

ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА, ВЫЗВАННОГО ПАДЕНИЕМ ЧЕЛЯБИНСКОГО КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛА

В.В. Светцов, В.В. Шувалов

Сделаны теоретические оценки магнитуды сейсмического события, обусловленного падением Челябинского болида. Путем численного моделирования образования и распространения ударных волн, вызванных торможением космического тела и выделением энергии вдоль его траектории в атмосфере, рассчитаны давления на поверхности Земли. Определение магнитуды сейсмического источника проводится с помощью формул, основанных на решении задачи Лэмба для полупространства, на границе которого действует давление. Константы в формулах были ранее выбраны в соответствии с опубликованными данными по экспериментальным взрывам в воздухе. В предположении, что кинетическая энергия Челябинского космического тела при входе в атмосферу в тротиловом эквиваленте была равна 300 кт, вычисленная магнитуда сейсмического события равна 3,85. Для энергии тела 500 кт магнитуда оказалась равной 4,0. Эти величины согласуются с опубликованными результатами измерений магнитуды в пределах погрешностей измерений. Были также проведены вычисления магнитуд сферически-симметричных взрывов в воздухе с энергиями от 30 кт до 30 Мт на высотах от 5 до 45 км. Магнитуда Челябинского события соответствует сферически-симметричным взрывам с энергиями, равными кинетической энергии тела, на высоте около 35 км.

Введение

Падение Челябинского метеорита 15 февраля 2013 г. сопровождалось вспышкой света и ударной волной, которая вызвала разрушения, хотя и относительно слабые, на большой площади. Это событие было хорошо задокументировано, и большое число фрагментов метеорита было найдено, что позволяет изучить это событие весьма подробно [Емельяненко и др., 2013; Popova et al., 2013; Brown et al., 2013]. Скорость челябинского астероида (хондрита типа LL) при входе в атмосферу была равна 19 км/с, а угол наклона траектории к горизонтالي составлял 19° [Borovicka et al., 2013]. Кинетическая энергия тела при входе в атмосферу оценивалась по разру-

шениям, вызванным ударной волной, данным регистрации светового излучения и инфразвуковых волн, а также с помощью гидродинамических вычислений. Оказалось, что результаты оценок энергии разными методами хорошо согласуются, если кинетическая энергия тела составляла в тротиловом эквиваленте от 300 до 500 кт [Емельяненко и др., 2013]. Оценки, сделанные в работе [Brown et al., 2013], дают несколько другой интервал возможных энергий – от 400 до 600 кт.

Падающие на Землю космические тела размером до 100 м обычно разрушаются и тормозятся в атмосфере, их кинетическая энергия переходит в тепловую, а ударная волна распространяется в атмосфере, доходит до Земли и вызывает землетрясение аналогично воздушному взрыву. Сейсмические колебания, вызванные воздействием воздушной ударной волны на поверхность Земли, были зарегистрированы после Челябинского события большим числом сейсмических станций на расстояниях в сотни и тысячи километров.

Оценки магнитуды сейсмического источника по регистрации волн Релея на расстояниях до 4000 км от эпицентра [Tauzin et al., 2013] дали величину магнитуды $M_s = 3,7 \pm 0,3$. В работе [Brown et al., 2013, Supplementary information] на основании 33 регистраций на расстояниях до 3300 км от источника волны с использованием методики, развитой при подземных ядерных взрывах, была дана другая оценка магнитуды $M_s = 4,0 \pm 0,3$. По этой магнитуде была сделана и оценка энергии соответствующего взрыва, опирающаяся на теорию генерации поверхностных сейсмических волн высотными ядерными взрывами [Harkrider et al., 1974]. Эта оценка дала энергию взрыва 420 ± 200 кт.

Энергия метеороида по магнитуде сейсмического события оценивалась в работах [Пасечник, 1976; Овчинников, Пасечник, 1988]. Сейсмические волны после Тунгусского события 1908 г. были зарегистрированы на станциях в Иркутске, Ташкенте, Тифлисе и Йене [Пасечник, 1976], причем было определено, что все станции регистрировали поверхностные волны Релея, вызванные действием воздушной ударной волны. Пасечник (1976) установил магнитуду взрыва в Тунгусском событии в пределах от 4,8 до 5,2 (в пересчете на вертикальную составляющую поверхностной волны). Чулымский болид 26 февраля 1984 г. вызвал сейсмическое событие магнитудой $3,4 \pm 0,3$, а энергия болида оценивалась величиной порядка 10 кт [Овчинников, Пасечник, 1988].

В работе [Светцов, 2007] было проведено численное моделирование взрывов в атмосфере, и эффект Тунгусского события сопоставлялся с последствиями взрывов на разных высотах. Оказалось, что энергия сосредоточенного взрыва, который может вызвать вывал леса, аналогичный Тунгусскому событию, заключена в пределах от 7 до 18 Мт, а высота взрыва – от 6,5 до 10,5 км, причем каждой энергии соответствует свой интервал высот шириной порядка 1–2 км. В этой же работе была предложена методика, позволяющая при моделировании взрывов вычислять и магнитуду сейсмического источника, генерируемого воздушной ударной волной. Методика была согласована с экспериментальными данными по взрывам в атмосфере на Новой Земле в 1961–1962 годах. Вычисленная магнитуда взрывов с энергиями от 7 до 18 Мт, соответствующими Тунгусскому событию, находилась в пределах от 4,8 до 5,0.

Челябинский болид выделил большую часть своей энергии на протяженном участке траектории – на высотах от 35 до 25 км [Pорова et al., 2013]. Эти высоты значительно выше высот взрывов в атмосфере, проведенных на Новой Земле с сопоставимыми энергиями, и высот выделения энергии в Тунгусском и Чулымском событиях. Кроме того, в отличие от взрывов, изолинии давления на поверхности

при наклонной траектории болида не являются окружностями. Поэтому интересно распространить методику расчета магнитуды сейсмического события на уже достаточно хорошо исследованный случай падения Челябинского болида и сопоставить результаты вычислений с данными регистраций.

Метод вычисления магнитуды сейсмического источника, обусловленного воздушной ударной волной

В работе [Светцов, 2007] путем численного моделирования сосредоточенных (сферически-симметричных) взрывов в воздухе определялось давление, вызываемое ударными волнами на поверхности Земли, и вычислялась магнитуда источника сейсмической волны. Метод вычисления магнитуды основан на решении задачи Лэмба для полупространства, на границе которого действует давление [Lamb, 1904; Ewing et al., 1957]. В осесимметричной задаче (высотный сферически-симметричный взрыв, вертикальное падение метеороида), когда давление на поверхности $P(r, t)$ зависит от радиуса r и времени t , можно вычислить спектр давления, который равен

$$p(\omega, k) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} (P(r, t) - P_0) r J_0(rk) e^{-i\omega t} dr dt, \quad (1)$$

где J_0 – функция Бесселя, P_0 – атмосферное давление у поверхности, $k = \omega/c_R$ – волновое число, c_R – фазовая скорость волны Релея.

Для определения магнитуды источника вычислялась величина A_R , которая должна быть пропорциональна энергии возбуждаемых поверхностных волн [Коган, 1965; 1975],

$$A_R = \frac{1}{P_0(\omega_2 - \omega_1)} \int_{\omega_1}^{\omega_2} \left| p\left(\omega, \frac{1}{2\pi}\right) \right| \omega d\omega, \quad (2)$$

здесь пределы интегрирования ω_1 и ω_2 зависят от диапазона регистрируемых частот поверхностной волны. Для определения магнитуды сейсмического источника была предложена следующая формула:

$$M_S = \lg(A_R) + 4.92 \quad (3)$$

где A_R измеряется в км^2 . Она была основана на опубликованном экспериментальном материале по мощным высотным взрывам, проведенным в 1961–1962 годах на Новой Земле и сопоставлении результатов вычислений с данными измерений.

Наилучшее согласие с экспериментальными данными достигалось, когда $\omega_1 = 0,25$, а $\omega_2 = 0,42 \text{ с}^{-1}$, что соответствует периодам $T = 2\pi/\omega$ от 15 до 25 с. Данный интервал периодов лежит в пределах основной моды волны Релея (волны M_1) [Пасечник, 1970] и включает в себя период максимальной чувствительности сейсмографов, использовавшихся при регистрации ядерных испытаний [Toksöz, Ben-Menahem, 1964; Stampin, 1966]. В то же время четыре сейсмографа, зафиксировавшие Тунгусское событие, согласно [Пасечник, 1970] зарегистрировали периоды колебаний от 15 до 25 с.

При вычислении спектра давления на поверхности фазовая скорость поверхностной волны c_R бралась из [Аки, Ричардс, 1983] по стандартной модели Гутенберга, но при вариации этой скорости оказалось, что ее значение слабо влияет на результат, который остается практически неизменным, если взять постоянное значение $c_R = 3,5 \text{ км/с}$.

Естественным обобщением формулы (1) на случай отсутствия осевой симметрии задачи, когда давление на поверхности зависит от координат x, y , служит формула

$$p(\omega, k_x, k_y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (P(x, y, t) - P_0) e^{-i(k_x x + k_y y + \omega t)} dx dy dt \quad (4)$$

Если давление на поверхности зависит только от радиальной координаты, то (4) преобразуется в (1), если взять волновые числа $k_x = k_y = 2^{-1/2}k$. Так как формула (3) откалибрована на сферически-симметричных взрывах, то в формулу (2) следует подставлять $p(\omega, \omega/c_R\sqrt{2}), \omega/(c_R\sqrt{2})$.

Если провести численное моделирование падения космического тела под некоторым углом к горизонти и определить давление на поверхности Земли как функцию координат и времени, то по формулам (4), (2), (3) можно вычислить магнитуду сейсмического источника.

Моделирование сейсмического эффекта при Челябинском событии

Численное моделирование процессов, сопровождающих падение Челябинского астероида в атмосфере, позволило определить давление на поверхности Земли как

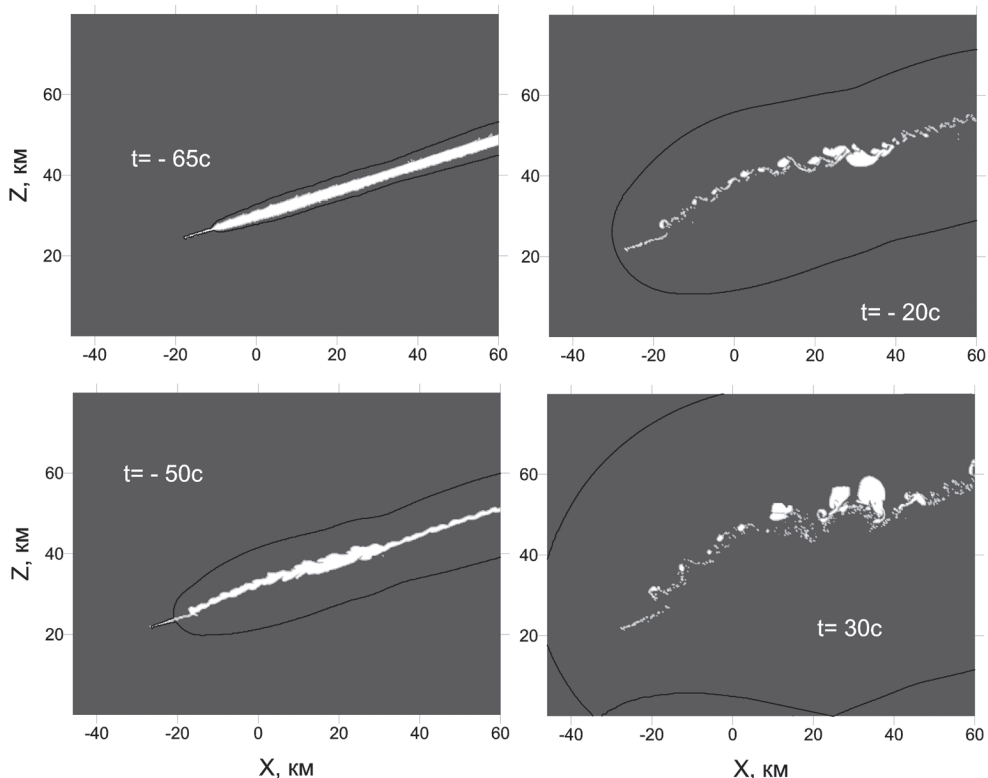
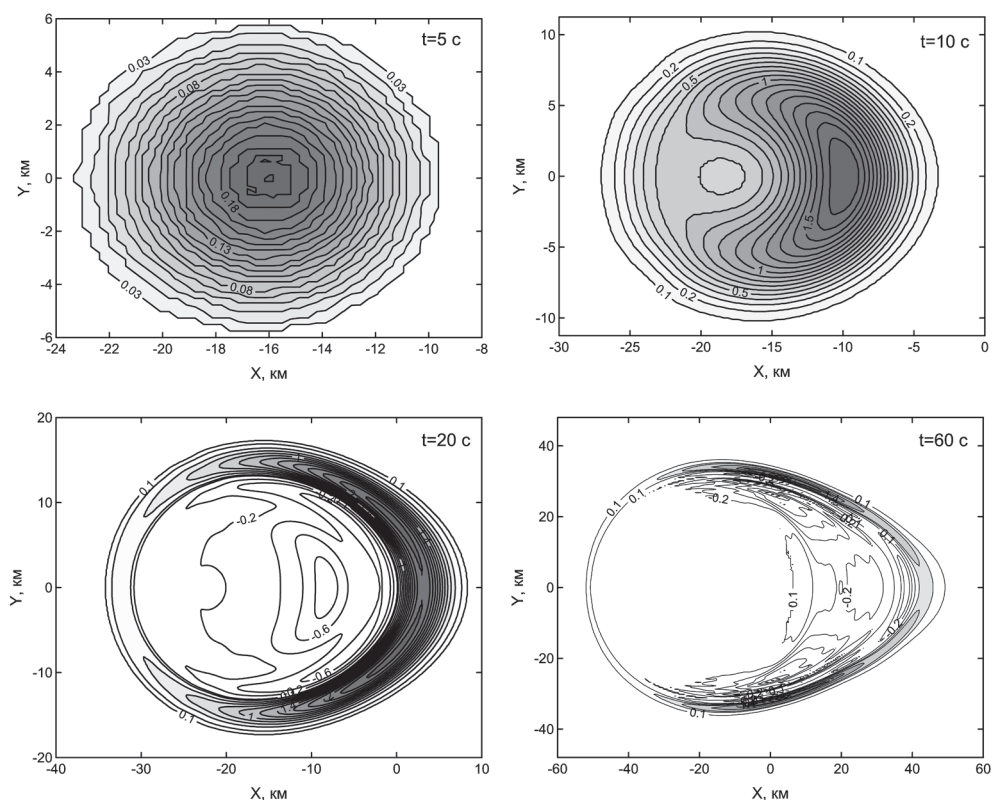


Рис. 1. Распространение ударной волны при падении Челябинского космического тела. Ударная волна показана черной линией. Вещество метеорного следа показано белым цветом. Момент времени $t = 0$ соответствует приходу ударной волны на поверхность

функцию координат x , y и времени. Расчеты генерации и распространения ударной волны проводились по программе SOVA [Shuvalov, 1999] аналогично тому, как это сделано в работах [Попова и др., 2013; Шувалов и др., 2014]. Начальные данные задавались в виде стандартной атмосферы CIRA (<http://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/atmos/cospar1.html>). Энергия выделялась в ячейках, через которые проходит траектория метеороида, в тот момент времени, когда он пролетал через эту ячейку. Энерговыведение задавалось пропорционально интенсивности излучения, определяемой по кривой свечения, восстановленной по многочисленным видеозаписям [Porova et al., 2013]. Не учитывался конечный участок траектории на высотах менее 21 км, где свечение было слабым, когда основная масса метеороида уже, по-видимому, испарилась и рассеялась на мелкие фрагменты, а скорость оставшихся более крупных фрагментов заметно упала. Скорость метеороида на участке траектории выше 21 км считалась постоянной и равной 19 км/с [Porova et al., 2013].



щей. Каждые три секунды сохранялись массивы распределения избыточного давления на поверхности земли, которые и были использованы для оценки сейсмических возмущений.

Были рассчитаны два варианта с начальной кинетической энергией тела 300 и 500 кт. Характер распространения ударной волны в атмосфере показан на рис. 1. На рис. 2 показано распределение давления на поверхности в отдельные моменты времени для варианта с энергией 300 кт. В расчетах значительный вклад в спектр давления на измеряемых частотах осуществляется на стадии, когда ударная волна, распространяющаяся вдоль поверхности, является слабой.

На рис. 3 показаны вычисленные спектры давления, точнее величина

$$\omega|p(\omega, \omega/c_R\sqrt{2}), \omega/(c_R\sqrt{2}))|/P_0,$$

которая является подинтегральным выражением в (2), если давление на поверхности зависит от двух координат. Спектры устанавливаются за время около 1 мин.

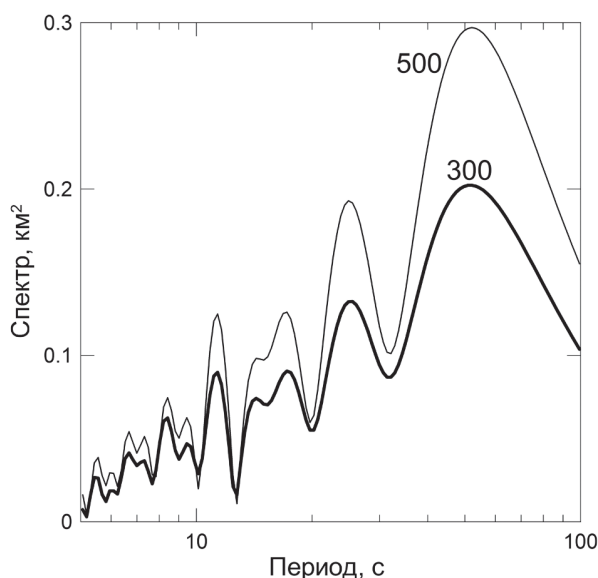


Рис. 3. Величина $\omega|p(\omega, \omega/c_R\sqrt{2}), \omega/(c_R\sqrt{2}))|/P_0$ как функция периода $T = 2\pi/\omega$

Вычисленные по формулам (4), (2), (3) магнитуды оказались равными 3,85 для начальной энергии метеороида 300 кт и 4,0 – для энергии 500 кт.

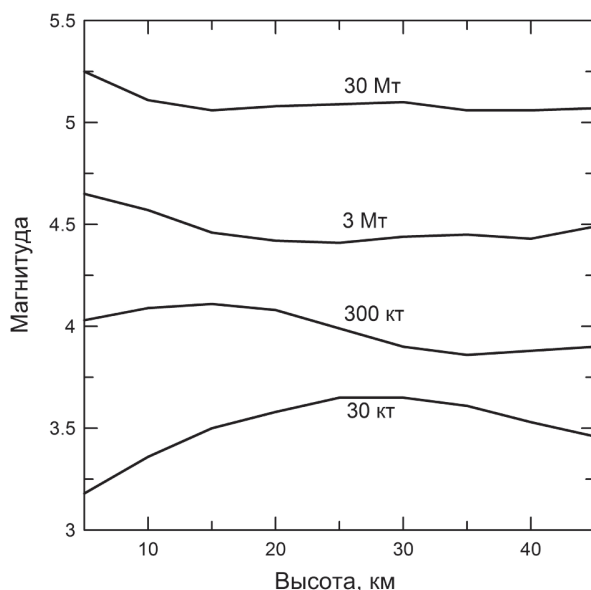
Магнитуды взрывов, вызываемых выделением энергии на разных высотах

Мы провели также серию расчетов сферически-симметричных взрывов на разных высотах с энергиями от 30 кт до 30 Мт. Энергия 30 кт соответствует кинетической энергии каменного тела (с плотностью 3 г/см³) диаметром ~7 м, движущемуся со скоростью 20 км/с. Такие тела падают на Землю в среднем раз в 5 лет [Ivanov, 2008]. Энергия 30 Мт в 2–4 раза больше оцененной энергии Тунгусского события – тела с такой энергией сталкиваются с Землей примерно раз в 3000 лет.

Начальные данные для взрывов выбирались в виде равномерно нагретой сферы воздуха с постоянной плотностью, равной нормальной плотности в атмосфере на

высоте взрыва, и удельной внутренней энергией 50 кДж/г (температура $\sim 20\,000$ К), радиус сферы определялся энергией взрыва. Изменение плотности и давления воздуха с высотой z соответствовало стандартной модели атмосферы. Поверхность Земли считалась жесткой отражающей стенкой. Численное моделирование проводилось путем решения уравнений газовой динамики в осесимметричной системе координат (r, z) методом, предложенным в работе [Shuvalov, 1999]. Уравнение состояния воздуха бралось из таблиц [Кузнецов, 1965]. Потери энергии на излучение не учитывались.

Рис. 4. Зависимость магнитуды события от высоты сосредоточенных взрывов в воздухе с энергиями от 30 кт до 30 Мт



Магнитуды событий определялись по уравнениям (1)–(3). Результаты вычислений магнитуд показаны на рис. 4. Оказалось, что магнитуды довольно слабо зависят от высоты взрыва, а для взрыва мощностью 30 кт магнитуда заметно снижается при уменьшении высоты. Очевидно, что при удалении взрыва от земли амплитуда ударной волны, падающей на поверхность, уменьшается, но увеличивается площадь воздействия, что компенсирует уменьшение давления. Мы вычисляем магнитуды в определенном интервале периодов от 15 до 25 с, и поэтому основной вклад в магнитуду дают области воздействия размером порядка длины волны 50–100 км. При взрыве небольшой мощности на небольшой высоте область воздействия имеет небольшие размеры вследствие увеличения кривизны фронта ударной волны, что снижает вклад в интеграл в выбранном интервале частот.

Вычисленные нами магнитуды Челябинского события 3,85 и 4,0 соответствуют сферически-симметричным взрывам с энергиями, равными кинетической энергии тела как 300, так и 500 кт, на высоте около 35 км. Высота максимальной яркости болида была около 30 км [Popova et al., 2013; Brown et al., 2013], причем по оценкам [Brown et al., 2013] половина энергии выделилась на высотах 27–33 км, а почти вся энергия – на высотах 25–35 км. Для взрыва 300 кт на высотах 30 и 25 км магнитуда оказывается равной 3,9 и 4,0. Таким образом, для падения метеороида мы получили несколько меньшую (на 0,05–0,15) магнитуду, чем дают сосредоточенные взрывы на высотах 30 и 25 км. Это может быть как из-за несколько мень-

шей величины давления на поверхности, так и из-за вытянутости изолиний давления вдоль проекции траектории на поверхность.

Обсуждение результатов

Вычисленные по формулам магнитуды 3,85 и 4,0 для энергий болида 300 и 500 кт согласуются с результатами, полученными по данным регистраций сейсмической волны, $M_s = 3,7 \pm 0,3$ [Tauzin et al., 2013] и $M_s = 4,0 \pm 0,3$ [Brown et al., 2013, Supplementary information] в пределах ошибок измерений. Отдельные измерения могут сильно отличаться от средних. Так в работе [Brown et al., 2013, Supplementary information] магнитуда $M_s = 4,0$ получалась усреднением по 33 регистрациям разных станций, и энергия взрыва 420 кт также получена усреднением по разным станциям, которые дают разброс энергии от ~ 100 до ~ 900 кт. Если использовать средние значения магнитуды, полученные в этих работах, то наилучшее согласие с расчетами дает магнитуда $M_s = 4,0$ при энергии взрыва 500 кт. Средняя магнитуда $M_s = 3,7$, полученная в работе [Tauzin et al., 2013], по-видимому, слишком занижена. Если бы погрешности измерений магнитуды событий, вызванных падением космических тел, имели меньший разброс, то можно было бы определять энергию метеороида по сейсмическим сигналам с большей точностью.

При моделировании Челябинского события мы получили, что магнитуды сосредоточенных взрывов, достаточно близки к магнитудам событий, вызванных ударами космических тел под углом к горизонтالي. Поэтому в первом приближении можно оценивать энергию метеороида по магнитуде, рассчитанной для высотного взрыва.

Чулымский болид, вероятно, разрушился на высоте около 10 км [Анфиногенов, Фаст, 1985]. Магнитуда взрыва, вызванного этим болидом, была определена по каналовым волнам с периодом около 2 с [Овчинников, Пасечник, 1988]. Волны Релея с большими периодами не были зарегистрированы, по-видимому, из-за отсутствия соответствующей аппаратуры. Взяв высоту взрыва 10 км и магнитуду 3,4, мы получаем энергию Чулымского метеороида около 35 кт. Но с учетом ошибок измерений сейсмическими станциями энергия Чулымского болида могла лежать в пределах от 6 до 250 кт.

Выводы

Вычисленные магнитуды сейсмического события, вызванного падением Челябинского метеороида, равны 3,85 и 4,0, если кинетическая энергия космического тела составляла 300 и 500 кт, соответственно. Магнитуда 4,0 очень хорошо согласуется со средним значением, полученным по данным регистрации около трех десятков сейсмических станций [Brown et al., 2013, Supplementary information]. Численный метод расчета магнитуды сейсмических событий, вызванных падениями космических тел, дает достаточно точные результаты. Определение энергии космического тела по измеренной магнитуде ограничено ошибками измерений.

Авторы благодарны О.П. Поповой за плодотворные обсуждения Челябинского события и Г.Г. Кочаряну за полезные замечания.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 13-05-00309-а).

Литература

- Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Т. 1. М.: Мир. 1983. 520 с.
- Анфиногенов Д.Ф., Фаст В.Г. Яркий болид на юге Сибири // Земля и Вселенная. 1985. № 3. С. 72–75.
- Емельяненко В. В., Попова О.П., Чугай Н.Н. и др. Астрономические и физические аспекты Челябинского события 15 февраля 2013 г. // Астрон. вестн. 2013. Т. 47. № 4. С. 262–277.
- Коган С.Я. К вопросу о связи параметров воздушного взрыва с сейсмической энергией // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1965. № 4. С. 9–22.
- Коган С.Я. Сейсмическая энергия и методы ее определения. М.: Наука. 1975. 152 с.
- Кузнецов Н.М. Термодинамические функции и ударные адиабаты воздуха при высоких температурах. М.: Машиностроение. 1965. 463 с.
- Обвинников В.М., Пасечник И.П. Землетрясение, вызванное взрывом Чулымского болида // Метеоритика. 1988. Вып. 47. С. 10–20.
- Пасечник И.П. Характеристики сейсмических волн при ядерных взрывах и землетрясениях. М.: Наука. 1970. 192 с.
- Пасечник И.П. Оценка параметров взрыва Тунгусского метеорита по сейсмическим и микробарографическим данным // Космическое вещество на Земле. Новосибирск: Наука. 1976. С. 24–54.
- Попова О.П., Шувалов В.В., Рыбнов Ю.С. и др. Параметры Челябинского метеороида: анализ данных // Динамические процессы в геосферах. Вып. 4: Сборник научных трудов ИДГ РАН. Москва. Изд. ГЕОС. 2013. С. 10–21.
- Светцов В.В. Оценки энергии поверхностных волн при взрывах в атмосфере и параметров источника Тунгусского события // Физика Земли. 2007. Т. 43. №. 7. С. 57–66.
- Шувалов В.В., Артемьева Н.А., Попова О.П. Оценка параметров ударной волны, вызванной падением Челябинского космического тела 15 февраля 2013 г. // 2014, Статья в настоящем сборнике.
- Brown P.G., Assink J.D., Astiz L. et al. A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors // Nature. 2013. V. 503. No. 7475. P. 238–241.
- Crampin S. Higher-mode seismic surface waves from atmospheric nuclear explosions over Novaya Zemlya // J. Geophys. Res. 1966. V. 71, № 12. P. 2951–2958.
- Ewing W.M., Jardetzky W.S., Press F. Elastic waves in layered media / New-York: McGraw-Hill book company. 1957. 380 p.
- Harkrider D.G., Newton C.A., Flinn E.A. Theoretical effect of yield and burst height of atmospheric explosions on Rayleigh wave amplitudes // Geophys. J. R. Astr. Soc. 1974. V. 36. P. 191–225.
- Ivanov B. Size-frequency distribution of asteroids and impact craters // Catastrophic events caused by cosmic objects // Springer. 2008. P. 91–116.
- Lamb H. On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid // Phil. Trans. Roy. Soc. A. 1904. V. 203. P. 1–42.
- Popova O.P., Jenniskens P., Emel'yanenko V. et al. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization // Science. 2013. V. 342. P. 1069–1073.
- Shuvalov V.V. Multi-dimensional hydrodynamic code SOVA for interfacial flows: Application to the thermal layer effect // Shock Waves. 1999. V. 9. № 6. P. 381–390.
- Tauzin B., Debayle E., Quantin C., Coltice N. Seismoacoustic coupling induced by the breakup of the 15 February 2013 Chelyabinsk meteor // Geophysical Research Letters. 2013. V. 40. No. 14. P. 3522–3526.
- Toksöz M. N., Ben-Menahem A. Excitation of seismic surface waves by atmospheric nuclear explosions // J. Geophys. Res. 1964. V. 69. № 8. P. 1639–1648.