

УДК 551.515.2

АНАЛИЗ СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ, СВЯЗАННЫХ С ПАДЕНИЕМ МЕТЕОРИТА В РАЙОНЕ ЧЕЛЯБИНСКА

© 2014 г. Д.А. Лысенко

*Институт экспериментальной метеорологии ФГБУ “НПО “Тайфун”,
г. Обнинск, Калужская обл., Россия*

Приведены результаты исследования сейсмических сигналов, вызванных взрывом метеорита 15 февраля 2013 г. Проведены спектральный и поляризационный анализ сейсмических сигналов. Для обнаружения слабых сигналов от взрыва метеорита на фоне шумов использовался статистический оптимальный метод обнаружения разладки гауссовских процессов авторегрессии (метод хи-квадрат). Некоторые особенности сигналов, связанные с надземным взрывом метеорита, в перспективе могут позволить использовать сейсмические данные для мониторинга подобных событий.

Ключевые слова: метеорит, сейсмические волны, спектр, поляризация.

15 февраля 2013 г. в окрестностях Челябинска произошло редкое событие – в воздухе взорвался большой метеорит, падение которого на Землю наблюдалось визуально. Взрыв вызвал мощную акустическую волну, что, вероятнее всего, было следствием эффекта акустосейсмической индукции¹. Сейсмические волны при этом были зарегистрированы на больших расстояниях от места взрыва.

Методики, развиваемые в ходе исследований сейсмических проявлений некоторых интенсивных атмосферных процессов, которые проводятся в последние годы Институтом экспериментальной метеорологии ФГБУ “НПО “Тайфун” [Yaroshevich, Ingel, Lysenko, 2013], позволяют обратиться к изучению и смежных вопросов, например, таких как сейсмические явления при падении метеоритов. Исследования в этой области пока немногочисленны (см., например, [Заславский, Заславский, 2011]), что определяет их актуальность.

Для анализа Челябинского события 15 февраля 2013 г. использовались сейсмограммы с двух сейсмических станций, расположенных на разных расстояниях от Челябинска – “Обнинск” (Калужская обл., около 1600 км от Челябинска) и “Арти” (Свердловская область, 232 км к северо-западу от Челябинска). Анализ осложнялся тем, что примерно за 20 мин до взрыва метеорита в Тихом океане на островах Тонга произошло землетрясение (по данным Геофизической службы РАН, время основного толчка 3:02:22 UTC, глубина очага – 70 км). Волны от этого землетрясения пришли на обе станции примерно в одно время с волнами, связанными с взрывом метеорита. Однако для станции “Обнинск” с помощью различных методов обработки данных удалось уверенно разделить сигналы от этих двух событий.

Так как волны от взрыва метеорита и волны от землетрясения пришли на станцию “Обнинск” с небольшой разницей во времени, необходимо было рассчитать ожидаемые времена прихода *P*- и *S*-волн с точностью в несколько секунд, что вполне достаточно для решения задачи данного исследования.

¹ Эффект генерации сейсмических волн под воздействием акустической волны на грунт описан в ряде работ (см., например, [Ковалевский, 2005; Гуляев и др., 2001]).

Для определения времени прихода волны необходимо было уточнить расстояние между источником волны и пунктом наблюдения, для чего использовались приведенные в табл. 1 географические координаты двух источников волн (очаг землетрясения на о-вах Тонга и точка взрыва метеорита вблизи Челябинска) и пункта наблюдения (ст. “Обнинск”). Вычисленные расстояния в километрах и градусах приведены в той же таблице. С использованием таблиц годографов *P*- и *S*-волн и результатов выполненных расчетов было найдено время пробега волн каждого типа до ст. “Обнинск” (табл. 2).

Таблица 1. Географические координаты рассматриваемых объектов и вычисленные расстояния между ними

Объект	Широта	Долгота	Расстояние от ст. “Обнинск”, км/градусы
Ст. “Обнинск”	55°6′	36°37′	
Челябинск	55°8′	61°23′	1603.2/14
О-ва Тонга	–19°44′	–174°30′	15322.3/138

Таблица 2. Ожидаемые времена пробега *P*- и *S*-волн до ст. “Обнинск”

Источник волн	Время пробега, с	
	<i>P</i> -волны	<i>S</i> -волны
Челябинск	199.59	356.99
О-ва Тонга	1155.53	1579.23

Для выделения сигнала от взрыва метеорита на фоне шумов использовался статистически оптимальный детектор¹. Такой детектор требует информации о статистических характеристиках фона помех, на котором осуществляется поиск нужного сигнала. Даже если этот фон – обычный сейсмический шум, его статистические характеристики нестационарны во времени и требуется периодическая адаптация оптимальных алгоритмов обнаружения к изменениям этих характеристик.

Указанный принцип построения адаптивных к фону помех алгоритмов обнаружения реализуется при использовании простых статистических моделей многомерных временных рядов, действующих на выходах трехкомпонентного сейсмического датчика. В качестве модели помех удобно использовать авторегрессионные процессы (АР-процессы), поскольку их статистические характеристики полностью определяются вектором параметров, который достаточно просто оценивается по наблюдениям в процессе адаптации. В таких предположениях обнаружение сигнала трактуется как задача определения момента “разладки” характеристик АР-процесса, т.е. резкого изменения его параметров [Кушнир, 2012].

Результат выделения сигнала от взрыва метеорита описанным выше методом представлен на рис. 1, где вертикальной линией отмечен момент вступления *P*-волны.

Наилучшим образом удалось выделить поверхностную волну от взрыва метеорита, для чего была выполнена фильтрация в полосе 0.05–0.1 Гц (рис. 2). При этом отчетливо выделяется сигнал, соответствующий волне Релея. Смещение почвы составило около 11.5 мк, что сопоставимо со смещением почвы при землетрясениях.

¹ Под детектором понимается специальная программа для определения наличия сигналов.

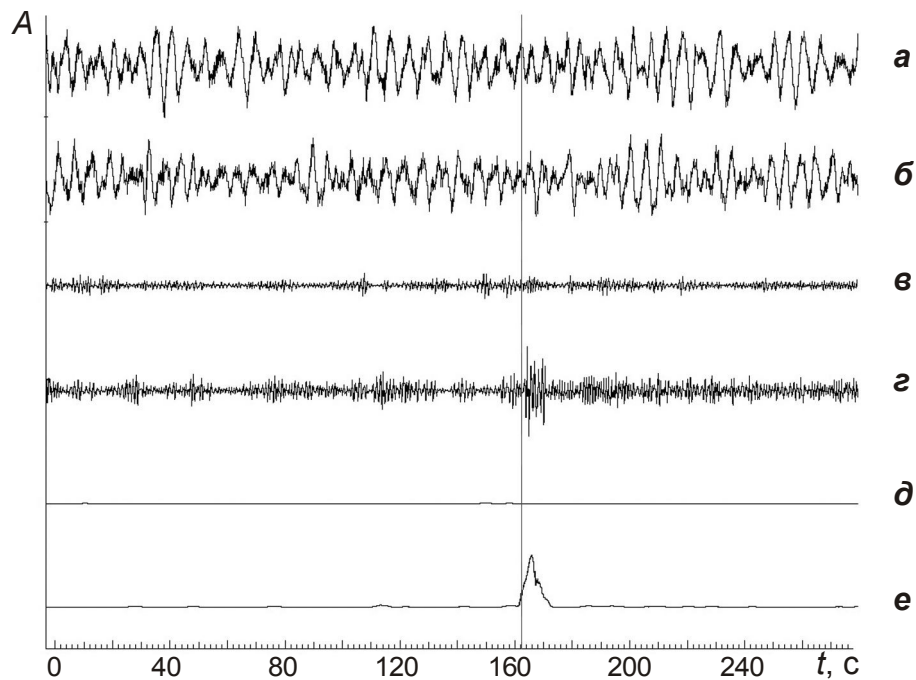


Рис. 1. Ст. “Обнинск”. Обнаружение сейсмической волны от взрыва метеорита методом хи-квадрат. Исходные (*a, б*) и обработанные (*в, з*) *Z*- и *E*-компоненты сейсмограммы и статистика детектора для соответствующих компонент (*д, е*)

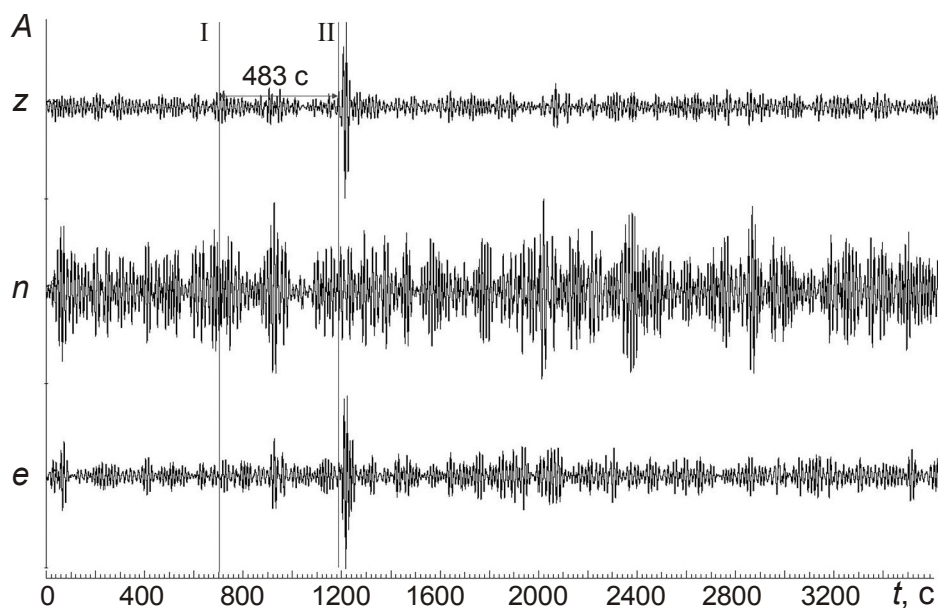


Рис. 2. Ст. “Обнинск”. Сейсмограммы трех компонент поверхностной волны, связанной с взрывом метеорита. Вертикальные линии: I – момент взрыва метеорита; II – время вступления поверхностной волны. Частотная область – 0.05–0.1 Гц

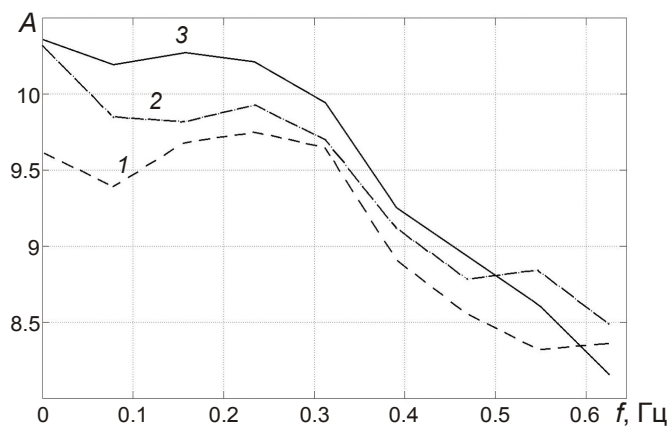
Так как и расстояния от точки взрыва метеорита до сейсмических станций “Обнинск”, “Арти”, и времена пробега волн различных типов (из таблиц годографов) известны, то можно оценить момент взрыва метеорита¹. Время пробега поверхностных волн также оценивалось путем деления расстояния на их среднюю скорость, которая

¹ Под моментом взрыва понимается момент воздействия акустических волн на поверхность Земли и возбуждения сейсмических волн.

является известной величиной. Рассчитанное по P -волне время взрыва метеорита составило 03:21:41 UTC; по поверхностной волне – 03:21:51 UTC, т.е. оба метода расчета дают приблизительно одинаковое время взрыва.

Представленные на рис. 3 спектры сейсмических сигналов, регистрируемых ст. “Обнинск” в разные периоды – при отсутствии возбуждающих источников (1), при прохождении P -волны от землетрясения (2) и поверхностной волны (3), связанной с взрывом метеорита, – позволяют видеть, что для поверхностной волны характерна высокая энергия в полосе низких частот (около 0.2 Гц). Заметим, что ось ординат имеет логарифмическую шкалу, следовательно, амплитуда поверхностной волны от взрыва примерно в 5 раз больше амплитуды волны от землетрясения.

Рис. 3. Ст. “Обнинск”. Сопоставление спектров сигналов, регистрируемых в разные периоды: 1 – при отсутствии возбуждающих источников; 2 – спектр сигнала в период прихода P -волны от землетрясения; 3 – спектр поверхностной волны от взрыва метеорита. Ось ординат – логарифмический масштаб



На частотах >0.5 Гц амплитуда волны от землетрясения больше, чем амплитуда волны от взрыва. Таким образом, можно заключить, что преобладающая энергия взрыва находится в более низкочастотной области, чем энергия землетрясения.

На рис. 4 показана поляризация поверхностной волны от взрыва метеорита, которая представляет собой проекцию вектора колебаний на три плоскости: Z – $B3$, Z – $СЮ$, $СЮ$ – $B3$, где Z – $B3$ – вертикальная плоскость, ориентированная в направлении восток–запад; Z – $СЮ$ – вертикальная плоскость секущая в направлении север–юг; $СЮ$ – $B3$ – горизонтальная плоскость.

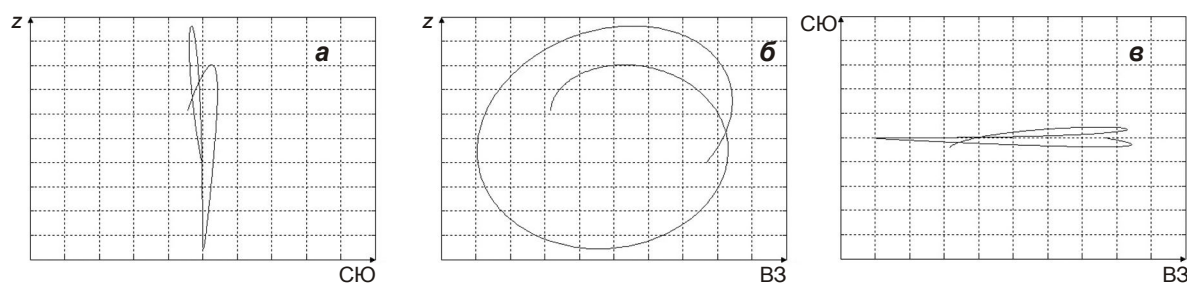


Рис. 4. Ст. “Обнинск”. Поляризация поверхностной волны в двух вертикальных плоскостях – север–юг (а), восток–запад (б) – и в горизонтальной плоскости (в)

Поверхностная волна имеет эллиптическую поляризацию в одной из вертикальных плоскостей (рис. 4, б) [Яновская, 2008; Кедров, 2005]. По форме ее проекции на горизонтальную плоскость можно сделать вывод о направлении движения волны. Так, на рис. 4, в видно, что волна поляризована четко в направлении восток–запад, и это согласуется с положением места взрыва метеорита, произошедшего к востоку относительно ст. “Обнинск”.

Как уже упоминалось выше, аналогичный анализ был выполнен с использованием записей сейсмической станции “Арти”, расположенной на сравнительно небольшом расстоянии от места взрыва метеорита. Результаты анализа приведены в табл. 3, 4.

Таблица 3. Географические координаты рассматриваемых объектов

Объект	Широта	Долгота	Расстояние, км/градусы
Ст. “Арти”	56°25'	58°32'	–
Челябинск	55°8'	61°23'	231.9/2.1
О-ва Тонга	–19°44'	–174°30'	14064.2/126.5

Таблица 4. Ожидаемые времена пробега *P*- и *S*-волн до ст. “Арти”

Источник волн	Время пробега, с	
	<i>P</i> -волны	<i>S</i> -волны
Челябинск	35.02	61.73
О-ва Тонга	1133.11	1550.73

Поскольку ст. “Арти” расположена значительно ближе к месту взрыва метеорита (232 км), чем ст. “Обнинск” (1600 км), сигнал на ее сейсмограммах записан намного отчетливее.

На рис. 5, 6 приведены сейсмограммы трех компонент сейсмического сигнала, записанных на ст. “Арти” в двух интервалах частот – 0.7–1.2 Гц (рис. 5) и 1.2–3 Гц (рис. 6). Вертикальными линиями на рис. 5 отмечены моменты землетрясения на о-вах Тонга (I) и взрыва метеорита вблизи Челябинска (II).

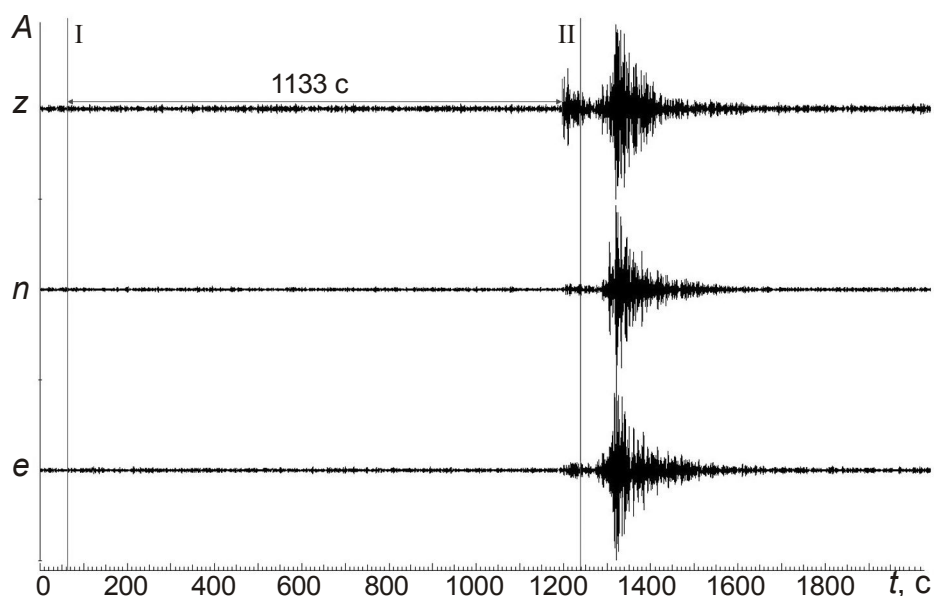


Рис. 5. Ст. “Арти”. Сейсмограммы трех компонент сейсмического сигнала в интервале частот 0.7–1.2 Гц. Вертикальными линиями отмечены моменты землетрясения на о-вах Тонга (I) и взрыва метеорита вблизи Челябинска (II). 1133 с – время пробега *P*-волны от землетрясения

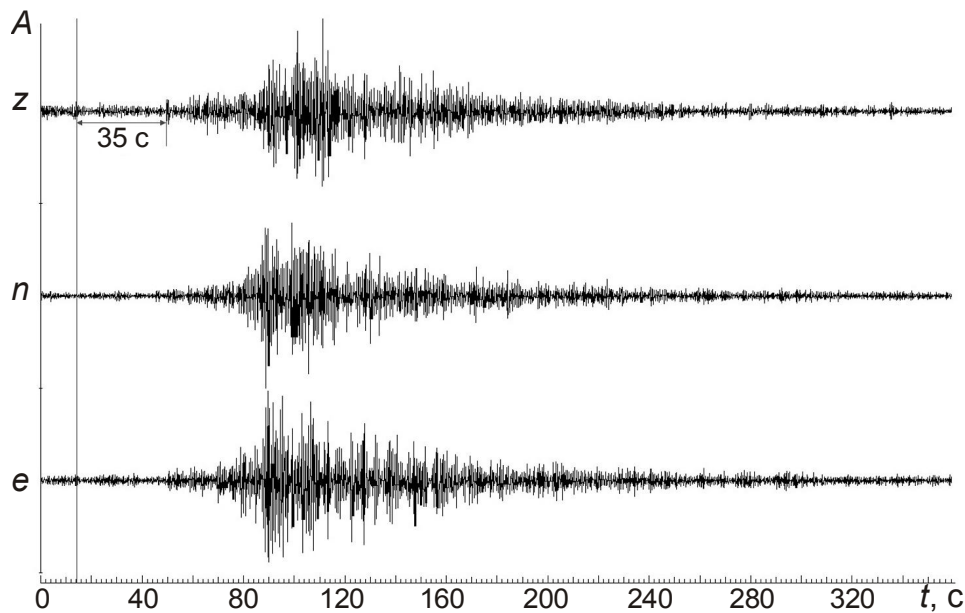


Рис. 6. Ст. “Арти”. Сейсмограммы трех компонент сейсмического сигнала от взрыва метеорита вблизи Челябинска в интервале высоких частот (1.2–3 Гц). 35 с – время пробега P -волны от взрыва метеорита

Указанное время пробега P -волны от землетрясения (1133 с, см. рис. 5) совпадает со временем, полученным по таблицам для годографа (см. табл. 4). Мощный сигнал правее линии II представляет собой “смесь” волн от взрыва метеорита.

Так как взрыв метеорита для ст. “Арти” – относительно близкое событие, на ее сейсмограммах зафиксирована высокочастотная часть сигнала (см. рис. 6), в которой хорошо заметно вступление P -волны от взрыва, момент которого отмечен вертикальной линией.

Как и на сейсмограммах ст. “Обнинск”, наблюдается сильная поверхностная волна на частотах 0.05–0.1 Гц.

Таким образом, сейсмический сигнал, возникший при взрыве метеорита, был зарегистрирован на больших расстояниях от источника (около 1500 км). Акустическая волна воздействовала на грунт сверху, в связи с чем сильные объемные волны возникнуть не могли. Этим же объясняется то, что S -волна оказалась более выраженной, чем P -волна.

Рассматриваемая волновая картина имеет характерную особенность – прослеживаются сравнительно слабые объемные P - и S -волны и сильная поверхностная волна. Это может быть объяснено тем, что взрыв метеорита произошел не на поверхности Земли, а в воздухе, на высоте около 20 км.

Возможно, некоторые особенности сигналов, связанных с взрывами метеоритов, в перспективе позволят использовать сейсмические данные для эффективного мониторинга подобных событий, которые часто происходят в малонаселенных районах и остаются незамеченными или неидентифицированными.

Литература

Гуляев В.Т., Кузнецов В.В., Плоткин В.В., Хомутов С.Ю. Генерация и распространение инфразвука в атмосфере при работе мощных сейсмодатчиков // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2001. Т. 37, № 3. С.303–312.

- Заславский Ю.М., Заславский В.Ю. К оценке сейсмического эффекта при падении на Землю метеорита // Электронный журнал “Техническая акустика”. <http://www.ejta.org> 2011. № 4.
- Кедров О.К. Сейсмические методы контроля ядерных испытаний / Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Институт стратегической стабильности Министерства РФ по атомной энергии. Саранск: “Красный Октябрь”, 2005. 420 с.
- Ковалевский В.В. Исследование акустосейсмических волновых полей, генерируемых поверхностными сейсмическими вибраторами // Акустический журнал. 2005. Т. 51. С.104–114.
- Кушнир А.Ф. Статистические и вычислительные методы сейсмического мониторинга. М.: КРАСАНД, 2012. 464 с. (Вычислительная сейсмология; Вып. 41).
- Яновская Т.Б. Основы сейсмологии. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2008. 222 с.
- Yaroshevich M.I., Ingel L.Kh., Lysenko D.A. On seismic manifestations of intensive atmospheric processes // Fluxes and Structures in Fluids: Proc. Intern. Conf. S.-Petersburg, June 2013. M.: МАКС Пресс, 2013. P.333–335.

Сведения об авторе

ЛЫСЕНКО Денис Александрович – аспирант, Институт экспериментальной метеорологии ФГБУ “НПО “Тайфун”. 249037, г. Обнинск, Калужская обл., ул. Победы, д. 4. Тел.: (848439)7-19-80. E-mail: lysenko@rpatyphoon.ru

ANALYSIS OF SEISMIC SIGNALS ASSOCIATED WITH METEOR IMPACT IN THE AREA OF CHELYABINSK

D.A. Lysenko

*Institute of Experimental Meteorology Research and Production Association “Typhoon”,
Obninsk, Kaluga Region, Russia*

Abstract. The results of the study of seismic signals caused by the explosion of a February 15, 2013 meteorite are presented. The spectral and polarization analysis of the seismic waves are performed. The statistically optimal method of detecting a disorder of Gaussian autoregression processes (method χ^2) was used for the detection of weak signals from the meteorite explosion. Some features of the signals associated with an overground meteorite burst may permit the use of seismic data for monitoring future events.

Keywords: meteorite, seismic waves, spectrum, polarization.