеороидов через атмосферу, часто используется приближение, согласно которому источник возмущения представляет собой комбинацию цилиндрического взрыва, моделирующего полет неразрушенного тела и сферического взрыва или нескольких сферических взрывов, моделирующих моменты фрагментаций (см., например, [Revelle, 1976; McFadden et al., 2024]). Это предположение основано на том, что при полете метеороида энергия выделяется вдоль одной линии (траектории) и на больших (порядка десяти калибров) расстояниях ударная волна становится почти цилиндрической (т.к. ее радиальная скорость много меньше скорости метеороида), а длина участка или участков траектории, на которых наблюдаются пики интенсивности, связанные с разрушением, значительно меньше, чем расстояние до точки наблюдения. Возмущения от цилиндрического и сферических взрывов рассматриваются независимо друг от друга и потом суммируются. Если отдельных ярко выраженных всплесков нет, то ударную или звуковую волну на больших расстояниях рассматривают как волну, образованную точечным источником, энергия которого равна энергии всплеска, а высота соответствует максимуму световой кривой. Это предположение основано на том, что на большом расстоянии все взрывы становятся точечными. Насколько хорошо работают эти приближения не ясно. Характерная длина участка траектории, на котором происходит интенсивный высвет, составляет несколько километров, что намного больше, чем радиус почти цилиндрической баллистической ударной волны на начальной стадии ее распространения (для метеороидов размером 1–10 м). Поэтому на начальной и нелинейной стадии распространения ударной волны она близка к цилиндрической, но радиус цилиндра переменный, увеличивается в области фрагментации. Целью данной работы является детальное изучение генерации и распространения на большие (50–100 км) расстояния ударной волны, которая возникает при цилиндрических взрывах, моделирующих энерговыделение при полете метеороидов в атмосфере.

Постановка задачи и метод решения

Выделение энергии в атмосфере при пролете метеороида моделировалось функцией Гаусса:

$$\frac{dE}{dz} = \frac{E}{4\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(z - z_0)^2}{8}\right), \quad (1)$$

где E – полная выделенная энергия, равная начальной энергии метеороида, z – расстояние вдоль траектории, z_0 – высота максимального энерговыделения. Энергия выделялась внутри цилиндра переменного сечения. Энергия воздуха в цилиндре принималась равной $u^2/2$, плотность считалась такой же как в окружающем воздухе, а радиус цилиндра $r_0(z)$ выбирался таким, чтобы энерговыделение соответствовало формуле (1). При этом поперечное сечение нагретого цилиндра в каждой точке с точностью до константы c_d равно эффективному поперечному сечению метеороида или облака его фрагментов. Считалось, что $r_0(z) = 0$ при $|z - z_0| > 7$ км.

Для того, чтобы выяснить влияние на параметры ударной волны именно геометрии области энерговыделения, на первом этапе не учитывалась стратификация атмосферы, т.е. плотность воздуха была постоянной во всем пространстве и равна плотности воздуха на высоте z_0 . Были рассмотрены три варианта, соответствующие падению метеороидов радиусом $R = 10$ (аналог Челябинского метеорита [Popova et al., 2013]), 3 и 1 м, и энергиями E , равными, соответственно, 500, 15 и 0.5 кт ТНТ. Варианты отличаются разными соотношениями между длиной области энерговыделения (которая во всех вариантах одинакова и примерно равна характеристической высоте атмосферы) и ее средним радиусом. Начальная скорость метеороида считалась, равной 20 км/с. Высота z_0 выбиралась равной 30 км для $R = 10$ м, 38 км для $R = 3$ м и 45.6 км для $R = 1$ м для того, чтобы учесть, что более крупные метеороиды тормозятся и выделяют энергию на меньших высотах.

Для сравнения рассматривались соответствующие сферические взрывы с такими же энергиями на тех же высотах z_0 . Плотность воздуха и внутренняя энергия в сферической области энерговыделения

были такими же, как в случае энергосвечения по формуле (1). Радиус сферической области энергосвечения определялся значениями E .

Расчеты проводились по программе SOVA [Shuvalov, 1999]. Для простоты воздух считался идеальным газом с показателем адиабаты $\gamma = 1.4$. Так как энергосвечение, задаваемое формулой (1), симметрично относительно z_0 , то рассматривались только высоты $z > z_0$. Расчетная сетка состояла из 3000 точек в направлении z и 3000 точек в радиальном направлении r .

Результаты расчетов

На рис. 1 показана начальная стадия взрыва с $R = 10$ м, который примерно соответствует выделению энергии при падении Челябинского метеороида. В момент времени $t = 0.01$ с при $z - z_0 < 3$ км отчетливо видна волна разрежения, распространяющаяся внутрь цилиндра. При больших $z - z_0$, где начальный радиус цилиндра меньше, волна разрежения уже отразилась от оси симметрии. В момент времени $t = 0.1$ с волна разрежения уже отразилась от оси цилиндра на всем его протяжении. При $z - z_0 > 1.5$ км видна внутренняя ударная волна, которая образуется после схлопывания сильно разреженной области, формирующейся после отражения волны разрежения от оси цилиндра. На этой стадии вертикальное движение почти незаметно. Давление и плотность воздуха в каждом сечении меняются примерно так же, как при разлете бесконечного цилиндра соответствующего радиуса. Но вертикальное движение становится существенным уже через секунду после инициирования взрыва, что приводит к формированию вблизи оси цилиндра довольно сильной ударной волны, направленной вверх.

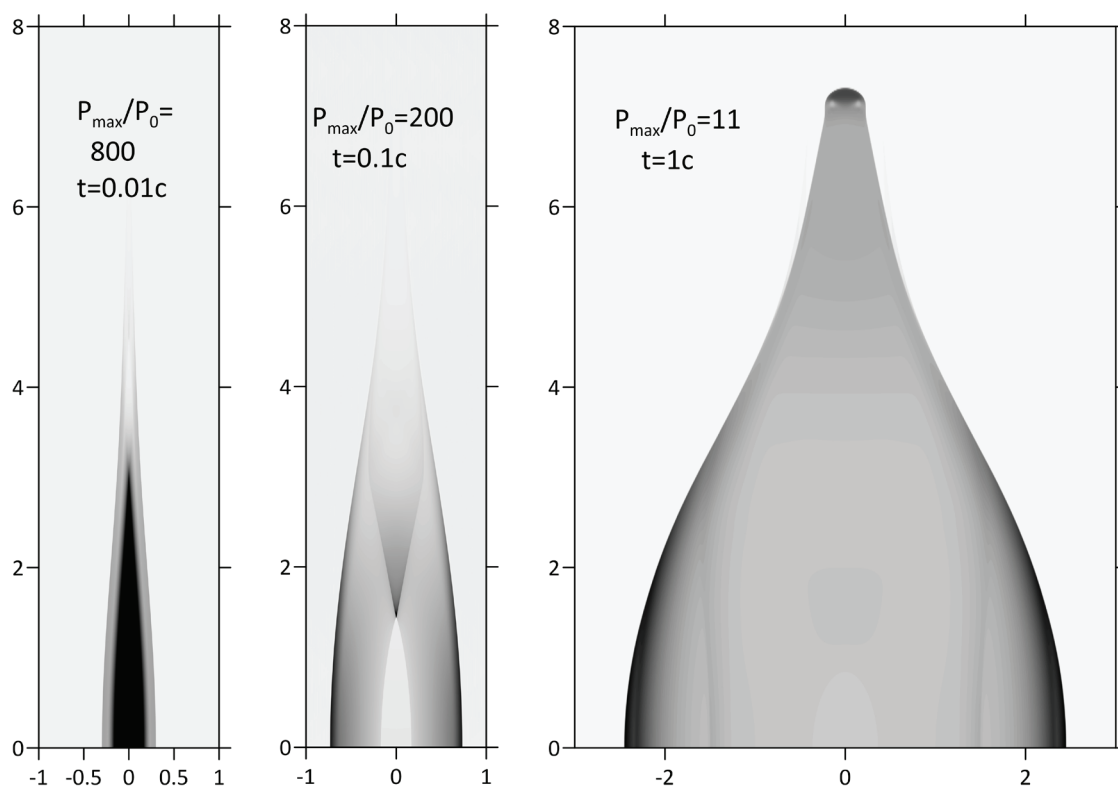


Рис. 1. Распределения давления в разные моменты времени t для взрыва, моделирующего падение метеороида радиусом $R = 10$ м. Более темные области соответствуют большому давлению. Отношения максимального давления к давлению окружающего воздуха указано на каждой панели. По горизонтальной оси отложено расстояние r от оси цилиндра в километрах, по вертикальной – расстояние вдоль траектории от точки максимума энергосвечения $z - z_0$ в километрах

На рис. 2 показано дальнейшее развитие течения после взрыва с $R = 10$ м. После того, как ударная волна распространяется в горизонтальном направлении на расстояния, сравнимые с вертикальным начальным размером области энергосвечения, форма ударной волны постепенно приближается

к сферической. Однако хорошо видно, что ее амплитуда существенно зависит от направления распространения. Самая сильная волна распространяется вдоль оси r . Первоначальная ударная волна, распространяющаяся вверх, формируется за счет расширения верхнего края области энерговыведения, где выделенная энергия (или начальный радиус нагретого цилиндра) мала. Постепенно формируется вторая, и более сильная, ударная волна, связанная с расширением центральной области, где энерговыведение максимально. В момент времени 30 с эта вторая волна уже хорошо видна, и ее амплитуда становится больше амплитуды первой волны.

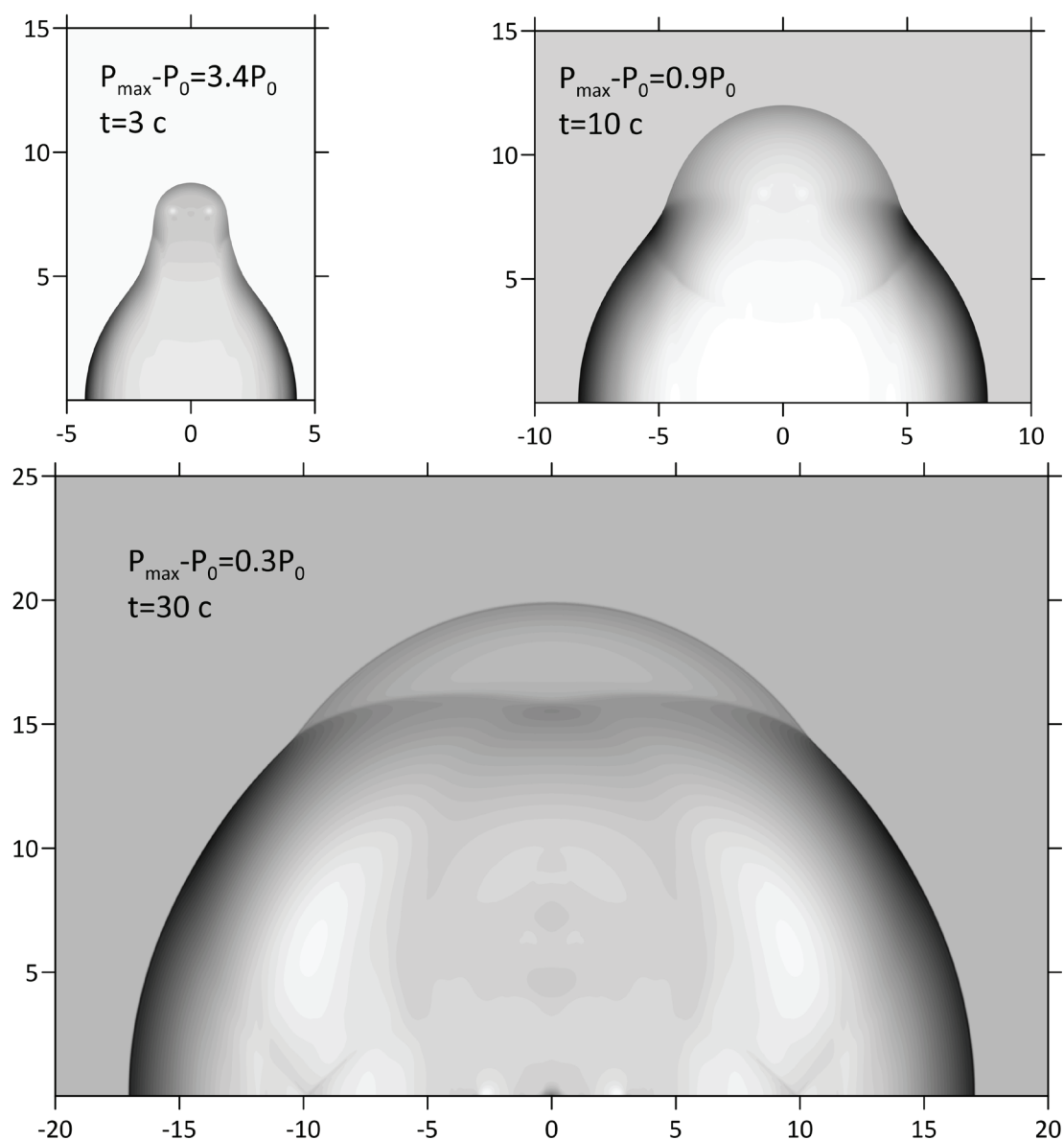


Рис. 2. Распределения избыточного давления $P - P_0$ в разные моменты времени t для взрыва, моделирующего падение метеороида радиусом $R = 10$ м. Более темные области соответствуют большему избыточному давлению. Значения максимального избыточного давления указаны на каждой панели. По горизонтальной оси отложено расстояние r от оси цилиндра в километрах, по вертикальной – расстояние вдоль траектории от точки максимума энерговыведения $z - z_0$ в километрах

На рис. 3 показаны распределения давления для рассматриваемого взрыва в поздние моменты времени, когда радиус ударной волны стал намного больше начальной длины нагретого цилиндра. Сформировалась почти идеально сферическая волна, верхнюю часть которой составляет вторая

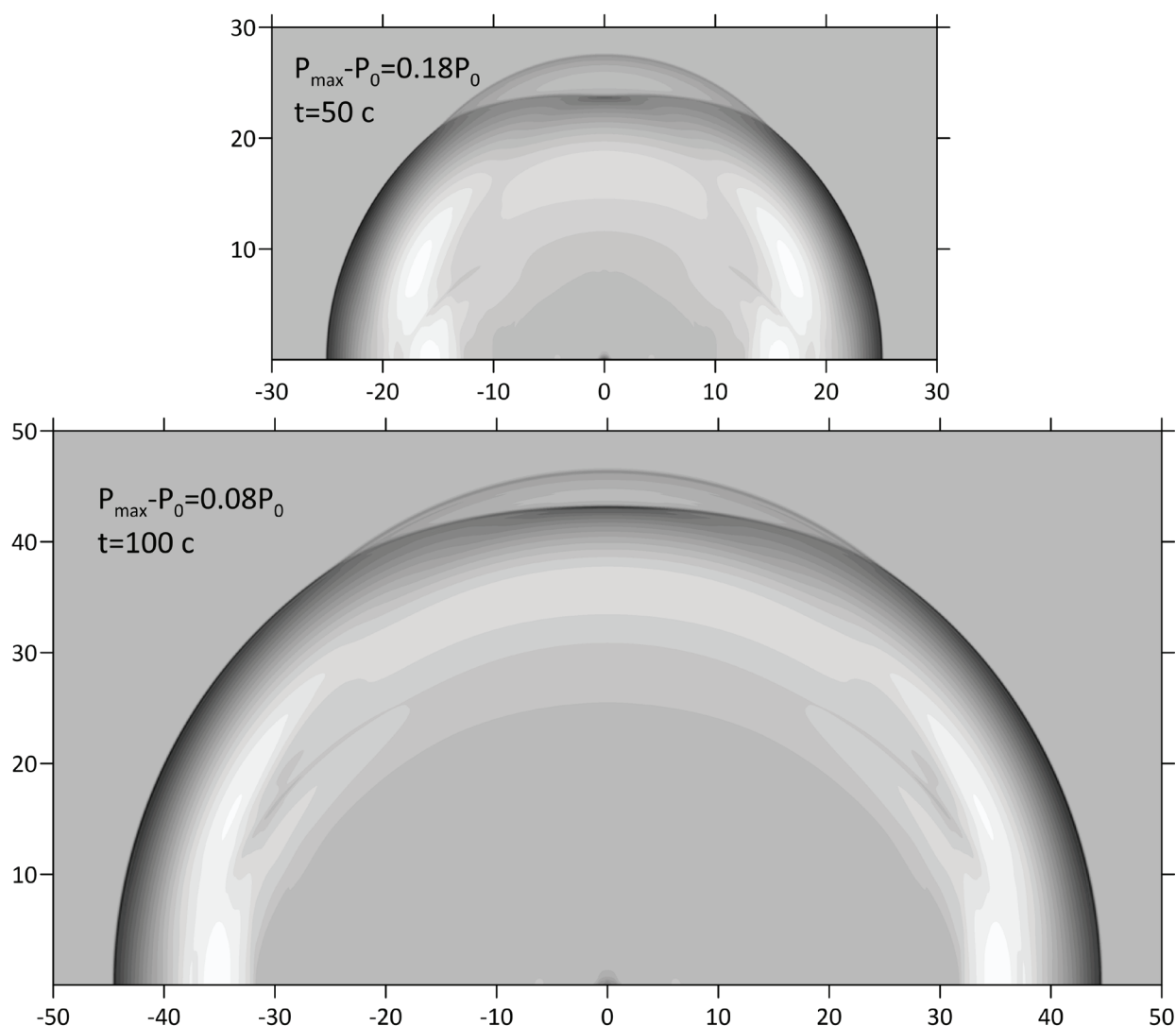


Рис. 3. Распределения избыточного давления $P - P_0$ в разные моменты времени t для взрыва, моделирующего падение метеороида радиусом $R = 10$ м. Более темные области соответствуют большему избыточному давлению. Значения максимального избыточного давления указаны на каждой панели. По горизонтальной оси отложено расстояние r от оси цилиндра в километрах, по вертикальной – расстояние вдоль траектории от точки максимума энерговыделения $z - z_0$ в километрах

ударная волна. Вверх перед этой сферической волной распространяется значительно более слабая ударная волна, образовавшаяся первой. Хотя форма ударной волны на больших расстояниях очень близка к сферической, ее амплитуда существенно зависит от направления распространения.

На рис. 4 показаны распределения избыточного давления в момент времени 100 с для всех трех рассматриваемых вариантов, соответствующих начальному радиусу метеороида $R = 10, 3$ и 1 м. Качественно распределения очень похожи друг на друга, но хорошо видно, что с уменьшением R разница между интенсивностью ударной волны, распространяющейся вверх, и интенсивностью ударной волны, распространяющейся в направлении, перпендикулярном траектории, заметно увеличивается. Естественно, что с уменьшением радиуса метеороида и, соответственно, его энергии ударная волна на одном и том же расстоянии становится слабее, хотя отчасти уменьшение относительного избыточного давления на ударном фронте компенсируется тем, что маленькие метеороиды тормозятся на больших высотах (т.к. при одинаковом энерговыделении ударная волна на больших высотах сильнее).

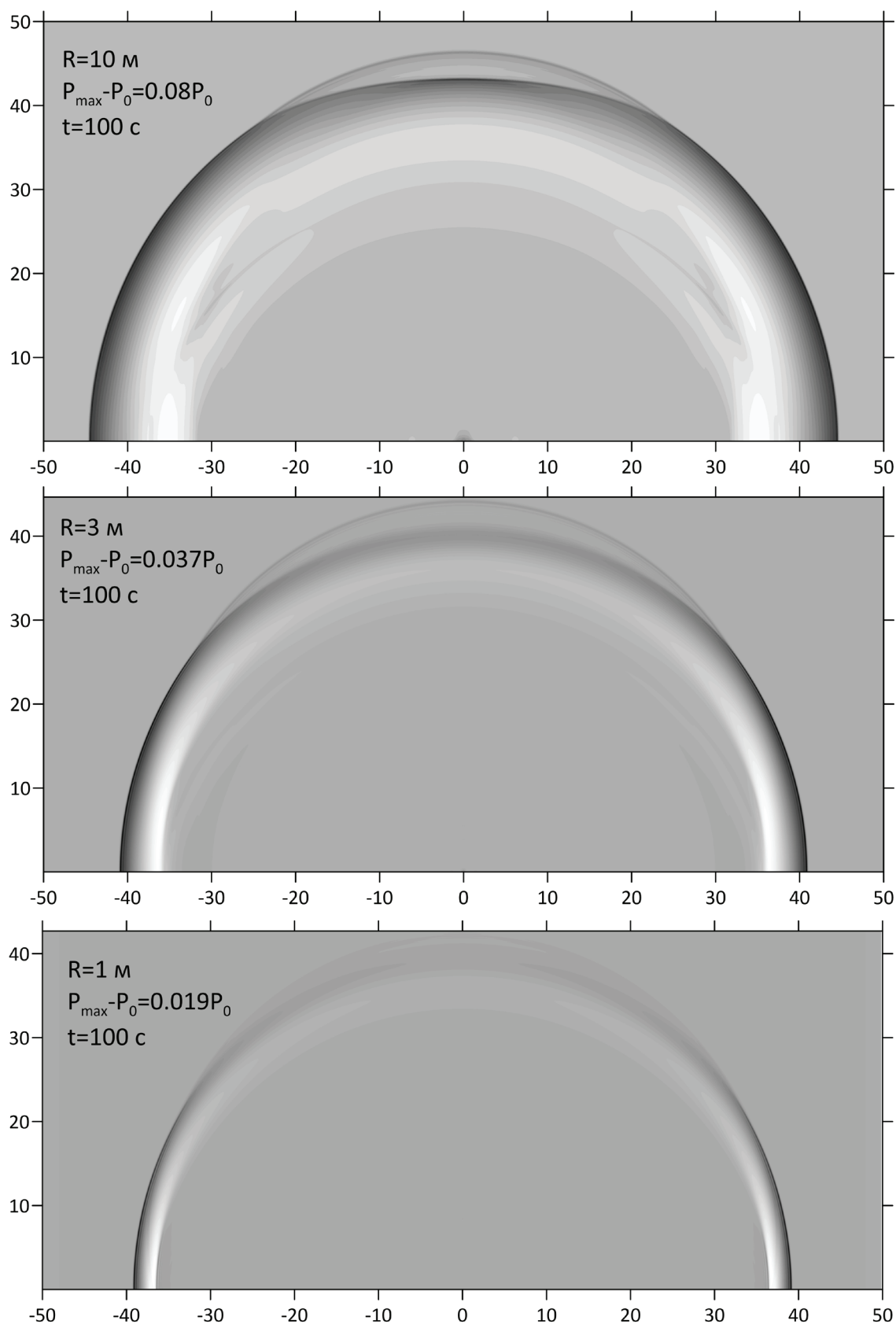


Рис. 4. Распределения избыточного давления $P - P_0$ в моменты времени $t = 100$ с для взрывов, моделирующих падение метеороидов радиусами $R = 10, 3$ и 1 м. Более темные области соответствуют большему избыточному давлению. Значения максимального избыточного давления и R указаны на каждой панели. По горизонтальной оси отложено расстояние r от оси цилиндра в километрах, по вертикальной – расстояние вдоль траектории от точки максимума энерговыведения $z - z_0$ в километрах

На рис. 5 для всех вариантов приведены зависимости относительного избыточного давления на ударном фронте от направления распространения ударной волны на расстояниях 30, 50 и 70 км от эпицентра взрыва. Угол $\alpha = 0^\circ$ соответствует направлению, перпендикулярному траектории, $\alpha = 90^\circ$ – направлению вдоль траектории. Как и следовало ожидать, максимальные избыточные давления достигаются при $\alpha = 0^\circ$. При $R = 10$ м изотропность распределения избыточного давления по углу α не велика, различия не превышают двух раз. При уменьшении R (что соответствует более вытянутым взрывам) изотропность увеличивается. В случае $R = 1$ м избыточное давление при $\alpha = 0^\circ$ более чем на порядок превышает избыточное давление при $\alpha = 90^\circ$. При увеличении расстояния с 30 до 70 км распределения избыточного давления по углу меняются слабо. Пунктирными линиями на рис. 5 показаны избыточные давления, полученные в расчетах сферических взрывов такой же энергии. Они меньше, чем избыточные давления для вытянутых взрывов при $\alpha = 0^\circ$. Отличие увеличивается при уменьшении R .

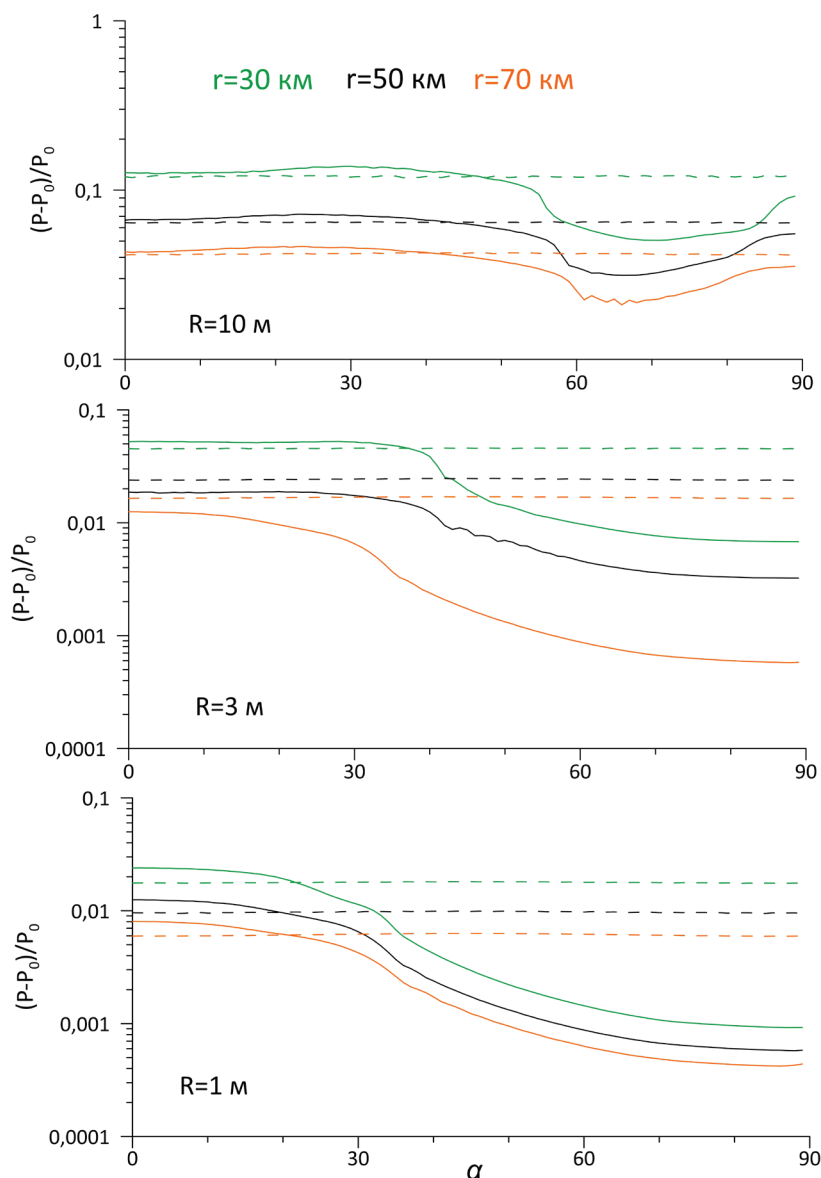


Рис. 5. Зависимости от угла α относительного избыточного давления $(P-P_0)/P_0$ в ударной волне на разных расстояниях r для взрывов, моделирующих падение метеороидов радиусами $R = 10, 3$ и 1 м. Значения r и R указаны на графиках. Угол $\alpha = 0^\circ$ соответствует направлению, перпендикулярному траектории, $\alpha = 90^\circ$ – направлению вдоль траектории

В описанных выше расчетах не учитывалась начальная стадия полета неразрушенного метеороида, когда $r_0(z) = R = \text{Const}$. Энергия, выделяемая в атмосфере на этом участке траектории много меньше, чем энергия, выделяемая при разрушении и торможении метеороида, и, соответственно, акустические возмущения, генерируемые на этой части траектории значительно слабее ударной волны, генерируемой

зоной основного энергосвечения. Однако эти возмущения могут быть интересны тем, что они могут приходить в точку наблюдения раньше, чем основная ударная волна. Для изучения этого вопроса были проведены расчеты взрывов, в которых к начальному энергосвечению, задаваемому формулой (1), был добавлен бесконечно длинный цилиндр радиуса R , внутри которого энергия воздуха принималась равной $u^2/2$, а плотность считалась такой же, как в окружающем воздухе.

На рис. 6 показаны распределения избыточного давления в момент времени 100 с, полученные в расчетах с учетом энергосвечения неразрушенного метеороида. Эти распределения отличаются от приведенных на рис. 4 тем, что к основной сферической ударной волне сверху примыкает значительно более слабая цилиндрическая ударная волна. Зависимость избыточного давления на фронте сферической волны от направления ее распространения (т.е. угла α) практически не отличается от представленной на рис. 5, небольшое отличие (несколько процентов) наблюдается только в точке пересечения сферической и цилиндрической ударных волн.

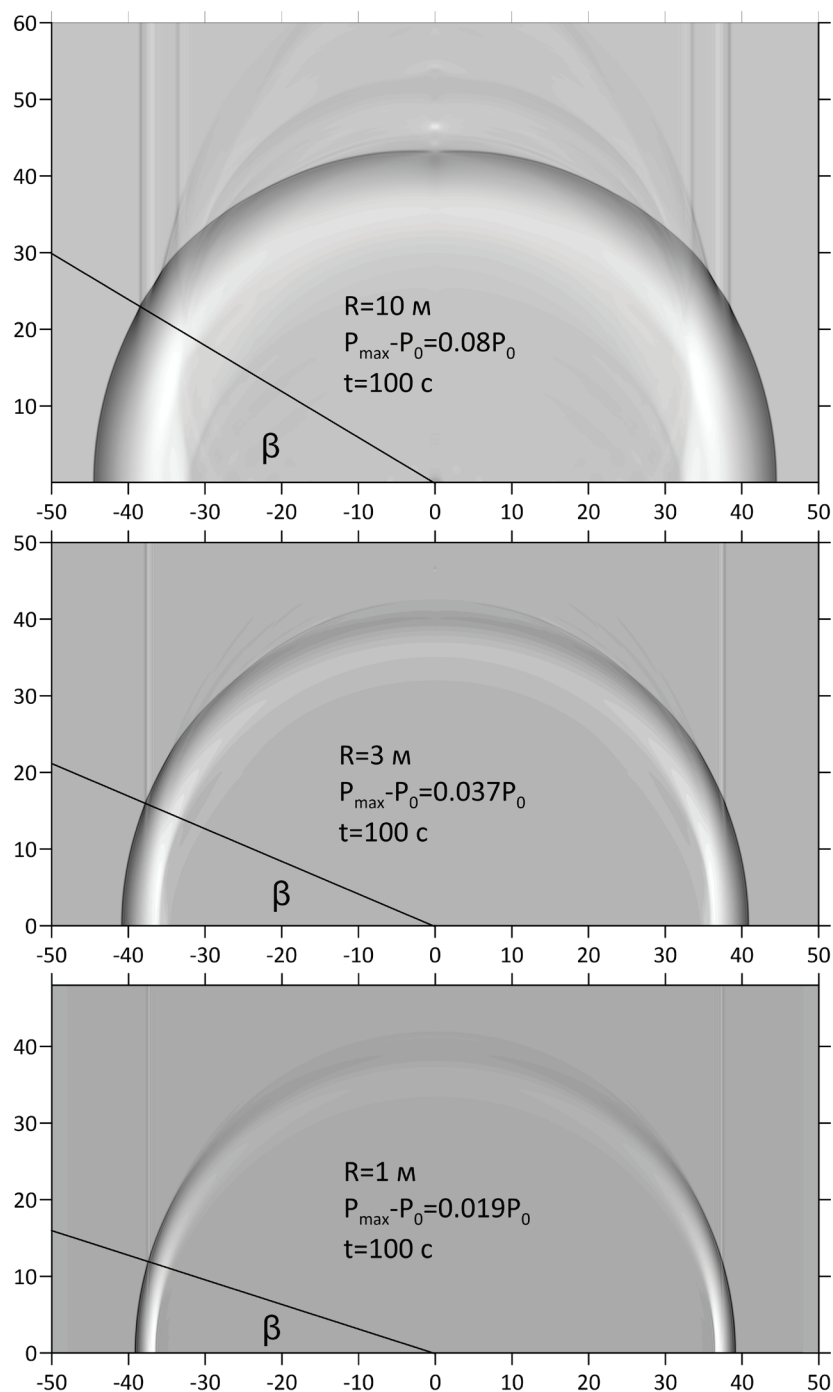


Рис. 6. Распределения избыточного давления $P - P_0$ в моменты времени $t = 100$ с для взрывов, моделирующих падение метеороидов радиусами $R = 10, 3$ и 1 м с учетом энергосвечения при движении неразрушенного метеороида. Более темные области соответствуют большему избыточному давлению. Значения максимального избыточного давления и R указаны на каждой панели. По горизонтальной оси отложено расстояние r от оси цилиндра в километрах, по вертикальной – расстояние вдоль траектории от точки максимума энергосвечения $z - z_0$ в километрах

На рис. 6 проведены линии, соединяющие эпицентр взрыва с точкой пересечения сферической и цилиндрической ударных волн. В точках, расположенных ниже этих линий, наблюдается только приход сферической ударной волны, в точках, расположенных выше, сначала приходит слабая цилиндрическая волна, а затем более сильная сферическая. Угол β между линией, соединяющей эпицентр взрыва с точкой пересечения сферической и цилиндрической ударных волн, и осью r (см. рис. 6) уменьшается с уменьшением R . Этот угол определяется разницей между радиусами сферической и цилиндрической ударных волн. В области сильного энерговыделения ударная волна дольше остается сильной и, соответственно, дольше распространяется со скоростью, превышающей звуковую. Поэтому радиус сферической волны больше. Увеличение R тоже приводит к увеличению длительности нелинейной (сверхзвуковой) стадии распространения ударной волны. Следует отметить, что с увеличением радиуса ударной волны угол β уменьшается. Это связано с тем, что угол β определяется отношением радиусов цилиндрической и сферической ударных волн. С течением времени разность между этими радиусами остается постоянной, так как обе волны на поздней стадии распространяются со скоростью звука, а сами радиусы увеличиваются, поэтому β уменьшается.

Заключение

Проведенные расчеты цилиндрических взрывов, моделирующих энерговыделение в атмосфере при разрушении и торможении метеороидов, показали, что такие взрывы генерируют ударную волну, форма которой на больших расстояниях становится сферической. Однако амплитуда этой сферической ударной волны зависит от угла между направлением ее распространения и осью цилиндра (т.е. траекторией метеороида). Максимальную амплитуду имеет волна, распространяющаяся перпендикулярно траектории. Зависимость от угла усиливается при уменьшении радиуса метеороида R . При $R = 1$ м амплитуда ударной волны в направлении, перпендикулярном траектории, более чем на порядок превышает амплитуду ударной волны, распространяющейся вдоль траектории. Эту неизотропность надо учитывать при анализе акустических наблюдений метеорных явлений. При $R = 10$ м (радиус Челябинского метеороида) различие между амплитудами в разных направлениях не превышает двух раз.

Помимо ударной волны, генерируемой областью разрушения и торможения метеороида, которая на больших расстояниях становится сферической, в атмосфере распространяется более слабая цилиндрическая ударная волна, генерируемая при полете метеороида до начала разрушения. При регистрации акустических возмущений, генерируемых падением метеороида, в одних точках сначала наблюдается приход слабой цилиндрической волны, потом более сильной сферической, в других только приход сферической волны. Эти точки разделяются конической поверхностью, образующей которой являются линии, соединяющие эпицентр взрыва с точками пересечения цилиндрической и сферической ударных волн (см. рис. 6). Угол β между этими линиями и осью r зависит от радиуса метеороида R . В момент времени, когда сферическая ударная волна уходит на расстояния около 40 км, этот угол составляет 31° для $R = 10$ м, 23° для $R = 3$ м и 19° для $R = 1$ м. С увеличением радиуса ударной волны угол β уменьшается.

Полученные результаты дают только качественное понимание того, как форма области энерговыделения влияет на структуру ударной волны, генерируемой при разрушении и торможении метеороидов в атмосфере Земли, так как в расчетах плотность воздуха считалась постоянной, не зависящей от высоты. В реальной атмосфере стратификация существенно влияет даже на ударную волну, генерируемую точечным взрывом. Поэтому в дальнейшем предполагается провести аналогичные расчеты цилиндрических взрывов в реальной стратифицированной атмосфере.

Благодарности

Авторы благодарны анонимным рецензентам за внимательное прочтение работы и полезные замечания.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 125012200624-5).

Список литературы

- Васильев Н.В.* Тунгусский «метеорит». Космический феномен лета 1908. М. : Русская панорама. 2004. – 372 с.
- Ceplecha Z.* Impacts of meteoroids larger than 1 M into the Earth's atmosphere // *Astronomy and Astrophysics*. 1994. Vol. 286. P. 967–970.
- Edwards W.N.* Meteor Generated Infrasound: Theory and Observation. In: A. Le Pichon, E. Blanc, A. Hauchecorne (Eds.). *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies*. 2009. Springer Netherlands, Dordrecht. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4020-9508-5>
- Luke McFadden, Peter G. Brown, Denis Vida.* A comparison of fireball luminous efficiency models using acoustic records // *Icarus*. 2024. Vol. 422. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2024.116250>
- Popova O.P., Jenniskens P., Emel'yanenko V. et al.* Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization // *Science*. 2013. Vol. 342. P. 1069–1073. <https://doi.org/10.1126/science.1242642>
- Revelle D.* On meteor-generated infrasound // *Journal of Geophysical Research*. 1976. Vol. 81. P. 1217–123. <https://doi:10.1029/JA081i007p01217>
- Shuvalov V.V.* Multi-dimensional hydrodynamic code SOVA for interfacial flows: Application to thermal layer effect // *Shock Waves*. 1999. Vol. 9 (6). P. 381–390. <https://doi.org/10.1007/s001930050168>

SHOCK WAVES GENERATED BY CYLINDRICAL EXPLOSIONS SIMULATING AN ENERGY RELEASE DURING THE FLIGHT OF METEOROIDS IN THE ATMOSPHERE

© 2025 V. V. Shuvalov*

Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**E-mail: shuvalov@idg.ras.ru*

Numerical modeling is used to examine cylindrical explosions in the air, simulating the energy release in the atmosphere during the passage of meteoroids with radii of 1–10 meters. It is shown that the shock wave generated by such explosions becomes spherical at large distances, but its amplitude depends on the angle between its propagation direction and the meteoroid's trajectory. The wave propagating perpendicular to the trajectory has the maximum amplitude. The dependence on the angle increases with decreasing meteoroid radius. Regions of space are determined in which the arrival of a weak cylindrical wave is first observed, followed by a stronger spherical wave, and regions of space in which only the arrival of a spherical wave is observed.

Keywords: cylindrical explosion, meteoroid, numerical modeling, shock wave.