

УДК 523.68

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ В ПРОСТРАНСТВЕ ЭНЕРГИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ПРИ МЕТЕОРИТНОМ УДАРЕ И ВЗРЫВЕ

Б.А. Иванов

ИДГ РАН

Определение параметров сейсмических волн, излучаемых при взрыве и при высокоскоростном ударе, является классической задачей геофизики. В данной работе мы обращаем внимание на интересную особенность – неравномерное распределение в пространстве энергии сейсмической волны при ударе и при взрыве вблизи поверхности. Численное моделирование показало, что при ударе и при взрыве у поверхности большая часть сейсмической энергии излучается в конус раствором 120° под центром, содержащий 50% массы мишени.

DOI

Введение

Эффективность излучения сейсмических волн при взрыве и высокоскоростном ударе является классической задачей динамической геофизики, представляющей как теоретический, так и практический интерес. Интерес к сейсмической эффективности высокоскоростных ударов связан, в основном, с сейсмическими исследованиями Луны [McGarr et al., 1969; Latham et al., 1970]. При этом разброс предполагаемых значений доли энергии удара, переданной в сейсмическое излучение, достигает порядка величины [Schultz and Gault, 1975; Хазинс и др. 2018]. Подход, использующий сравнение сейсмической эффективности удара и гораздо более изученных взрывных сейсмических волн, требует сравнительного изучения удара и взрыва. Данная работа посвящена сравнению удара и взрыва методами численного моделирования.

Постановка задачи

В данной работе моделируется вертикальный удар сферического астероида со скоростью 20 км/с по однородной мишени – полупространству, заполненному тем же материалом, что и материал ударника. Описание термодинамического поведения вещества в ударной волне осуществляется с помощью таблиц параметров, рассчитанных по уравнению состояния ANEOS для кварцита и дунита. Для описания механических свойств вещества использовались как гидродинамическая модель тяжелой жидкости, так и упругопластическая модель постепенного разрушения горной породы с переходом при полном разрушении к модели сыпучей среды с постоянным коэффициентом сухого трения [Collins et al., 2004].

Численное решение уравнений движения сжимаемой жидкости осуществлялось программой первого порядка точности SALEB [Ivanov and Pierazzo, 2011; Иванов 2016] в эйлеровом варианте. Основные детали процедуры численного моделирования были опубликованы ранее [Ivanov and Pierazzo, 2011; Collins et al., 2004; Ivanov et al., 2010].

Действие удара сравнивалось с действием «взрыва». Источник взрыва описывался как сферический объем материала мишени, в котором изначально заданы повышенные давления и температуры, соответствующие добавленной удельной внутренней энергии, равной $U^2/2$, где U – скорость высокоскоростного удара при нормальной плотности вещества. На Земле и Луне средняя скорость удара составляет 18–20 км/с. Для основного объема расчетов в данной работе $U = 20$ км/с. Для кварцита такая внутренняя энергия соответствует температуре около 80 тыс. градусов. Для диаметра ударника/заряда 1 м полная энергия удара/взрыва составляет около $2.9 \cdot 10^{11}$ Дж (~ 69 т ТНТ).

Расчетная сетка имела размер 1000×1000 ячеек с постоянными в течение расчета размерами. Поскольку задача состояла в расчете параметров волны в упругой зоне, такой размер сетки накладывает большие ограничения на качество расчетов, во многом связанное с необходимостью совместить минимально необходимое пространственное разрешение ударника/заряда с желанием получить упругую волну на максимально возможных расстояниях от источника. За единицу длины принимается диаметр ударника D_0 . С учетом энергии взрыва/удара q в эквивалентных массах тротилового заряда этот масштаб выражается как $D_0/q^{1/3} = 0.244$ м/г^{1/3}.

Пространственное разрешение численных расчетов принято характеризовать величиной CPPR («cells per projectile radius» = число ячеек на радиус ударника). В наших расчетах CPPR задавалось равным 5, 20 и 40, что позволяло изучать ударную волну до расстояний ~ 60 , 30, и 15 D_0 соответственно (с учетом ~ 100 ячеек с постепенно увеличивающимся размером на периферии сетки для задержки прихода волны, отраженной от внешней границы).

Нужно отметить, что в работе Хазинса и др. [2018] использовалась более совершенная программа решения гидродинамических уравнений с возможностью периодического удвоения размеров ячеек для решения проблем, описанных выше (правда, только для модели тяжелой жидкости).

Для расчетов материалов с конечной прочностью и сухим трением важным является абсолютный масштаб задачи. В основном наборе вариантов принимался размер ударника $D_0 = 1$ м. Масштабирование расчетов достигалось увеличением ускорения силы тяжести ($\times 1$, $\times 10$ и $\times 100$ g, $g = 9.81$ м/с²). В некоторых вариантах использовались также искусственно завышенные значения начального сцепления неразрушенной горной породы Y_0 – до 500 МПа, наряду с более натуральными

значениями Y_0 от нуля до 50 МПа. Значение коэффициента сухого трения принималось равным 0.55 в системе программы SALEB, что примерно соответствует трению в сухом песке.

Гидродинамическая модель

Для сопоставления с результатами предыдущих работ, был проведен ряд расчетов по взрыву и удару для гидродинамической модели «тяжелой жидкости» (в программе SALEB достигается заданием коэффициента Пуассона 0.5). Поскольку Хазинс и др. [2018] использовали более точную вычислительную модель, они имели возможность сравнивать акустические волны по максимальной скорости в волне и на этом основании сравнивать эффективность механического действия удара и взрыва. Используемая в данной работе программа SALEB «заваливает» эпюру скорости в лагранжевой частице на больших расстояниях (эффект первого порядка точности алгоритма и влияние линейной искусственной вязкости). Поэтому в данной работе предлагается сравнение эффективности по величине кинетической энергии, переносимой акустической волной на периферию.

Сравнение сейсмической (точнее говоря – акустической) эффективности удара и взрывов на различных глубинах подтвердило основные выводы Хазинса и др. [2018]. Однако рассмотрение деталей распределения периферийной акустической энергии выявило следующую особенность. Рассмотрим распределение масс в мишени по угловым секторам (рис. 1).

Луч, проведенный из точки $x = 0, y = 0$ под углом -30° к горизонтали отсекает сферический конус, содержащий половину массы мишени для произвольного радиуса – расстояния до центра координат. На рис. 1 серым цветом показан приповерхностный сектор между сферическими границами 40 и $80 D_0$, содержащий массу, равную массе сектора, примыкающего к вертикальной оси. Оказалось, что в зависимости от глубины взрыва возрастает разница в кинетической энергии в волнах, распространяющихся вдоль поверхности и вглубь мишени.

Для подсчета кинетической энергии использовались лагранжевы частицы-трейсеры. В центр каждой ячейки помещалась лагранжева частица и

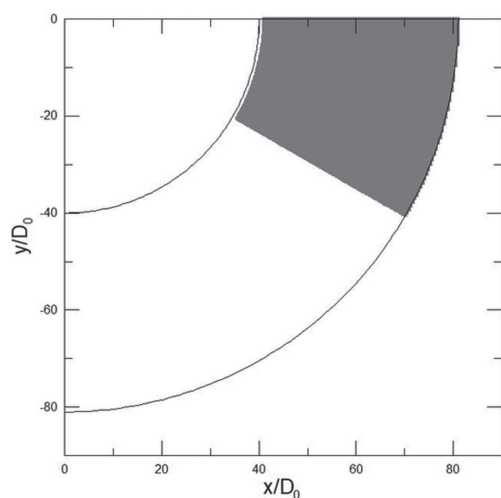


Рис. 1. Распределение массы по угловым секторам. Левая ось – ось цилиндрической симметрии. Заштрихованная и незаштрихованная области между двумя сферами содержат одинаковую массу

запоминалась масса ячейки. В дальнейшие моменты времени, когда частица смещалась из начального положения, ее скорость аппроксимировалась линейной регрессией скоростей в четырех углах ячейки, заключавшей данную лагранжеву частицу. Умножение квадрата текущей скорости на начальную массу, приписанную к данной частице, давало оценку кинетической энергии. Суммирование по частицам, занимавшим в начальный момент заданную область (например, зоны, показанные на рис. 1), давало оценку кинетической энергии выбранного ансамбля лагранжевых частиц.

Для подземного взрыва, когда все частицы движутся только по радиальным направлениям от центра (а верхняя граница на рис. 1 является жесткой границей со скольжением) кинетическая энергия равномерно распределяется по массе, и области с равной массой будут иметь равную кинетическую энергию.

Таблица

Энергетическая эффективность взрывов на различной глубине по отношению к удару в гидродинамическом приближении

Материал мишени	Кварц		Дунит	
	0–90°	0–60°	0–90°	0–60°
Удар	1	1	1	1
DOB = 0	3,5	4	4,4	5
DOB = 2	0,89	0,7	0,98	0,58
DOB = 5	0,59	0,37	0,69	0,32
DOB = 10	0,45	0,28	0,56	0,26

В таблице собраны оценки эффективности, полученные по расчетам в гидродинамическом приближении. За единицу эффективности брался удар со скоростью $U = 20$ км/с, который сравнивался по периферийной энергии со взрывом (сферический источник с таким же размером, как и ударник с удельной внутренней энергией $U^2/2$). Из таблицы видно, что при полном подсчете кинетической энергии за пределом одного и того же радиального расстояния от центра, для воспроизведения удара требуется взрыв на глубине $10 D_0$ с энергией 45–56% от энергии удара KE, а для взрыва на глубине $2 D_0$ энергия взрыва примерно равна энергии удара. Однако, если сравнивать периферийную кинетическую энергию только в приповерхностном секторе, эффективность взрыва по отношению к удару значительно возрастает – для эквивалентного «механического действия» заглубленного взрыва достаточно энергии взрыва ~27% KE, а для взрыва на глубине $2 D_0$ – ~60–70% KE. В полной задаче о сейсмике в реальной слоистой Земле «доставка» энергии происходит по искривленным сейсмическим лучам, поэтому сравнение действия удара и взрыва может зависеть от того, под каким углом выходит сейсмический луч из ближней зоны.

Модель горной породы с прочностью

Для проверки справедливости выводов гидродинамической модели был произведен ряд расчетов с горной породой, обладающей прочностью. Для начала мы сравнили действие удара, камуфлетного взрыва (рис. 2 и 3), и взрыва на глубине $10 D_0$.

Смещения нескольких лагранжевых частиц с полной записью параметров (рис. 2 и 4) показаны на рис. 3. Эти данные показывают полное подобие с известными экспериментальными результатами для подземных взрывов.

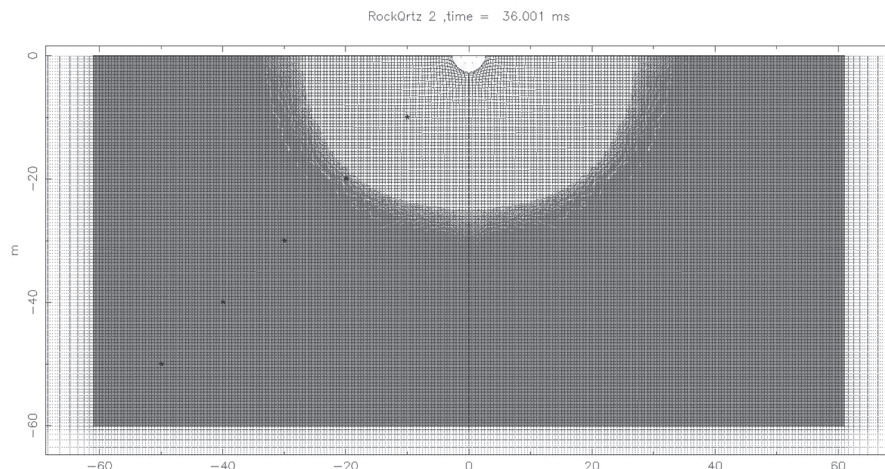


Рис. 2. Расчет камуфлетного взрыва в кварците. Темный цвет – неповрежденная (упругая) область, светлый тон – разрушенная порода. Вертикальное ускорение 10g. Верхняя граница – жесткая непроницаемая. Черные точки в левой половине рисунка – пять лагранжевых частиц с пошаговой записью параметров

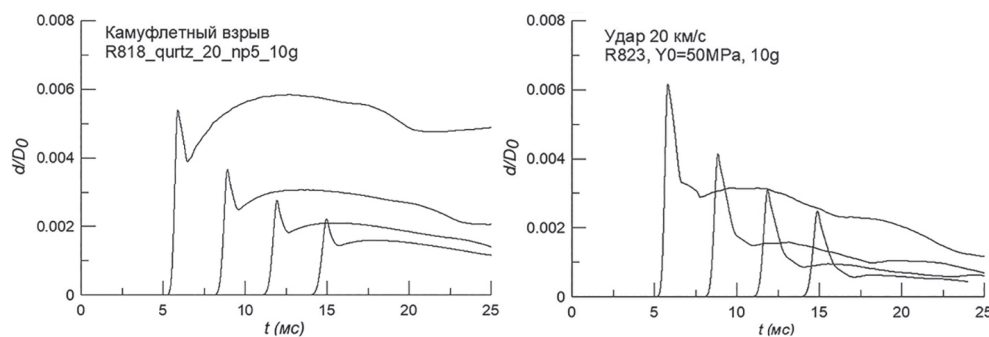


Рис. 3. Смещения лагранжевых частиц, расположенных по диагонали (рисунки 2 и 4) на расстояниях 28, 42, 56 и 70 D_0 при камуфлетном взрыве (слева) и при ударе со скоростью 20 км/с (справа). Смещение для частиц в упругой зоне является типичным для подземного взрыва. При высокоскоростном ударе достигаются почти такие же максимальные смещения, что и при камуфлетном взрыве, но остаточные смещения при ударе гораздо ниже

На рис. 4 показаны результаты расчетов взрыва на глубине 10 D_0 и удара со скоростью 20 км/с. Видно, что по размерам зоны разрушения взрыв имеет несколько большую эффективность, чем удар.

На рис. 5 показаны зависимость от времени кинетической энергии на периферии за пределами полусферы радиусом 40 м (40 D_0) с центром в начале координат и доля энергии в приповерхностном секторе (показанном серым тоном на рис. 1).

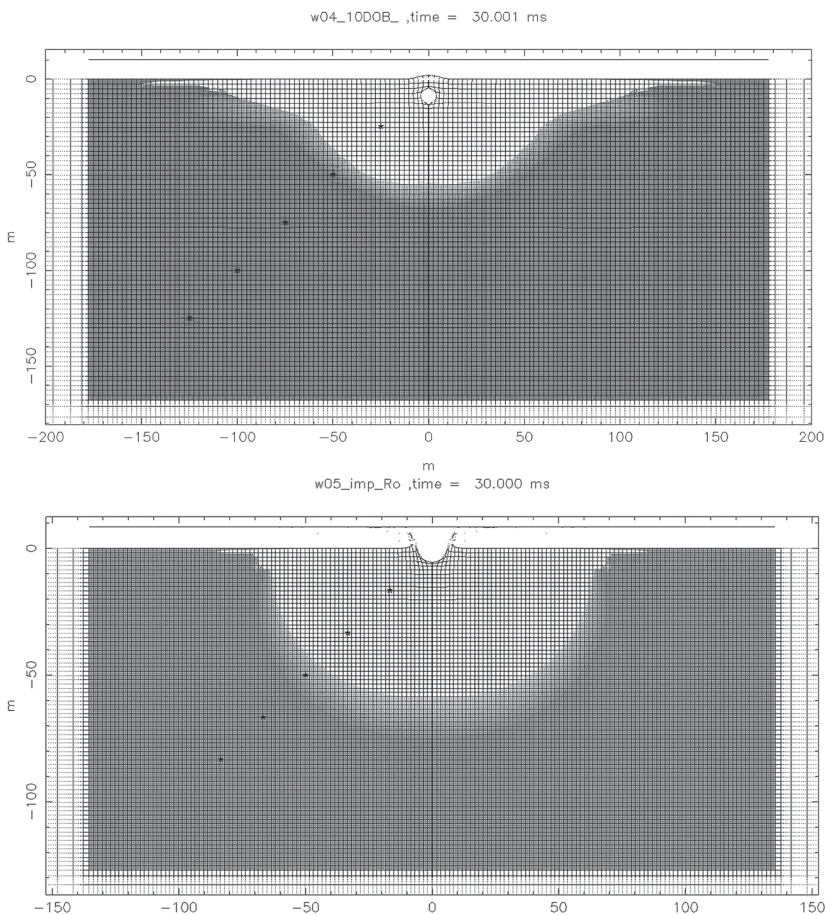


Рис. 4. Зоны разрушения при взрыве заряда диаметром 1 м на глубине 10 м (вверху) и при ударе сферического тела диаметром 1 м по однородной мишени кварцита с начальной прочностью $Y_0 = 50$ МПа. Расчет сделан для поля тяжести 10g, так что при 1g диаметры ударника и заряда равны 10 м, а глубина заложения – 100 м. Градацией серого тона показана зона разрушения. Черные точки в левой части рисунков – лагранжевы частицы с пошаговой записью параметров

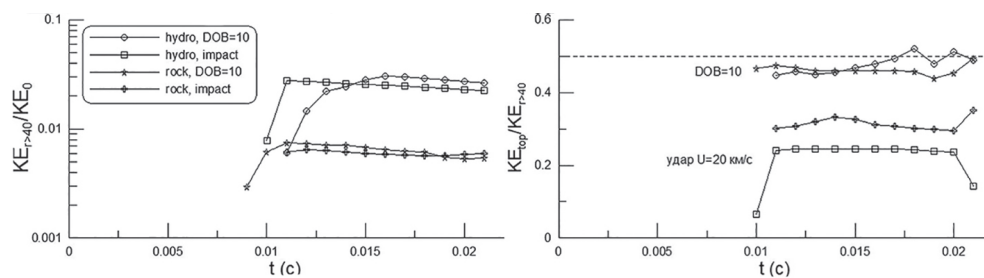


Рис. 5. Зависимость от времени доли кинетической энергии в упругой зоне (слева) и доли энергии в приповерхностном секторе (справа) от времени. На правом рисунке пунктирная прямая обозначает уровень равномерного распределения энергии по массе, равный 0.5

Из этих выборочных данных можно сделать два наблюдения. Первое – переход от гидродинамической модели к модели упругопластического скального грунта уменьшает долю кинетической энергии на периферии с 2–3% от энергии источника до 0.6–0.7% E_0 . Второе – распределение сейсмической энергии в упругой зоне между приповерхностным сектором и центральным конусом и в гидродинамической модели, и в модели скального грунта при ударе примерно одинаково – в приповерхностной зоне сейсмическая (акустическая) волна несет 25–30% кинетической энергии, переданной на периферию, в то время как при взрыве на глубине $10 D_0$ энергия примерно делится пополам (пропорционально массе вещества мишени).

Для проверки влияния прочностных свойств в модели грунта была проведена серия расчетов ударов, в которых варьировалась величина начальной прочности неразрушенного материала и сравнивались случаи неразрушенного и изначально разрушенного материала (который ведет себя как песок с нулевым или малым сцеплением и с постоянным коэффициентом сухого трения). На рис. 6 показаны доли периферийной энергии между полусферами 40 и 60 D_0 и доля периферийной энергии в приповерхностном секторе (серый тон на рис. 1). Оказалось, что начальное сцепление материала при изменении от 5 до 500 МПа относительно слабо влияет на долю периферийной энергии – с понижением начальной прочности доля сейсмической кинетической энергии снижается от 2 до ~0.9% полной энергии удара. Зато для полностью разрушенного материала, где при любых давлениях работает сухое трение, доля сейсмической кинетической энергии снижается до величин ~0.1% от полной энергии удара (10^{-3} KE). При этом доля кинетической энергии в верхнем секторе снижается с ~30 до ~20% от полной сейсмической энергии (рис. 6).

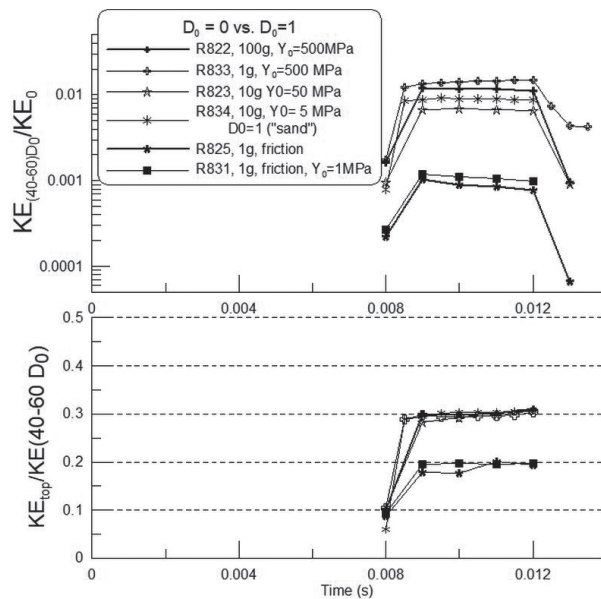


Рис. 6. Верхняя панель – доля кинетической энергии в слое между полусферами 40 и 60 D_0 . Нижняя панель – доля кинетической энергии в упругой зоне в приповерхностном секторе (показанном серым тоном на рис. 1)

Обсуждение результатов и заключение

В работе Хазинса и др. [2018] сравнивались эффективности высокоскоростного удара и взрыва по амплитуде акустических волн в жидкости на расстояниях до $300 D_0$. В нашей работе на расстояниях до $90 D_0$ было проведено сравнение эффективности взрыва и удара по оценке кинетической энергии, передаваемой в упругую зону. Если для общей оценки сравнительной эффективности энергетический метод дает результаты, близкие к полученным Хазинсом и др. [2018], некоторые количественные аспекты представляются интересными и требующими дальнейшего изучения.

Главное отличие упругопластической модели от гидродинамической – гораздо меньшая доля энергии, передаваемой в сейсмическую область. Учет прочности и девиаторных напряжений снижает эту долю с 2–3% в зоне до $90 D_0$ до ~0.1% КЕ. Предположение о доминировании сухого трения в материале мишени снижает долю сейсмической энергии на исследованных расстояниях до 10^{-3} КЕ, что приближается к результатам ранее опубликованной модели [Güldemeister, Wünnemann, 2017], где сейсмическая эффективность удара оценивалась приближенным образом (по эпюрам скорости) величинами чуть более 10^{-3} КЕ. Наш относительно небольшой набор параметров в численных экспериментах показал, что параметры прочности, принимаемые в моделях, могут сильно влиять на эффективность генерации сейсмической энергии при высокоскоростном ударе, что может объяснять гигантский разброс оценок, опубликованных ранее.

Автор благодарен анонимному рецензенту за важные советы по улучшению представленной работы.

Работа выполнена в рамках программы РАН (проект № 0146-2018-0003).

Литература

- Иванов Б.А. Подobie в затухании ударных волн при одномерном ударе // Динамические процессы в геосферах: сб. научн. тр. ИДГ РАН М. : ГЕОС. 2016. С. 28–34.
- Хазинс В.М., Шувалов В.В., Светцов, В.В. Сейсмическая эффективность ударов космических тел // *Астрономический Вестник*. 2018. В печати.
- Collins G.S., Melosh H.J., and Ivanov B.A. Modeling damage and deformation in impact simulations // *Meteoritics & Planet. Sci.*, 2004, P. A57, 2004. V. 39 (2). P. 217–231.
- Güldemeister N., Wünnemann K. Quantitative analysis of impact-induced seismic signals by numerical modeling // *Icarus*. 2017. V. 296. P. 15–27.
- Ivanov B.A. and Hartmann W.K. Exogenic Dynamics, Cratering and Surface Ages. Treatise on Geophysics. Ed. G. Schubert, PP. 207–242, Amsterdam: Elsevier, 2007.
- Latham G.V., McDonald W.G., Moore H.J. Missile impacts as sources of seismic energy on the moon // *Science*. 1970. V. 168. № 3928. P. 242–245.
- McGarr A., Latham G.V., Gault D.E. Meteoroid impacts as sources of seismicity on the Moon // *J. Geophys. Res.* 1969. V. 74. № 25. P. 5981–5994.
- Schultz P.H., Gault D.E. Seismic effects from major basin formation on the Moon and Mercury // *The Moon*. 1975. V. 12. P. 159–177.