

О МЕТОДИКЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНФРАЗВУКОВЫХ ВОЛН ОТ ГРОЗ METHOD OF STUDYING INFRASOUND WAVES FROM THUNDERSTORMS

А.Г. Сорокин 

Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, sor@iszf.irk.ru

В.А. Добрынин

Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, dobrynin@iszf.irk.ru

A.G. Sorokin

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, sor@iszf.irk.ru

V.A. Dobrynin

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, dobrynin@iszf.irk.ru

Аннотация. Приводится краткий обзор исследований инфразвуковых сигналов от гроз на протяжении более 30-летнего периода. Рассматривается несколько типов инфразвуковых сигналов от гроз, отмеченных на инфразвуковой станции ИСЗФ СО РАН в Бадарах (Бурятия). Особое внимание уделяется сигналам, начинающимся с фазы разрежения. Механизм генерации сигналов такого типа за счет преобразования энергии электростатического поля в колебания поля давления был предложен Вилсоном в 1920 г. и развит Десслером в 1973 г. В работе предлагается методика распознавания различных типов грозовых инфразвуковых сигналов: 1 — сигналы от расширяющегося теплового молниевых канала; 2 — сигналы с электростатическим механизмом генерации. На примере инфразвуковых сигналов, записанных ранее на станции в Бурятии, обсуждается применимость модели грозового облака и приводится оценка некоторых параметров грозового источника инфразвука.

Ключевые слова: атмосфера, гроза, инфразвук, молниевый канал, опасное природное явление.

Abstract. The paper provides an overview of studies of infrasound signals from thunderstorms over a period of more than 30 years. We deal with several types of infrasound signals from thunderstorms detected at the ISTP SB RAS infrasound station Badary in Buryatia. Special attention is paid to signals arising during the rarefaction phase. A mechanism for generating signals of this type by converting the energy of the electrostatic field into fluctuations in the pressure field was proposed by Dessler in 1973. We propose a method for identifying thunderstorm infrasound signals of various types: 1 — signals from an expanding thermal lightning channel; 2 — signals with an electrostatic generation mechanism. Using infrasound signals recorded earlier at the station in Buryatia as an example, we discuss the validity of the thunderstorm cloud model and assess some parameters of the thunderstorm source of infrasound.

Keywords: atmosphere, thunderstorm, infrasound, lightning channel, dangerous natural phenomena.

ВВЕДЕНИЕ

В мире каждую секунду происходит около ста молниевых разрядов, каждый из которых выделяет энергию $\sim 1.6 \cdot 10^{16}$ эрг. Поэтому понятен большой интерес к изучению такого важного явления, как атмосферный гром, на инфразвуковое излучение которого при грозе приходится значительная доля энергии.

Следует отметить, что исследование инфразвукового излучения от гроз в последние десятилетия получило существенное развитие в связи с появлением Международной системы мониторинга (IMS), созданной для обеспечения Договора о запрещении испытаний ядерного оружия ДВЗЯИ, в которую входит отдельный инфразвуковой сегмент (например, [Assink et al., 2008]). В рамках ДВЗЯИ требуется расширение оперативной базы данных инфразвуковых сигналов, в том числе от гроз.

Экспериментальному и теоретическому исследованию грома посвящено достаточно большое количество научных работ. Начало было положено в России еще в середине XVIII в. Михаилом Ломоносовым и Георгом Рихманом, которые впервые установили электрическую природу молниевых разрядов.

Подробно природа акустического грома впервые изучалась Шмидтом в 1914 г., и его основной результат состоял в том, что акустический гром существует как в слышимом звуковом, так и в нижнем инфразвуковом диапазонах [Schmidt, 1914]. Он указал на существование инфразвуковых колебаний с амплитудой около 1 Па на частоте 2 Гц. Некоторые исследователи (например, [Арабаджи, 1952, 1965]) сообщают о наличии сильнейших ударов грома с амплитудой около 100 Па с положительной фазой сжатия воздуха на частоте около 0.5 Гц.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ИНФРАЗВУКОВОГО ПОЛЯ ГРОЗЫ

Несмотря на то, что молния является одним из наиболее известных природных явлений, она остается плохо изученной. Только сейчас начинают проясняться даже самые, казалось бы простые вопросы о том, как молния инициируется внутри грозовых облаков и как звуковые волны затем распространяются на многие десятки километров. Как полагают авторы работы [Farges, Blanc, 2010] большинство исследований в этом направлении было

начато и проведено в 1960–1985 гг. [Uman, 1987; Rakov, Uman, 2003]. В основном эти исследования касались слышимой области частотного диапазона и лишь некоторые относились к сигналам с частотами ниже 20 Гц. Обычно такие сигналы распространялись не далее 20–25 км и имели амплитуду 2–25 микробара при общей длительности около 10 с, поэтому они были зарегистрированы не слишком далеко от очага грозовой деятельности. Имеются убедительные экспериментальные доказательства того, что грозы представляют собой активные источники инфразвуковых волн, охватывающие широкий диапазон высот от тропосферы до термосферы [Blanc, 1985; Few, 1995; Drob et al., 2003]. Эти данные указывают на электростатическое возбуждение инфразвуковых волн частотой 0.1–1 Гц от грозовых облаков и недавно открытое высокочастотное излучение инфразвука, которое коррелирует с вызванными молнией переходными световыми событиями в мезосфере, называемыми спрайтами [Liszka, 2004; Farges et al., 2005; Liszka, Hobara, 2006].

В работе [Holmes et al., 1971] приводятся результаты анализа сорока грозовых событий. Автор выделяет два основных типа инфразвукового грома, связанных с молниевыми разрядами: а) молниевые разряды между облаками (cloud—cloud, CC), при этом гром имеет доминирующие частоты от 4 до 30 Гц; б) наиболее частые молниевые разряды между облаком и землей (CG), при этом интенсивность грома выше и преобладающие частоты составляют более 50 Гц.

Для объяснения причин возникновения звукового и инфразвукового грома были предложены различные физические механизмы. Эффект грома в звуковом диапазоне появляется за счет выделения тепловой энергии в молниевом канале при разряде молнии. Инфразвуковая часть грома может быть объяснена преобразованием электростатического поля грозового облака в звук. Так, в первом случае, автор работы [Few, 1982, 1985] связывает расширение воздуха, разогретого молниевым разрядом, с ударной волной, которая переходит в акустический N-образный импульс давления на расстоянии нескольких метров от канала. Эта модель может объяснить частотный спектр грома с пиком около 50 Гц, но не инфразвуковой низкочастотный пик. Основы электростатической модели, призванной объяснить происхождение такого инфразвука, были представлены в работе [Wilson, 1920]. Главным моментом является появление зоны пониженного давления внутри заряженных слоев, расположенных в основании и вершине грозового облака. В модели одиночного плоского слоя с однородной плотностью объемного заряда одного знака минимум давления располагается в середине слоя, где электрическое поле E обращается в ноль. Давление уменьшается на величину [Wilson, 1920]

$$\Delta p = \varepsilon_0 E_0^2 / 2 \text{ Н/м}^2, \quad (1)$$

где E_0 — электрическое поле на поверхности слоя (в единицах МКС), а ε_0 — диэлектрическая проницаемость свободного пространства.

После разряда молнии заряд исчезает, а зона пониженного давления возвращается в исходное со-

стояние, распадаясь на уходящие вверх и вниз импульсы разрежения.

Выражение (1) для амплитуды импульса разрежения в зоне пониженного давления внутри плоского однородно-заряженного слоя непосредственно следует из уравнения Гаусса (2) и предположения о статическом равновесии — равенстве электрической силы и градиента давления (3):

$$\nabla \cdot E = \frac{dE}{dz} = \frac{\rho_c}{\varepsilon_0}, \quad (2)$$

$$\nabla p = \frac{dp}{dz} = \rho_c E, \quad (3)$$

где p — давление воздуха; ρ_c — плотность заряда. Для $\rho_c \neq 0$ $dp/dE = \varepsilon_0 E$ и пространственная вариация давления внутри зарядового слоя

$$\Delta p = p - p_c = (E^2 - E_c^2) / 2,$$

где индекс «с» соответствует значениям газового давления и напряженности электрического поля в середине слоя. Поскольку $E_c = 0$, перепад давлений между границей заряженного слоя и его серединой определится формулой (1).

В свое время в работе [Dessler, 1973] была подтверждена справедливость такой оценки на микрокопическом уровне, а высказанная в [Wilson, 1920] идея подведена к практическому использованию.

Работы по атмосферному инфразвуку и взаимосвязи с электрическими полями были начаты еще в 70-х гг. в Голландии [Holmes et al., 1971], а в европейской части России были созданы два крупных центра комплексных наблюдений в Подмоскowie (обсерватория Михнево) и в центре мегаполиса Москва (Центр геофизического мониторинга при Институте динамики геосфер РАН) [https://symp.iao.ru/files/symp/aoo/25/ru/abstr_10561.pdf; Адушкин и др., 2020]. Большая и полезная работа по морфологии гроз в Западной Сибири была проведена в Томском государственном университете, где классифицированы интенсивности и частоты повторяемости региональных гроз [Вознесенская и др., 2012].

Работы [Ерущенкова и др., 1976] в СибИЗМИР СО РАН (ныне ИСЗФ СО РАН) и за рубежом [Balachandran, 1979; Bohannon et al., 1977] были специально направлены на изучение статистических характеристик сигналов инфразвуковой ветви грома для выяснения наиболее вероятной амплитуды и формы инфразвукового сигнала при электростатическом механизме генерации инфразвука от грозы.

В Восточной Сибири впервые сигналы от гроз наблюдались автором работы [Ерущенков и др., 1976] 22 и 23 июля 1975 г. на станции Бадары в Бурятии при визуальном наблюдении грозы. Анализ данных регистрации позволил установить три характерных типа инфразвуковых колебаний от грозы (рис. 1, а–в).

Форма сигналов этих типов [Ерущенков и др., 1976] достаточно хорошо согласуется с модельной кривой (рис. 3, а), полученной на основе численного анализа в работе [Pasko, 2009].

Сигнал первого типа — инфразвуковые импульсы, начинающиеся фазой сжатия с последующей фазой

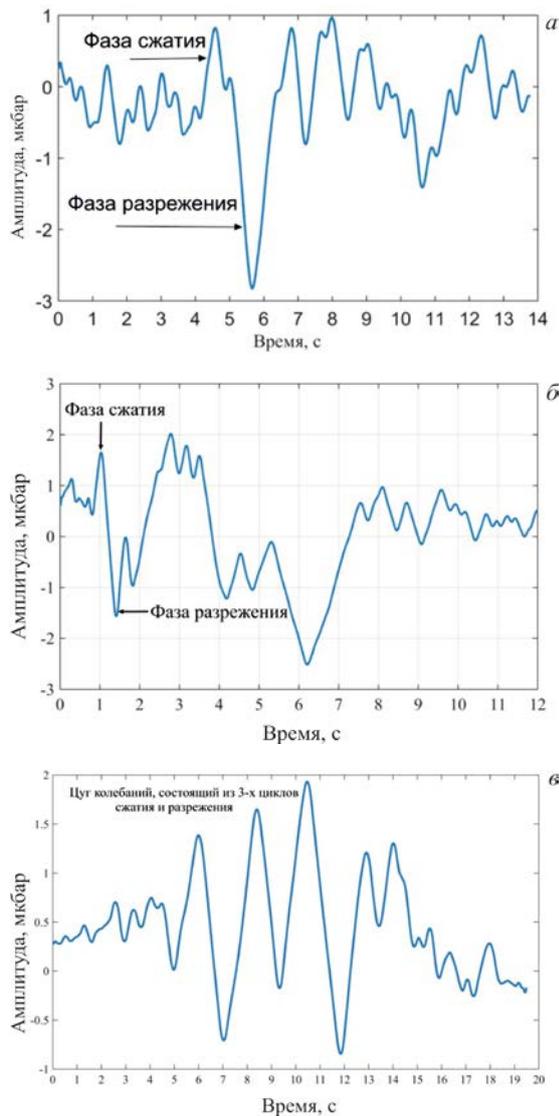


Рис. 1. Инфразвук от грозы с положительной фазой вступления и последующей фазой разрежения (а); начинающийся с фазы сжатия с последующими фазами разрежения (б); в виде цуга сигналов, состоящего из трех циклов сжатия и разрежения (в)

разрежения длительностью ~2 с и амплитудой до 4 мкбар (см. рис. 1, а). Это довольно часто наблюдающийся инфразвук от гроз, количество таких сигналов составляет более 60 %.

Сигнал второго типа — инфразвуковой сигнал, начинающийся также фазой сжатия с последующими несколькими фазами разрежения длительностью 2–2.5 с и амплитудой до 4.5 мкбар (см. рис. 1, б). Его возбуждение связано с электростатическим механизмом [Dessler, 1973]. Сигналов такого типа встречается около 8–10 %.

Инфразвуковые сигналы третьего типа, показанные на рис. 1, в, интерпретируются как волновые пакеты с числом колебаний до 12, периодом ~2.5 с и амплитудой менее 3 мкбар [Ерущенков и др., 1976]. Природа таких пакетов неясна, однако мы полагаем, что такая циклическая структура в сигнале может быть связана с периодическими циклами сжатия и разрежения в зарядовом слое грозового облака.

Высказывались предложения о том, что продолжительность положительной фазы (сжатия) может

характеризовать скорость нарастания электрического заряда в начальной стадии грозы и соответственно величину электрического заряда в грозовом облаке. В то же время произведение длительности отрицательного импульса (разрежения) и скорости звука дает оценку характерной толщины слоя заряда в основании грозового облака [Dessler, 1973; Pasko, 2009].

Наша задача в настоящее время состоит в том, чтобы разработать методику распознавания типов сигналов от гроз (молний) на основе имеющегося опыта и экспериментальных данных.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА РЕГИСТРАЦИИ ИНФРАЗВУКА ОТ ГРОЗ

Активное проявление гроз в районе ст. Бадары в Бурятии и их параметры в данной местности тесно связаны с наличием протяженной горной гряды Восточных Саян с высотой вершин более 3000 м [Филиппов, 1974] (рис. 2). Даже в сравнительно жаркое летнее время горы Восточных Саян обладают большим запасом влаги в виде ледников, лежащих на склонах хребтов, и бурных горных рек, текущих по широким долинам. Избыток влаги в летнее время в атмосфере при испарении способствует интенсивному образованию облачности в районе гор. Развитая облачность в своем движении на юго-восток спускается в Тункинскую долину (см. рис. 2) и в условиях горного рельефа и сильной турбулентности приобретает черты насыщенного влагой темного грозового облака с зарядом грозы и дождя. Обычно такие условия образования и развития грозовых облаков наблюдаются в Восточном Саяне в районе водораздела и слияния рек правого и левого Шумака, а также реки Китой, которые являются основными источниками атмосферной влаги для развития грозовой активности в регионе (см. рис. 2).

ОБ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ИНФРАЗВУКОВОГО СИГНАЛА С ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИМ МЕХАНИЗМОМ ГЕНЕРАЦИИ

В 60–80 гг. XX в. было выполнено значительное количество работ по наблюдениям инфразвуковых сигналов от гроз. В этих работах сообщается о различных формах сигналов, зарегистрированных в разных регионах [Bowman, Bedard, 1971; Holmes et al., 1971; Dessler, 1973; Ерущенков и др., 1976; Bohannon et al., 1977; Balachandran, 1979]. Работа [Dessler, 1973] представляет новый подход к объяснению инфразвуковых сигналов с фазой разрежения и попытку получения характеристик состояния грозовой атмосферы. Спустя несколько десятилетий в работе [Pasko, 2009] был дан численный анализ возбуждения инфразвуковых сигналов с последовательными фазами сжатия и разрежения при молниевом разряде. Использовалась линеаризованная система уравнений газодинамики с рядом упрощений и модель источника инфразвукового сигнала в виде слоя с однородным распределением объемного заряда, плотность которого искусственно менялась во времени,

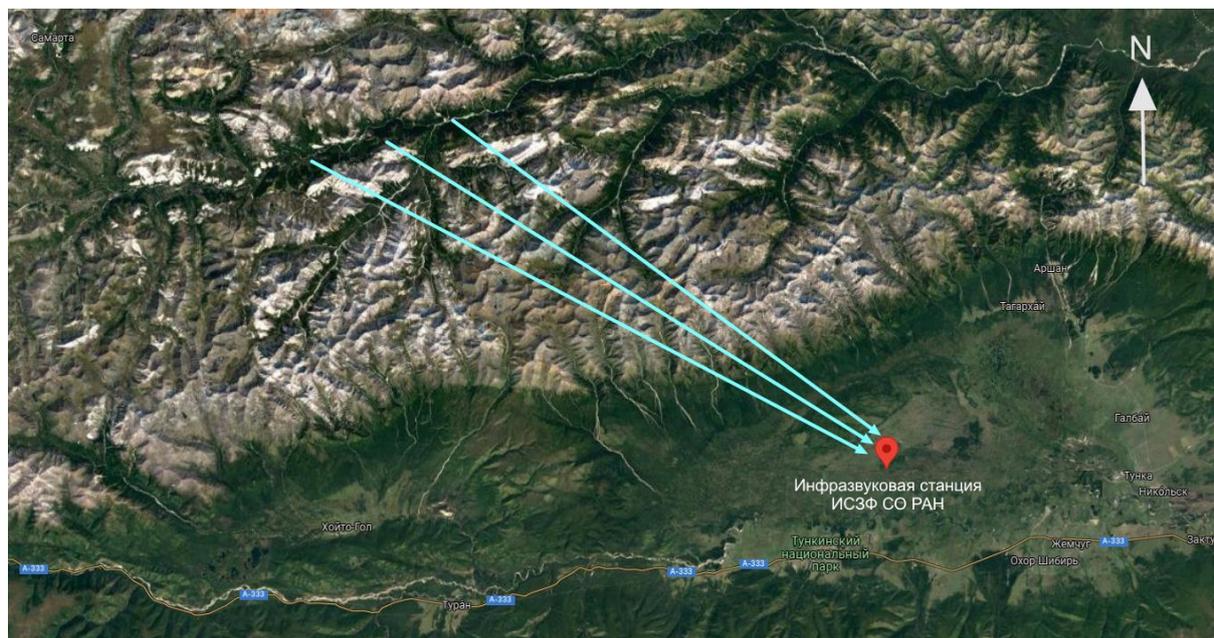


Рис. 2. Расположение станции в Бадахрах в 1975 г. и главные направления прихода гроз

имитируя сценарий событий. Численно подтверждена идея предшествующих исследователей о том, что фаза зарядки газового слоя сопровождается его быстрым расширением благодаря отталкиванию одноименных зарядов, число которых нарастает. Это приводит к формированию импульса сжатия инфразвукового сигнала. Расширение слоя означает образование внутри него области разрежения с пониженным газовым давлением. После разряда эта область становится источником импульса разрежения, излучаемого вверх и вниз. Характерная форма возмущения давления во времени показана с пояснениями на рис. 3, а, а соответствующая модель грозового слоя — на рис. 3, б.

Условия применимости модели грозового облака

Основные параметры модели инфразвукового грозового излучателя являются следующими.

1. Высота облака ~ 5 км (высота срединной части облака, включающая высотную протяженность облака). Форма заряда — плоский слой высотой несколько сотен метров ($a_c = 400$ м) — согласуется с длительностью инфразвуковых импульсов, как и у других авторов [Balachandran, 1979].

2. Положение регистратора близко к местоположению под грозовым облаком.

3. Распределение электрического заряда по высоте однослойного облака симметрично относительно срединной плоскости.

4. Пиковая плотность заряда 20 нКл/м³.

5. Напряженность электрического поля E по [Wilson, 1920] имеет только z -компоненту (вертикальную составляющую). $E_{z, \max} = 4.5 \cdot 10^5$ в/м. Электрическое поле пробоя на высоте 5 км $E_{\text{проб}} = 17 \cdot 10^5$ в/м, эта величина поля на уровне земли равна $E_{\text{зем}} = 31 \cdot 10^5$ в/м [Pasko, 2006].

Выходными параметрами модели являются результаты измерения инфразвука от гроз.

1. Тип сигнала — сжатие или разрежение (обычный ударно-тепловой или электростатический механизм излучения).

2. По длительности фазы сжатия дается оценка времени накопления заряда до критического уровня и возникновения разряда (пробоя).

3. По длительности фазы разрежения дается оценка пространственного размера заряда облака.

4. Амплитуда отрицательного давления (разрежения) пропорциональна квадрату амплитуды напряженности электрического поля в облаке. Предполагается использовать данный метод для данных с более высоким разрешением и одновременным измерением напряженности электрического поля во время грозы.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ИНТЕРПРЕТАЦИИ ИНФРАЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ ОТ ГРОЗ

Модель, предложенная [Pasko, 2009] и используемая в данном исследовании для объяснения структуры инфразвукового сигнала, является одномерной. Ось Z направлена вертикально, как показано на рис. 3, б. Пространственно-однородная плотность заряда ρ_c ограничена внутри слоя с вертикальным размером $a_c = 400$ м с центром на высоте $z_c = 5$ км.

Выбранная вертикальная протяженность слоя соответствует типичным значениям в несколько сотен метров, как и в предыдущих публикациях для согласования и объяснения длительности экспериментально наблюдаемых инфразвуковых импульсов.

На рис. 3, а показан один из результатов модельных расчетов образования инфразвукового импульса при молниевом грозовом разряде [Pasko, 2009]. По оси ординат — возмущение давления в паскалях, по оси абсцисс — время. Начиная примерно с 12-й секунды текущего времени наблюдается рост импульса сжатия, связанного с нарастанием заряда в слое

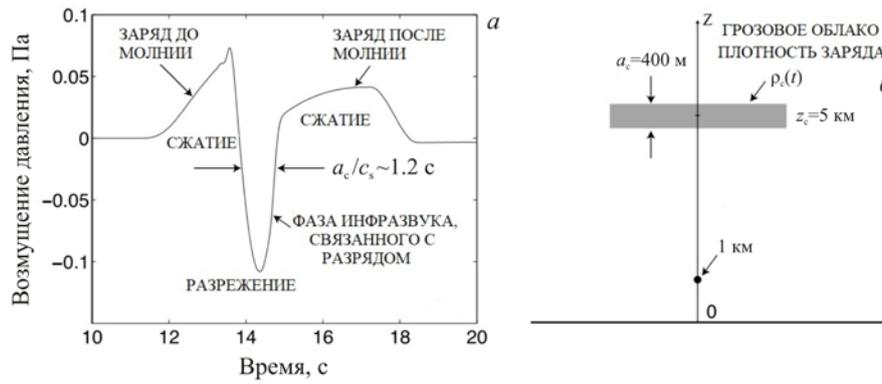


Рис. 3. Оценка формы инфразвукового сигнала от грозового облака перед молниевым разрядом и после (а); выбор модели грозового облака [Pasko, 2009] (б). С разрешения John Wiley and Sons and Copyright Clearance Center, License Number 5158670709190, 30 Sep. 2021

(см. диаграмму Δ удаления заряда в слое облака при разряде молнии ($\Delta=50\%$), показанную на рис. 2 [Pasko, 2009]. Сдвиг во времени между действием заряда и инфразвуковым импульсом разрежения обусловлен распространением волны до удаленного приемника инфразвука.

К интерпретации инфразвукового сигнала № 1 22 июля 1975 г.

Инфразвуковой сигнал № 1 был зарегистрирован 22 июля 1975 г. на ст. Бадары в Тункинском районе Бурятии и представлял собой одиночный импульс с наличием отрицательной фазы разрежения давления (рис. 4, а). Видно, что импульс не осложнен интерференцией от множественных раскатов грома — такие одиночные импульсы составляют не более 10% всех наблюдаемых сигналов и появляются чаще всего в самом начале грозы. Для интерпретации явления грозовое облако лучше всего представить в виде простого однослойного зарядного слоя, как на рис. 4, б, где H — высота слоя заряда; a_c — толщина зарядного слоя; Δt — время формирования инфразвукового импульса в зарядном слое; c_s — скорость звука; М1–М3 — микробарометры инфразвуковой станции. Измеренные характеристики инфразвукового сигнала № 1 и оценки параметров грозового облака для данного случая приведены в табл. 1.

Молниевым разрядом снимается большая часть заряда слоя грозового облака, а в центре зарядного слоя облака остается область разрежения. Последующее восстановление баланса давлений сопровождается появлением инфразвуковых импульсов отрицательной полярности, уходящих вверх и вниз от слоя. Длительность импульса разрежения определяется интервалом времени, в течение которого исчезнет область разрежения в зарядном слое. Это время равно:

$$\Delta t = \frac{a_c}{c_s} = 1.2 \text{ с, где } a_c \text{ — толщина зарядного слоя}$$

грозового облака, равная 400 м, $c_s \sim 330$ м/с — скорость звука. В нашем случае из анализа двух типов инфразвуковых сигналов, зарегистрированных на ст. Бадары от гроз в Тункинском районе Бурятии в июле 1975 г., можно оценить толщины зарядных слоев a_{c_1} и a_{c_2} , а если имеется двойной инфразвуко-

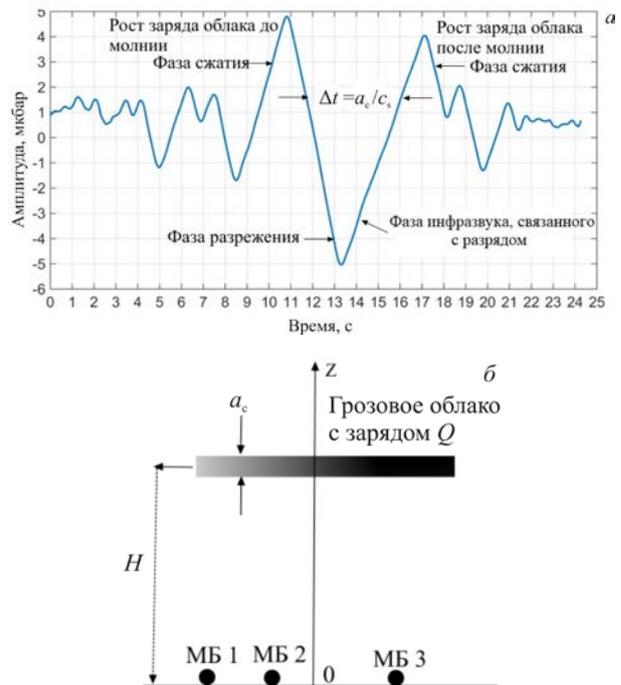


Рис. 4. Интерпретация одиночного инфразвукового сигнала от грозы на ст. Бадары 22.07.1975 (а); модель грозового облака для этого сигнала (б)

вой сигнал — из соотношения $a_{c_{1,2}} = \Delta t_{1,2} c_s$, где $\Delta t_{1,2}$ — временные масштабы инфразвуковых импульсов 1 и 2 с электростатическим механизмом возбуждения (рис. 5, а, б).

Таким образом, измеренные характеристики инфразвуковых сигналов могут быть использованы для оценки характеристик зарядного слоя грозового облака, а также значений электрического поля от зарядного слоя, генерирующего инфразвуковые сигналы. Приведем некоторые оценки параметров зарядного грозового слоя, исходя из измеренных параметров инфразвука.

К интерпретации формы инфразвукового двойного сигнала 23 июля 1975 г.

Инфразвуковой сигнал № 2 был зарегистрирован 23 июля 1975 г. на ст. Бадары ИСЗФ и представлял

Таблица 1

Характеристики инфразвукового сигнала и заряженного слоя грозового облака 22 июля 1975 г.

Двойная амплитуда сигнала, Па	Длительность фазы сжатия, с	Длительность фазы разрежения Δt , с	Толщина зарядного слоя, м	Напряженность электрического поля в слое, в/м	Время накопления заряда, с	Пространственный масштаб заряда, м
1.0	2.4	3.0	≈ 990	$3.3 \cdot 10^5$	2.4	≈ 990

собой импульс с двойной повторяющейся структурой с явной отрицательной фазой разрежения давления (рис. 5, а). Заметим, что импульс почти не осложнен интерференцией от множественных раскатов грома; можно только отметить, что незавершенный остаток от первого импульса разрежения накладывается на начало второго импульса разрежения примерно на пятнадцатой секунде.

Грозовое облако в данном случае можно представить в виде двух зарядных слоев, расположенных на близких высотных уровнях H_1 и H_2 , как показано на рис. 5, б, где H_1 и H_2 — высоты слоя зарядов Q_1 и Q_2 ; a_{c1} и a_{c2} — толщины заряженных слоев; Δt_1 и Δt_2 — времена формирования инфразвуковых импульсов в заряженных слоях a_{c1} и a_{c2} соответственно, М1–М3 — микробарометры инфразвуковой станции. Измеренные характеристики инфразвуковых сигналов 1 и 2 и оценки параметров грозовых облаков для данного случая приведены в табл. 2.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предположение о том, что разряду молнии должен предшествовать значительный рост заряда в грозовом облаке, является естественным и вполне обоснованным. Считается также, что накопление заряда связано с формированием начального импульса сжатия [Pasko, 2009]. Удаление заряда из грозового облака при разряде приводит к импульсу разрежения длительностью a_c/c_s , которая зависит от толщины a_c слоя заряда и скорости звука c_s в слое [Dessler, 1973]. Продолжение процесса зарядки грозовой тучи после молнии приводит к последующему циклу импульсов сжатия/разрежения. Отметим, что форма волны, показанная на рис. 3, а, подтверждается многими результатами, полученными экспериментально (например, [Ерущенков и др., 1976; Balachandran, 1979; Few, 1985]).

В известной статье [Dessler, 1973] рассматриваются два варианта формирования зарядового слоя в грозовом облаке, готовящемся к разряду молнии.

1. Самый простой случай распределения заряда в облаке — плоский горизонтальный диск радиусом r и толщиной $d \ll r$. Неподвижная область разрежения уже существует, образуясь при зарядке на фоне излучения импульсов сжатия. В этом случае стекание заряда приводит к излучению импульсов разрежения преимущественно вдоль оси плоского диска, так что этот сигнал можно наблюдать над облаком или непосредственно под ним.

2. Другим вариантом пространственного распределения заряда может быть цилиндрическая форма, когда длина цилиндра много больше его радиуса. В общем случае ось цилиндра может быть наклонена

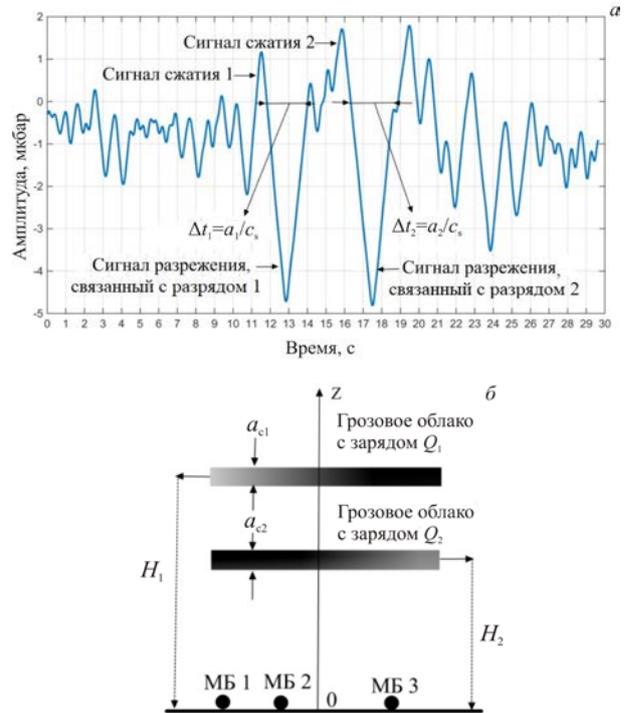


Рис. 5. Интерпретация формы двойного инфразвукового сигнала на ст. Бадары 23.07.1975 (а); модель грозового облака для этого сигнала (б)

под некоторым углом к поверхности земли. В этом случае существенная доля инфразвука излучается поперек оси цилиндра.

От учета особенностей диаграммы направленности инфразвука от гроз зависит оценка пространственного распределения заряда в слое грозового облака, форма и его масштаб, а также оценка величины напряженности электрического поля в облаке. Это сложная задача, которую предполагается решать по мере накопления данных регистрации инфразвуковых сигналов от гроз с хорошим временным разрешением на новой инфразвуковой станции в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН, расположенной вблизи с. Торы в Бурятии.

Подчеркивая сложность этой задачи, можно привести график распределения азимутов и зенитных углов (вертикальных углов прихода) от серии гроз, записанных в июле 1975 г. на ст. Бадары Ерущенковым А.И. [Ерущенков и др., 1976] (рис. 6).

Распределение азимутов и вертикальных углов прихода инфразвуковых сигналов с отрицательной фазой вычислены по измерениям времен задержек импульсов разрежения между различными инфразвуковыми микрофонами, размещенными в вершинах пространственного треугольника с катетами 250 м. Числа у точек и треугольников на рис. 6 соответствуют номерам волновых пакетов (более 40), зарегистриро-

Таблица 2

Характеристики 1-го и 2-го инфразвуковых сигналов и заряженного слоя грозового облака 23.07.1975

Двойная амплитуда сигнала, Па	Длительность фазы сжатия, с	Длительность фазы разрежения	Толщина зарядного слоя	Напряженность электрического поля в слое, в/м	Время накопления заряда, с	Пространственный масштаб заряда, м
0.6	~0.7	$\Delta t_1 \sim 2.0$ с	$a_{c1} \sim 660$ м	$\sim 2.6 \cdot 10^5$	~0.7	~660
0.7	1.4	$\Delta t_2 \sim 2.5$ с	$a_{c2} \sim 825$ м	$2.8 \cdot 10^5$	1.4	~825

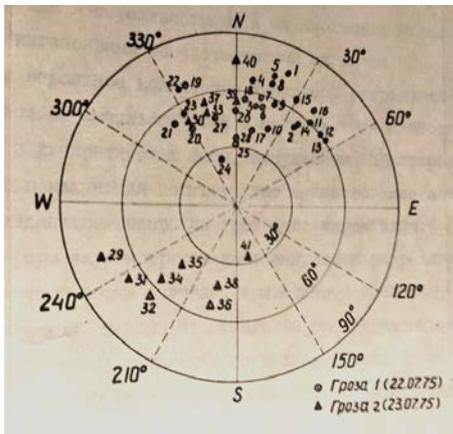


Рис. 6. Положение источников инфразвуковых импульсов разрежения в координатах азимут — зенитный угол (АУ) в период гроз 22–23 июля 1975 г. на ст. Бадары [Ерущенков и др., 1976]

ванных на станции в этот период. Видно, что инфразвуковые источники грозы 1 (22 июля 1975 г.) были расположены на севере и северо-востоке относительно станции, а гроза 2 (23 июля 1975 г.) проходила в основном на юго-западе относительно станции. Важно отметить также, что зенитные углы прихода излучения не соответствуют предсказанию Десслера о концентрации излучения вблизи нулевых зенитных углов (практически нет ни одного прихода с углом падения 0°). В то же время в работе [Ерущенков и др., 1976] показано, что, как и в [Balachandran, 1979], изменения амплитуды давления на двух из трех удаленных инфразвуковых микрофонах для этих сигналов отличалось в 2–3 раза. Это говорит об узкой направленности инфразвукового излучения.

В то же время различие реальных форм грозовых слоев может быть существенным, поскольку приходящие инфразвуковые импульсы наблюдаются в довольно широком диапазоне зенитных углов.

В заключение следует отметить недостатки и перспективы развития данной работы.

1. Модель плоского грозового слоя, используемая в данной работе, не учитывает многослойности и интерференции сигналов при повторяющихся молниевых разрядах, но при этом достаточно проста и позволяет объяснить появление низкочастотного инфразвукового сигнала с фазой разрежения.

2. Инфразвуковая сеть измерений является недостаточно плотной для оценки угловых спектров инфразвукового сигнала и требует расширения.

3. Пространственное распределение заряда в облаке и его форма определяются весьма приближенно.

Кроме того, важно иметь в виду следующее.

1. Инфразвуковые импульсы от гроз носят не гармонический, а импульсный характер, и для оценки

их продолжительности следует применять вейвлет-анализ.

2. Наклон зарядового слоя грозового облака искажает продолжительность импульса разрежения за счет распространения вдоль слоя, поэтому необходимы оценки зенитных углов прихода инфразвука от грозовых источников.

Авторы работы благодарят рецензентов за доброжелательное отношение к нашей работе и ряд ценных замечаний, способствующих улучшению качества статьи. Мы признательны также А.М. Уралову за внимание к работе и ряд ценных советов при ее обсуждении.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта № 0278-2021-0004 «Геофизический мониторинг и комплексные наблюдения атмосферы Земли и околоземного космического пространства для исследований в солнечно-земной физике».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Адушкин В.В., Рыбнов Ю. С., Спивак А.А. *Инфразвук в атмосфере*. М.: Торус Пресс, 2020. 319 с.

Арабаджи В.И. О некоторых характеристиках грома. *Доклады АН СССР*, 1952. Т. 82, № 3. С. 377–378.

Арабаджи И.И. *Спектр грома*. Природа, 1965. № 7. С. 74–75.

Вознесенская К.В., Колесник А.Г., Соловьев А.В. *Инфразвуковые сигналы от молниевых разрядов*. Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55, № 7.

Ерущенков А.И., Филиппов А. Х., Макухин В.Л. Инфразвуковые волны от молниевых разрядов. *Исследования по геомагнетизму, аэронавигации и физике Солнца*. 1976. Вып. 38. С. 73–78.

Филиппов А.Х. *Грозы Восточной Сибири*. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 75 с.

Assink J.D., Evers L.G., Holleman I., Paulssen H. Characteristics of infrasound from lightning. *Geophys. Res. Lett.* 2008. Vol. 35, L15802. DOI: [10.1029/2008GL034193](https://doi.org/10.1029/2008GL034193).

Balachandran N.K. Infrasonic signals from thunder. *J. Geophys. Res.* 1979. Vol. 84, no. C4. P. 1735–1745.

Blanc E. Observations in the upper atmosphere of infrasonic waves from natural or artificial sources: A summary. *Ann. Geophys.* 1985. Vol. 3. P. 673–688.

Bohannon J.L., Few A.A., Dessler A.J. Detection of infrasonic pulses from thunderclouds. *Geophys. Res. Lett.* 1977. Vol. 4, no. 1. P. 49–51.

Bowman H.S., Bedard A.J. Observations of infrasound and subsonic disturbances related to severe weather. *Geophys. J.* 1971. Vol. 26, iss. 1-4, P. 215–242. DOI: [10.1111/j.1365-246X.1971.tb03396.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1971.tb03396.x).

Dessler A.J. Infrasonic thunder. *J. Geophys. Res.* 1973. Vol. 78, no. 12. P. 1889–1896.

Drob D.P., Picone J.M., Garces M. Global morphology of infrasound propagation. *J. Geophys. Res.* 2003. Vol. 108, no. D21. P. 4680. DOI: [10.1029/2002JD003307](https://doi.org/10.1029/2002JD003307).

Farges T., Blanc E., le Pichon A., et al. Identification of infrasound produced by sprites during the Sprite2003 campaign.

Geophys. Res. Lett. 2005. Vol. 32, L01813. DOI: [10.1029/2004GL021212](https://doi.org/10.1029/2004GL021212).

Farges T., Blanc E. Characteristics of infrasound from lightning and sprites near thunderstorm areas. *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115, A00E31. DOI: [10.1029/2009JA014700](https://doi.org/10.1029/2009JA014700).

Few A.A. Acoustic radiations from lightning. *Handbook of Atmospheric*. CRC Press, Inc., Boca Raton, Fla. 1982. Vol. 2. P. 257–289.

Few A.A. The production of lightning-associated infrasonic acoustic sources in thunderclouds. *J. Geophys. Res.* 1985. Vol. 90, no. D4. P. 6175–6180. DOI: [10.1029/JD090ID04P06175](https://doi.org/10.1029/JD090ID04P06175).

Few A.A. Acoustic radiations from lightning. *Handbook of Atmospheric Electrodynamics*. CRC Press, Boca Raton, Fla. 1995. Vol. 2. P. 1–31.

Holmes C.R., Brook M., Krehbiel P., McCrory R. On the power spectrum and mechanism of thunder. *J. Geophys. Res.* 1971. Vol. 76, no. 9. P. 2106–2115.

Liszka L. On the possible infrasound generation by sprites. *J. Low Frequency Noise Vibration and Active Control*. 2004. Vol. 23, no. 2. P. 85–93.

Liszka L., Hobara Y. Sprite-attributed infrasonic chirps — Their detection, occurrence and properties between 1994 and 2004. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2006. Vol. 68. P. 1179–1188.

Pasko V.P. Theoretical modeling of sprites and jets. *Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges*. NATO Science Ser. II: Mathematics, Physics and Chemistry, 2006. Vol. 225.

Pasko V.P. Mechanism of infrasonic pulses from thunderclouds. *J. Geophys. Res.* 2009. Vol. 114, D08205. DOI: [10.1029/2008JD011145](https://doi.org/10.1029/2008JD011145).

Rakov V.A., Uman M.A. *Lightning, Physics and Effects*. Cambridge Univ. Press, New York, 2003. 687 p.

Schmidt W. Uber den Donner – Meteorol. Z, 1914, Bd. 31, H. 10. 487–489.

Uman M.A. *The Lightning Discharge*. Academic, London, 1987, 377 p.

Wilson C.T.R. Investigations on Lightning Discharges and on the Electric Field of Thunderstorms. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A*. 1921. Vol. 221. DOI: [10.1098/RSTA](https://doi.org/10.1098/RSTA).

URL: https://symp.iao.ru/files/symp/aoo/25/ru/abstr_10561.pdf (дата обращения 24 февраля 2022 г.).

Как цитировать эту статью:

Сорокин А.Г., Добрынин В.А. О методике исследования инфразвуковых волн от гроз. *Солнечно-земная физика*. 2022. Т. 8, № 1. С. 62–69. DOI: [10.12737/szf-81202208](https://doi.org/10.12737/szf-81202208).