

ЧЕЛЯБИНСКИЙ МЕТЕОРОИД: АНАЛИЗ СИГНАЛА В ОБЛАСТИ ПРЯМОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКА

Д.О. Глазачев, Е.Д. Подобная, Ю.С. Рыбнов, О.П. Попова

Акустические сигналы от пролета и разрушения Челябинского метеороида были записаны случайными свидетелями на бытовые устройства в ближней зоне. Волновые формы сигналов имеют сложный характер, за основным приходом наблюдаются дополнительные максимумы (звуковые удары), их количество и временные задержки зависят от местоположения точек регистрации. Анализ этих сигналов может позволить определить особенности источника энерговыделения. Для первоначального анализа из сформированной базы данных отобраны две группы сигналов, зарегистрированных в различных местах по отношению к траектории, показана необходимость комплексного применения корреляционного, спектрального и кепстрального анализов. Среди множества зарегистрированных приходов присутствуют несколько спектрально различных локальных источников, но полностью классифицировать все сигналы пока не удалось.

Введение

Челябинское событие (Челябинский метеороид, ЧМ) выделяется в ряду других болидных явлений, прежде всего, наличием большого количества инфразвуковых данных и выложенных в интернете видеозаписей с камер мобильных телефонов или видеорегистраторов (около тысячи различных записей [Borovicka et al., 2015]), и большим числом работ по оценке его параметров: выделенной энергии, размера, траектории пролета и др.

Было показано, что главный (первый приход) соответствует конической ударной волне, сформированной пролетом, абляцией и разрушением метеороида [Шувалов и др., 2014; Popova et al., 2013; Brown et al., 2013]. При этом время прихода волны зависит только от траектории метеороида и ее конечной точки (после которой энерговыделение становится пренебрежимо малым) и не зависит от того в каких точках этой траектории и на какой высоте происходили вспышки (пики энерговыделения). В то же время зарегистрированные волновые формы сигналов имеют сложный характер, за основным приходом наблюдаются дополнительные максимумы, их количество и временные задержки зависят от местоположения точек регистрации. Численное моделирование показывает, что вспышки излучения, связанные с максимумами энерговыделения, могут генерировать свои локальные ударные волны, которые, однако, распространяются внутри области, ограниченной внешней конической волной. Эти отдельные ударные волны могут проявляться как отдельные пики давления после прихода первого основного возмущения. Количество таких пиков и интервалы времени между ними зависят от параметров вспышек и расположения точки наблюдения. Это демонстрирует, что попытки выделить моменты разрушения, ассоциированные со вспышками, и соответствующие разрушающие нагрузки по временам прихода последовательных звуковых сигналов (например, в Borovicka et al., 2013) могут приводить как к появлению лишних моментов разрушения, так и к преуменьшению их числа благодаря сложному пространственному взаимодействию ударных

волн. Обширный наблюдательный материал (аудиозаписи события) содержит информацию о количестве и расположении локальных максимумов на кривой энерговыделения, вызванных разрушением метеороида, но извлечение этой информации является непростой задачей.

В рамках данной работы на базе комплексного применения корреляционного, спектрального и кепстрального анализов сделана предварительная оценка минимального количества независимых локальных максимумов. При этом акцент был сделан на поиск сходства и различия между приходами, что дает возможность идентифицировать независимые локальные источники. Такой подход позволяет классифицировать сигналы от источника и дать предварительную оценку его особенностей.

Акустические данные Челябинского события

Энергия Челябинского события оценивалась по записям акустических сигналов на расстояниях более 500 км, где возможно распространение только инфразвуковых колебаний (частотой менее 16 Гц). Инфразвук ЧМ зарегистрирован фактически по всему земному шару [Pigler et al., 2015].

Из-за дисперсии скорости на больших расстояниях регистрируется цуг колебаний, что приводит к изменению регистрируемой волновой формы исходного сигнала Челябинского метеороида [Бреховских, 1982; Попова и др., 2014]. Эти особенности распространения не позволяют использовать инфразвуковые данные ЧМ для полной оценки характеристик источника.

Инфразвуковые сигналы болидов регистрируются уже достаточно давно [Edwards, 2010], в основном на больших расстояниях. Акустические сигналы от пролета искусственных спускаемых аппаратов Genesis и Stardust, вошедших в атмосферу со скоростями 10–13 км/с [ReVelle et al., 2005; ReVelle, Edwards, 2007], были записаны на расстояниях 30–40 км от траектории, что сравнимо расстояниями до точек регистрации сигналов ЧМ. Но эти сигналы были записаны профессиональной аппаратурой, чья амплитудно-частотная характеристика не вызывает существенных искажений сигнала, поэтому волновые формы были близки к N-волне. Волновые формы случайно записанных акустических сигналов других метеороидов существенно отличаются от N-волны из-за характеристик бытовых микрофонов, их количество не велико, и они никогда детально не анализировались; оценивались только времена приходов, которые интерпретировались как сигналы от конкретных моментов разрушения [Brown et al., 2004]. Поэтому наличие большого количества записей акустических сигналов в ближней зоне пролета ЧМ, где волновая форма сигнала меняется незначительно, дает возможность определить особенности источника энерговыделения.

Для анализа Челябинского события в данной работе было отобрано 60 наиболее информативных видеозаписей (в области 157×125 км), которые перекрывают как момент времени максимума светимости болида ЧМ, так и момент прихода ударной волны. Для первоначального анализа особенностей источника были выбраны две группы сигналов, приемники которых расположены на разных расстояниях от траектории (рис. 1). Первая группа, расположенная фактически под траекторией (на расстоянии примерно 25 км по перпендикуляру к траектории) – это приемники, обозначенные как Ivanov и A3, зарегистрированные в поселке



Рис. 1. Выбранные группы приемников сигналов. Первая группа (Ivanov, A3) расположена очень близко к проекции траектории на поверхность Земли, но по разные стороны от нее. Вторая группа (A16, A17, A18) расположена на удалении от траектории, но близко друг к другу

Первомайский. Вторая группа приемников сигналов, зарегистрированных в Копейске на расстояниях примерно 44 км по перпендикуляру к траектории, обозначена как A16, A17, A18. Поскольку расстояние между точками регистрации в каждой из групп невелико (порядка 1,5 км в каждой группе), и мало по сравнению с расстоянием до траектории, можно считать, что основные характеристики УВ (времена приходов, их интенсивность) в каждой группе одни и те же, и различие между сигналами вызвано только различиями в параметрах записывающих устройств и локального техногенного шума.

Предварительная обработка информации

Бытовые регистрирующие устройства (мобильные телефоны, автомобильные видеорегистраторы) имеют полосу пропускания выше 80 Гц, а частота квантования достигает 44 кГц. Оценки характеристик ударной волны от ЧМ позволяют предположить, что длительность фазы сжатия (τ_+) может составлять 1–10 с [Avramenko et al., 2014], что соответствует частотам 0,1–1 Гц и длинам волн 30–300 м, поэтому в первом приближении можно считать, что малоэтажная застройка в местах регистрации не экранирует распространяющийся сигнал, хотя и может служить источником отражений. Из этого следует, что основные особенности сигналов должны располагаться в области низких частот. Поэтому частота кван-

тования была уменьшена в 10 раз (децимация), что позволяет сохранять информацию о спектре до 2 кГц. Чтобы снизить уровень техногенных помех сигналы фильтровались низкочастотным (частота пропускания 1 кГц для корреляционных анализов) и полосовым фильтром Баттерворта второго порядка (с полосой пропускания 80–200 Гц для спектральных анализов). Децимированные и фильтрованные сигналы использовались при дальнейших исследованиях разными методами анализа.

Волновые формы сигналов

На рис. 2 приведены волновые формы акустических сигналов, зарегистрированных в двух различных точках. На волновых формах выделяются повторяющиеся приходы, хорошо различимые на слух, что свидетельствует о сложном характере источника. На рис. 3 показаны некоторые фильтрованные волновые формы приходов УВ в точку Ivanov. Детальное сравнение других различных приходов в одну и ту же точку позволяет увидеть подобие волновых форм (рис. 3), но в то же время не все приходы подобны.

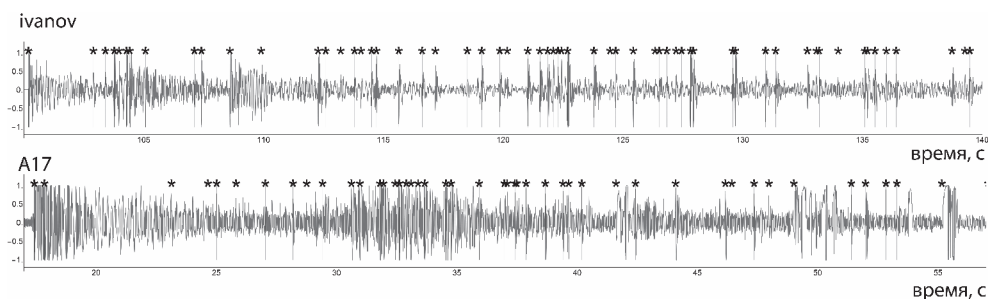


Рис. 2. Волновые формы двух аудиосигналов от Челябинского метеороида (A17 и Ivanov), зарегистрированных в разных местах. Звездочками отмечены слышимые приходы УВ (при детальном прослушивании с замедлением скорости воспроизведения)

На фрагментах волновых форм видно, что динамического диапазона приемника не хватает для регистрации сильных приходов – происходит зашкаливание записи. Это приводит к искажению спектра сильного прихода, что осложняет задачу нахождения отраженных и истинных приходов (звуковых ударов). Слабый приход после сильного может являться его отражением, однако из-за различия спектров доказать это сложно.

Корреляционный анализ

На первом этапе для анализа записей акустических сигналов применялись два вида корреляционного анализа [Сергиенко, 2002], которые представлены на рис. 4. На этом этапе не использовалась информация о временах слышимых приходов (звуковых ударов) и их относительной громкости.

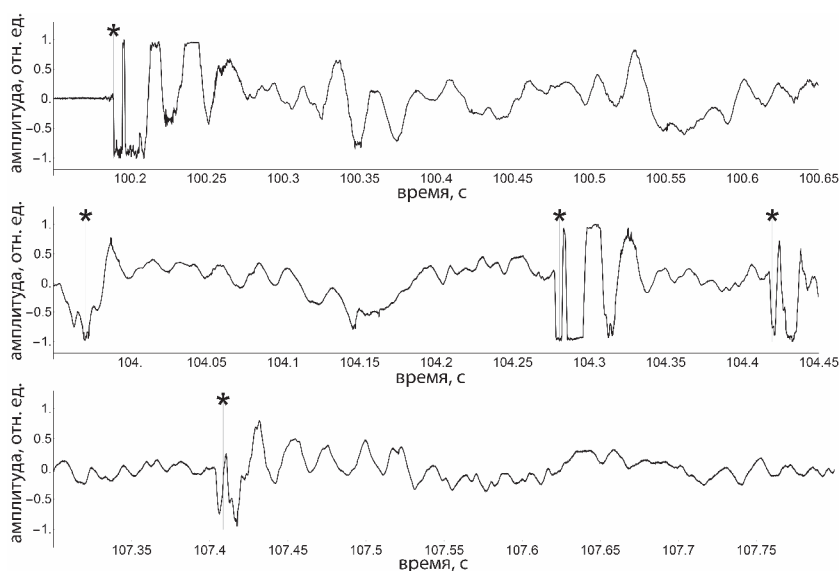


Рис. 3. Фрагменты волновой формы сигнала Ivanov.
Крестиками отмечены времена приходов

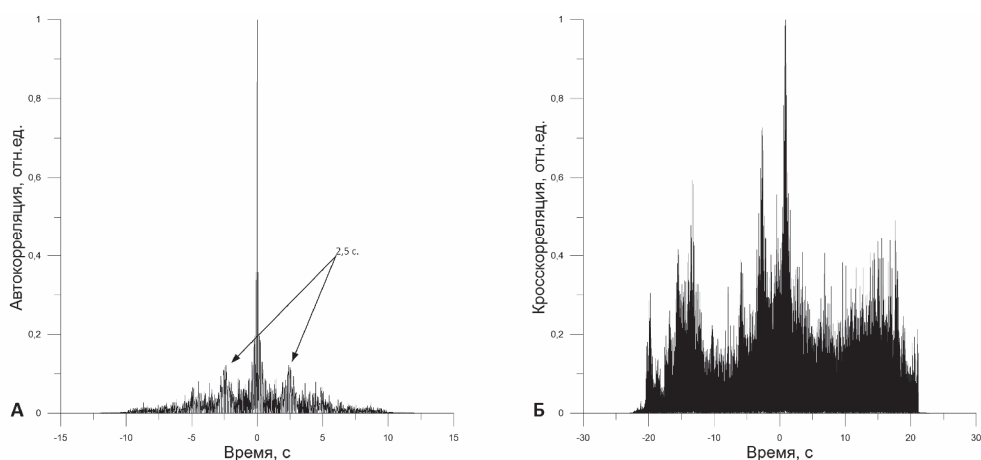


Рис. 4. Вид автокорреляционной функции сигнала A17 (показан модуль амплитуды)
– А; Взаимная корреляционная функция для сигналов A17-A18, рассчитанная по
полным сигналам (показан модуль, сигналы синхронизованы относительно момента
времени первого прихода – Б

Времена максимумов корреляционной функции соответствуют такому сдвигу одного сигнала относительно другого (временной задержке), при котором эти сигналы наиболее похожи. И авто- и кросскорреляционные функции имеют большое число боковых максимумов, что позволяет предположить сходство двух сигналов при соответствующем временном сдвиге. Абсолютные значения этих максимумов невелики, и находятся на границе статистической значимости. Что-

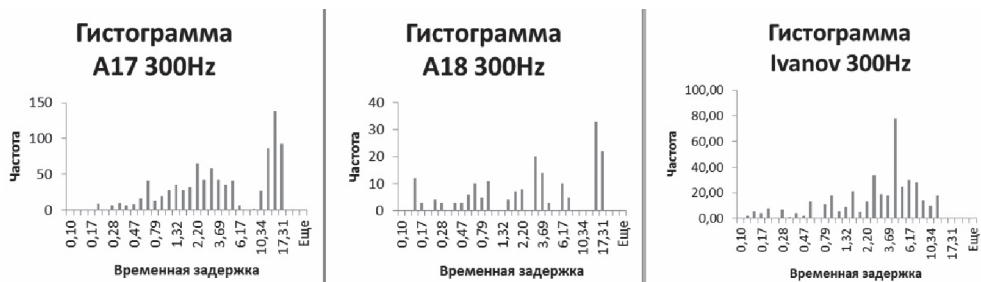


Рис. 5. Распределение относительных времен задержек для сигналов A17, A18, Ivanov предварительно фильтрованных фильтром низких частот с максимальной частотой пропускания 300 Гц

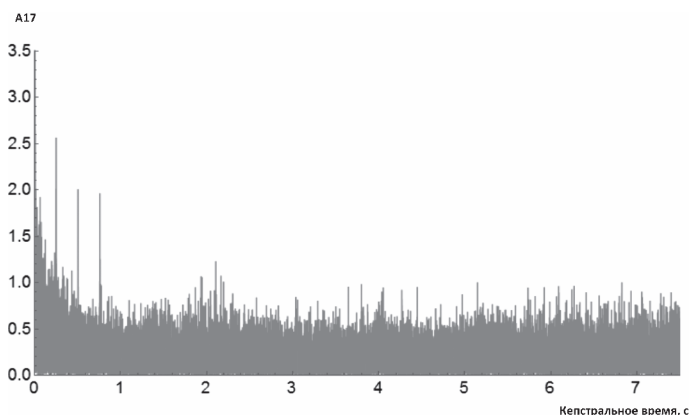


Рис. 6. Кепстр сигнала A17

бы подтвердить наличие корреляции соответствующих фрагментов сигнала, был рассчитан коэффициент корреляции с окном Кайзера разной длины, который подтвердил существование схожих участков сигнала. Основываясь на этих результатах, было проведено сопоставление временных задержек, соответствующих значимым максимумам на корреляционных функциях с соответствующими временными интервалами между максимумами на волновых формах (полученные гистограммы приведены на рис. 5). Значимый максимум на временах задержки (после первого прихода) порядка 12–14 секунд присутствует для всех сигналов группы A16–A17–A18 (рис. 5) и позволяет сделать предположение, что в источнике присутствовал как минимум один дополнительный локальный максимум. Присутствие других пиков может быть связано как с приходом менее мощных сигналов от самого источника, так и отражений от сооружений.

Подтвердить присутствие отражений (0,2–0,5 с) в сигнале позволяет построение кепстра сигнала [Зверев, 2008; Зверев, 2001]. В кепстре (спектре логарифма модуля спектра) принятого сигнала должны наблюдаться спектральные линии на частотах, равных величинам задержек сигналов. На кепстре сигнала (см. рис. 6) выделяется ряд максимумов, соответствующий кепстральным временам, меньшим 1 с, что подтверждает их предварительную идентификацию как отражений.

Спектрально-корреляционный анализ

Спектр сигнала содержит информацию об источнике, что используется, например, при классификации источников сейсмических возмущений по корреляции спектров [Асминг и др., 2010]. Сопоставление спектров последовательных приходов в разных записях может дать возможность определить сходство или различие их источников как среди приходов в пределах одной записи, так и при сравнении различных записей внутри каждой группы и между группами, поскольку во все пункты приходили сигналы из одного сложного протяженного источника. Для сопоставления спектров использовалось несколько подходов. Исходный сигнал (первые 20–40 сек. после первого прихода), после фильтрации полосовым фильтром Баттерворта с частотами пропускания 80–200 Гц и децимации, проходил с временным окном в 0,5 с и с шагом 0,1 с. В каждом окне высчитывался энергетический спектр с помощью стандартного фурье-преобразования. Затем, из рассчитанного спектра фрагмента удалялся средний спектр шума, вычисленный по 10 отрезкам сигнала, где нет идентифицируемых звуковых ударов. Кроме того, отбрасывались все частоты, амплитуды которых были ниже уровня среднего значения, плюс стандартное отклонение – эта процедура позволила получить ярко выраженную спектральную характеристику участка сигнала. Подобная методика используется в алгоритмах идентификации музыкальных произведений (например, Shazam) [Wang, 2003; Jovanovic, 2015]. Для всех подобных спектров отрезков сигнала попарно высчитывался взвешенный коэффициент корреляции. Для этого стандартная корреляция по Пирсону умножалась на весовой коэффициент, равный минимальному значению от максимума амплитуды спектральных компонент каждого спектра (статистически недостоверные коэффициенты корреляции принудительно обнулялись). Это дало возможность «подсветить» громкие моменты и уменьшить шумовые не спектрально-выраженные события. Взвешенный коэффициент корреляции достигает максимальных значений при похожих спектрах в сопоставляемых участках сигнала и достаточной амплитуде обоих участков. Результат явно показал все идентифицируемые (слышимые, даже самые тихие) приходы в сигнале. Взвешенный коэффициент корреляции дополнялся еще тремя параметрами: коэффициентом корреляции спектров, процентом совпадения основных частот у среднего спектра двух событий и процентом совпадения основных частот для одной точки, показывающей максимальное значение взвешенной корреляции.

Анализ показал, что взвешенный коэффициент корреляции достигает больших значений при сравнении спектров различных приходов. Было обнаружено несколько приходов, все 4 коэффициента которых были с высоким значением. Рассмотрение спектров соответствующих фрагментов показало их идентичность, что дает основание считать более поздний фрагмент – отражением. Однако таких полностью подобных фрагментов немного. Анализ так же показал наличие особенных приходов. Они явно слышны на записи и их коэффициенты не показывают подобия ни с какими другими отрезками сигнала, что говорит о различных источниках этих приходов.

На рис. 7 приведено сопоставление всех методов оценки сходства-различия участков сигналов для записи Ivanov, для которых взвешенный коэффициент корреляции показал высокие значения. Каждой паре времен соответствует кру-

	103.05 [0.3] In:●	103.6 [0.55] In:●●Pre:●	104.35 [0.5] In:●●Pre:●	104.95 [0.5] In:●●Pre:●	107.25 [0.35] In:●●Pre:●	112.55 [0.2] In:●●Pre:●	113.15 [0.2] In:●●Pre:●	113.85 [0.55] In:●●Pre:●	114. [0.25] In:●●Pre:●	114.75 [0.] In:●●Pre:●	116.5 [0.2] In:●●	118.4 [0.25] In:●●	120.35 [0.4] In:●●Pre:●	120.85 [0.35] In:●●Pre:●	121.3 [0.5] In:●●Pre:●	122.05 [0.6] In:●●●Pre:●	124.75 [0.25] In:●●●Pre:●	126.0 [0.15] In:●●●Pre:●	127.0 [0.05] In:●●●Pre:●	133.6 [0.45] In:●●●Pre:●	134.9 [0.5] In:●●	135.25 [0.1] In:●●Pre:●	135.75 [0.4] In:●●Pre:●	
103.05 [0.3] In:●	●	●			●			●	●		●	●	●	●	●		●	●	●		●	●	103.05 [0.3] In:●	
103.6 [0.55] In:●●Pre:●	●	●														●			●	●			103.6 [0.55] In:●●Pre:●	
104.35 [0.5] In:●●Pre:●			●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		●	●	●	104.35 [0.5] In:●●Pre:●	
104.95 [0.5] In:●●Pre:●			●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	104.95 [0.5] In:●●Pre:●	
107.25 [0.35] In:●●Pre:●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●			●	●	●		107.25 [0.35] In:●●Pre:●	
112.55 [0.2] In:●●Pre:●		●				●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●				●		112.55 [0.2] In:●●Pre:●	
113.15 [0.2] In:●●Pre:●			●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	113.15 [0.2] In:●●Pre:●	
113.85 [0.55] In:●●Pre:●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	113.85 [0.55] In:●●Pre:●	
114. [0.25] In:●●Pre:●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●			●			114. [0.25] In:●●Pre:●	
114.75 [0.] In:●●Pre:●							●				●	●	●	●	●	●	●	●			●		114.75 [0.] In:●●Pre:●	
116.5 [0.2] In:●●	●	●	●	●	●			●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		●	●	●	●	116.5 [0.2] In:●●	

Рис. 7. Сопоставление четырех методов оценки сходства–различия спектров участков сигналов для сигнала Ivanov. Отобразен фрагмент от полной таблицы. В заголовках строк и столбцов времена отобранных фрагментов сигнала, в скобках указана длительность фрагмента (за вычетом длины окна в 0,5 с.), во второй строке кружок после «In:» указывает на наличие идентифицируемого прихода внутри интервала, а «Pre:» – что в интервал попадает конец слышимого прихода

жок, состоящий из четырех сегментов. Каждый сегмент соответствует (по порядку: верхний, правый, нижний, левый) одному из используемых методов оценки (взвешенная корреляция спектральных характеристик, нормированная корреляция спектральных характеристик, процент совпадения основных частот у среднего спектра двух событий, процент совпадения основных частот для одной точки, показывающей максимальное значение взвешенной корреляции). Черный, серый и светло-серый цвета соответствуют уменьшению сходства по данному критерию. Сравнимые участки сигнала тем больше похожи друг на друга, чем больше черного цвета в соответствующем кружке. Кроме того, при расчете значений коэффициента корреляции и взвешенного коэффициента корреляции оценивалась достоверность полученного значения (с учетом коэффициента Стьюдента). Если найденное значение оказывалось недостоверным, то оно отбрасывалось. В этом случае в таблице остаются только сегменты, отражающие совпадение-различие наборов характерных частот.

В записи присутствует целый ряд достаточно мощных сигналов, которые имеют временную задержку от 4 до 20–30 с относительно основного прихода. Это может быть связано с особенностями источника. Можно выделить несколько хорошо спектрально коррелированных приходов, в то же время присутствуют спектрально уникальные приходы. Они явно слышны на записи, но соответствующие им коэффициенты не показывают подобия ни с какими другими отрезками сигнала, что говорит о различии источников (локальных максимумов энер-

говыведения) этих приходов. Минимальное количество независимых приходов может быть оценено порядка 3–4. Однако сделать оценку их мощности и местоположения в зоне разрушения болида, провести сравнение с наблюдаемой световой кривой в настоящее время не представляется возможным. Требуется разработка новых подходов. Таким образом, присутствуют несколько спектрально различных локальных источников, но полностью классифицировать все сигналы пока не удалось.

Заключение

Для анализа звуковых сигналов Челябинского события была сформирована и обработана большая база видео и аудио данных, определены времена прихода акустических волн в 60 точках, получены волновые формы сигналов. Для предварительного анализа были выбраны две группы сигналов, зарегистрированных на различных расстояниях от траектории. Материалы регистрации подвергались спектральному, корреляционному и кепстральному анализам.

Сопоставление спектров и корреляционный анализ сигнала позволил выделить особенности различных приходов. Были найдены сигналы, обусловленные отражением (реверберацией) от ближайших объектов. Так же как были найдены уникальные приходы не похожие ни на какие другие. Проведенный анализ позволяет говорить о 3–4, как минимум, независимых приходах (вступлений) акустических волн.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-17-00107).

Литература

Асминг В.Э., Кременецкая Е.О., Виноградов Ю.А., Евтюгина З.А. Использование критериев идентификации взрывов и землетрясений для уточнения оценки сейсмической опасности региона // Вестник Мурманского гос. техн. ун-та. 2010. Т. 13, № 4-2. С. 998–1007.

Блохинцев Д.И. Акустика неоднородной движущейся среды. М.: Наука, 1981. С. 207.

Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана. Л.: Гидрометеориздат, 1982. 264 с.

Зверев В.А. Слепая дереверберация речевого сигнала // Акустический журн. 2008. Т. 54, № 2. С. 307–314.

Зверев В.А., Стромков А.А. Выделение сигналов из помех численными методами. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2001.

Попова О.П., Шувалов В.В., Рыбнов Ю.С. и др. Параметры Челябинского метеороида: анализ данных // Динамические процессы в системе внутренних и внешних взаимодействующих геосфер: Сб. научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2005. С. 10–21.

Попова О.П., Провоторов Д.С. и др. Изменение волновых форм инфразвуковых сигналов с расстоянием // Известия высших учебных заведений: Физика. 2014. № 1.

Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2002.

Шувалов В.В., Артемьева Н.А., Попова О.П. Оценка параметров ударной волны, вызванной падением Челябинского космического тела // Сб. научн. трудов ИДГ РАН. Вып. 5. Геофизические эффекты падения Челябинского метеорита / Ред. Ю.И. Зецер. М.: ГЕОС, 2014. С. 48–58.

Avramenko M.I., Glazyrin I.V. et al. Simulation of the airwave caused by the Chelyabinsk superbolide // J. Geophys. Res. Vol. 119, Is. 12. 27 June 2014. P. 7035–7050.

Borovicka J., Spurný P., Brown P. et al. // Nature. 2013. V. 503. P. 235.

- Borovicka J. et al.* A catalog of video records of the 2013 Chelyabinsk superbolide // *Astronomy & Astrophysics*. 2015. V. 585. A90.
- Brown et al.* The orbit, atmospheric dynamics, and initial mass of the Park Forest meteorite // *Meteoritics & Planetary Sci.* 2004. V. 39, N 11. P. 1781–1796.
- Brown P.G. and 32 co-authors.* A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors // *Nature*. 2013. V. 503. P. 238–241.
- Jovanovic J.* Shazam It! Music Recognition Algorithms, Fingerprinting, and Processing // <https://www.toptal.com/algorithms/shazam-it-music-processing-fingerprinting-and-recognition>, 2015
- Pilger C. et al.* CTBT infrasound network performance to detect the 2013 Russian fireball event // *J. Geophys. Res.* Vol. 42, Is. 7. 16 April 2015. P. 2523–2531.
- Popova O.P. et al.* Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization // *Science*. 2013. V. 342. P. 1069.
- ReVelle D.O., Edwards W.N.* Stardust – An artificial, low-velocity “meteor” fall and recovery: 15 January 2006 // *Meteoritics & Planetary Sci.* 2007. T. 42. № 2. C. 271–299.
- ReVelle D.O., Edwards W., Sandoval T.D.* Genesis – An artificial, low velocity “meteor” fall and recovery: September 8, 2004 // *Meteoritics & Planetary Sci.* 2005. T. 40. № 6. C. 895–916.
- Wang A.* An Industrial Strength Audio Search Algorithm // *ISMIR*. 2003. October. P. 7–13.