

На правах рукописи

СОЛОВЬЕВ АНДРЕЙ ВЕНИАМИНОВИЧ

ИНФРАЗВУКОМЕТРИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ПОЖАРОВ

25.00.36 – Геоэкология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск - 2003

Работа выполнена в Сибирском физико-техническом институте при Томском государственном университете

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Е.Д. Тельпуховский

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

В.Б. Кашкин

доктор физико-математических наук, профессор

Н.П. Красненко

Ведущая организация:

Институт Солнечно-Земной физики СО РАН

Защита состоится " 17 " февраля 2004 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.267.14 при Томском государственном университете (634050, г. Томск, пр. Ленина, 36).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Томского государственного университета.

Автореферат разослан " 30 " декабря 2003 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор физико-математических наук,
профессор

П.М. Нагорский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Лесные пожары являются как национальной проблемой России, Канады, Австралии, европейских стран, так и глобальной с точки зрения экологии Земли. Лесные массивы занимают значительные территории, контроль пожарной обстановки подобных объектов имеет особую сложность. Традиционные методы контроля опираются на авиа охрану и аэрокосмический мониторинг. Недостаток подобных методов заключается в достаточно большой временной дискретности поступающей и анализируемой информации, что затрудняет обнаружение пожаров на ранней стадии их развития.

В последнее время возрос интерес к нетрадиционным методам обнаружения и идентификации катастрофических явлений. Это обусловлено необходимостью повышения надежности методов контроля безопасности обширных территорий для ранней локализации и предотвращения катастроф, к которым относятся крупные пожары.

Один из таких нетрадиционных методов основан на инфразвуковом мониторинге окружающей среды. Перспективность использования характеристик инфразвука в качестве идентификационных параметров пожаров заключается в способности инфразвуковых волн распространяться на большие расстояния практически без затухания. Это позволяет использовать пассивный метод контроля пожарной обстановки достаточно больших территорий в непрерывном режиме.

Естественно, что данный метод реализуем лишь при знании амплитудно-частотных характеристик как инфразвуковых волн, генерируемых пожарами, так и инфразвуковых шумов. Поэтому необходимы исследования по определению минимального энерговыделения теплового источника, при котором будет наблюдаться генерация инфразвуковых колебаний давления, по выявлению частотной структуры возникающих колебаний давления. Необходимы исследования

спектрального состава инфразвуковых шумов, а также основных закономерностей их сезонно-суточных вариаций.

Исследованию инфразвуковых волн посвящены сотни экспериментальных и теоретических работ, которые описывают импульсные и постоянно действующие источники инфразвука, а также отдельные параметры инфразвукового фона. Различными исследователями было уделено внимание генерации инфразвуковых и внутренних-гравитационных волн пожарами, площади которых составляют свыше 1 Га. Разработан ряд физико-математических моделей генерации инфразвуковых волн большими пожарами.

Однако генерация инфразвуковых волн малоразмерными пожарами (под малоразмерным пожаром будем понимать пожар, площадь которого не превышает 100 м^2) в литературе практически не освещена. Отсутствует информация о минимальном энерговыделении тепловым источником, при котором будут генерироваться инфразвуковые колебания давления. Недостаточно изучены статистические характеристики инфразвуковых шумов и их сезонно-суточная изменчивость. Это обусловило актуальность работы, направленной на исследования общих характеристик инфразвуковых шумов и инфразвуковых волн, генерируемых малоразмерными пожарами. Экспериментальные исследования параметров инфразвукового фона и малоразмерных пожаров являются основой для разработки методов обнаружения и пеленгации пожаров с помощью инфразвукометрии.

Целью диссертационной работы являются

- исследование статистических характеристик инфразвуковых шумов;
- определение нижней границы энерговыделения теплового источника, при котором наблюдается генерация инфразвука;
- экспериментальное исследование инфразвуковых волн, генерируемых малоразмерными пожарами;
- разработка методических основ обнаружения и пеленгации пожаров на основе инфразвукового мониторинга.

Для достижения поставленной цели решались следующие основные задачи:

- разработка аппаратного и методического обеспечения измерений и анализа инфразвуковых колебаний давления;
- обеспечение и сопровождение мониторинга инфразвуковых шумов;
- проведение экспериментальных работ по обнаружению инфразвуковых колебаний давления, возникающих во время маломасштабных пожаров;
- разработка программного обеспечения для спектрального и статистического анализа результатов измерений инфразвуковых колебаний давления, выявления их значимых параметров и исследование их временных закономерностей;
- разработка алгоритмов обнаружения и пеленгации малоразмерных пожаров.

Научная новизна работы заключается в следующем.

1. Разработано и реализовано аппаратно-методическое обеспечение, позволяющее в автоматическом режиме проводить мониторинг инфразвуковых колебаний давления.
2. Впервые зафиксирована генерация инфразвуковых колебаний давления маломасштабными пожарами и проведены оценки нижней границы энерговыделения пожара, при которой возможна генерация инфразвука.
3. Во время горения в спектре инфразвуковых колебаний давления обнаружено одновременное появление статистически связанных характерных спектральных составляющих.
4. Получена эмпирическая зависимость между характерными спектральными составляющими, появляющимися в спектре инфразвуковых колебаний давления при малоразмерных пожарах.
5. Получено количественное описание спектрального состава и сезонно-суточных вариаций фоновый уровня инфразвуковых шумов.

Научная и практическая ценность работы:

1. Разработанный инфразвукометрический комплекс позволяет проводить в режиме мониторинга экспериментальные исследования инфразвуковой и звуковой обстановки окружающей среды в диапазоне частот 0.01-50 Гц.

2. Полученная база данных о статистических характеристиках инфразвуковых колебаний давления имеет самостоятельное значение – как новые данные о физическом явлении, а также может служить основой при разработке корректных математических моделей и физического описания различных процессов и явлений, связанных с каналом распространения инфразвуковых волн.
3. Впервые полученные экспериментальные результаты исследований инфразвуковых колебаний давления, генерируемых малоразмерными пожарами, являются основой для построения адекватных физико-математических моделей генерации инфразвуковых волн.
4. Предложенный инфразвукометрический метод обнаружения и пеленгации пожаров может быть использован в системе пожарной охраны объектов лесопромышленного комплекса.

Проведенные исследования позволили сформулировать следующие основные результаты и положения, выносимые на защиту.

- 1). На основе анализа мониторинговых данных уровня инфразвукового фона, зарегистрированных в диапазоне частот 0.01-1.5 Гц на разработанном инфразвукометрическом комплексе установлено:
 - а) в годовом цикле наибольшие значения суточного среднеквадратичного отклонения амплитуд инфразвукового фона приходятся на зимние месяцы и достигают ~ 0.05 Па;
 - б) суточный ход среднеквадратичного отклонения амплитуд инфразвукового фона имеет одномодальное распределение с максимумом в дневное время суток независимо от сезона года;
 - в) эмпирический закон распределения спектральных составляющих энергетического спектра инфразвукового фона описывается степенной зависимостью амплитуды от частоты со средним показателем степени $-7/3$, что свидетельствует о значительном вкладе инфразвуковых флуктуаций давления турбулентного происхождения.

- 2). Малоразмерные пожары с плотностью теплового потока больше 60 кВт/м^2 при площади пламени во время установившегося процесса горения 50 м^2 и более являются источниками инфразвуковых колебаний давления, превышающих уровень естественных шумов.
- 3). В спектре инфразвуковых колебаний атмосферного давления при малоразмерных пожарах, обнаружено одновременное существование трех статистически связанных характерных спектральных составляющих.

Достоверность научных положений и выводов, полученных в работе, основывается на физическом обосновании проведенных экспериментов; большими рядами экспериментальных данных; повторяемостью экспериментальных данных; качественном и количественном соответствии с результатами, полученными другими авторами в пересекающихся областях исследований; использованием общепризнанных методов анализа экспериментальных данных.

Взаимоотношения с соавторами.

Основные результаты диссертационной работы, опубликованные в 17 работах, являются оригинальными и получены лично автором. Общая программа исследований и её отдельные этапы были определены совместно с научным руководителем. Разработка инфразвукометрического комплекса и его программно-алгоритмического обеспечения, создание калибровочного стенда и калибровка измерительных модулей, обеспечение и сопровождение непрерывного мониторинга инфразвуковых шумов, разработка методического обеспечения экспериментальных исследований инфразвуковых колебаний давления, разработка алгоритмов их анализа, а также численные расчёты на ЭВМ были проведены автором лично. Техническая реализация инфразвукометрического комплекса производилась совместно с В.В. Ручкиным и В.Н. Падусенко. Методики измерения энергетических характеристик малоразмерных пожаров обсуждались с А.М. Гришиным, исследования энергетических характеристик маломасштабных пожаров проводились совместно с сотрудниками ТГУ А.Н. Головановым и ИОА СО РАН Р.Ш. Цвыком.

Апробация работы.

Основные результаты и выводы, приведенные в диссертации, докладывались и обсуждались на научной сессии молодых ученых "Гео- и гелиофизические исследования" (Иркутск, 1998 г.), I региональной научно-практической конференции молодежи "Проблемы региональной экологии" (Томск, 1998 г.), международной конференции "Пожары в лесу и на объектах лесохимического комплекса: возникновение, тушение и экологические последствия" (Красноярск, 1999 г.), школах молодых ученых "Физика окружающей среды" (Томск, 2000, 2002 гг.), школах-семинарах молодых ученых "Современные проблемы физики и технологии" (Томск, 2000, 2001, 2002 гг.), международной конференции "Сопряженные задачи механики и экологии" (Томск, 2000 г.), 4-й международной конференции "Лесные и степные пожары: возникновение, распространение, тушение и экологические последствия" (Иркутск, 2001 г.), Третьей всероссийской научной конференции "Физические проблемы экологии (экологическая физика)" (Москва, 2001 г.).

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 2 статьи в рецензируемых отечественных научных журналах, 8 статей в сборниках трудов конференций, 1 статья в тематическом сборнике "Экологические проблемы и пути их решения", 6 материалов конференций. Общее число работ составляет 17 наименований.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и содержит 53 рисунка, 12 таблиц, список цитируемой литературы из 94 наименований. Общий объем диссертации - 163 страницы.

Во введении обосновывается актуальность работы, формулируется цель и направление исследований, отмечена их новизна, научная и практическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту. Представлен краткий обзор структуры диссертации.

В первой главе рассмотрено современное состояние проблемы исследований инфразвуковых волн. Описаны известные параметры инфразвуковых шумов и их сезонная изменчивость. Приведены характеристики известных инфразвуковых сигналов от импульсных источников, которые потенциально могут быть зафиксированы, и будут являться помехами при мониторинговании инфразвуковых волн от пожаров. Уделено внимание состоянию исследований постоянно существующих инфразвуковых волн, возбуждаемых микробаромами, поскольку они вносят особый вклад в инфрашумовую обстановку. Проведён анализ исследований инфразвуковых волн при больших пожарах, описаны известные механизмы генерации инфразвуковых и внутренних-гравитационных волн большими пожарами. Сформулированы цель и задачи исследований настоящей работы.

Вторая глава посвящена описанию мобильного инфразвукометрического комплекса и его технических характеристик. Мобильность реализованного инфразвукометрического комплекса позволяет изменять конфигурацию и местоположение акустической антенной решётки, состоящей из измерительных модулей, а так же место расположения измерительного комплекса в целом. Использование трёх измерительных модулей даёт возможность проводить пространственную фильтрацию акустических сигналов, а на этой основе пеленгацию источников инфразвука. Приведена методика калибровки измерительных модулей. Описаны аппаратура и методы расчетов теплового потока. Описаны методические особенности организации и проведения экспериментальных исследований инфразвуковых колебаний давления. Рассмотрены основные схемы проведения экспериментов, методы, на основе которых построены алгоритмы и процедуры анализа параметров инфразвуковых колебаний давления, реализованных в виде пакета программ, выполненных на языке Си.

В третьей главе представлены результаты экспериментального исследования инфразвукового фона. Обсуждаются суточные и сезонные вариации уровня инфразвуковых шумов. Установлено, что наибольшие значения уровня инфразвукового фона наблюдаются в зимние месяцы, а наименьшие – в летние. В

суточном ходе наблюдается повышение уровня фона в дневное время суток вне зависимости от сезона года. Показано, что наиболее благоприятное время для выявления инфразвуковых колебаний давления от пожаров является ночным, а сезон года - лето, что в конечном итоге повышает вероятность обнаружения пожаров в наиболее пожароопасный период. По результатам анализа амплитудно-частотных характеристик инфразвуковых шумов показано, что распределение энергии в диапазоне частот 0.3-1.5 Гц в среднем подчиняется закону $S(f) \propto f^{-\frac{7}{3}}$. Отмечено, что знание "эталонной" формы шумового спектра существенно облегчает задачу выделения полезных сигналов из шумов. Предложено аппроксимационное описание спектральной плотности мощности инфразвуковых шумов в виде $S(f) = A \cdot f^B$, сокращающее объемы анализируемой информации и позволяющее восстанавливать величину спектральной плотности мощности на любом участке спектра в диапазоне частот 0.3-1.5 Гц. Представлены сезонно-суточные изменения коэффициентов аппроксимации. На основе сравнения восстановленных величин инфразвуковых флуктуаций на частоте 0.1 Гц с данными регистрации инфразвуковых шумов на инфразвукометрическом комплексе СИБИЗМИР СО РАН показана адекватность предложенного описания спектральной плотности мощности.

В четвертой главе представлены и обсуждаются основные результаты экспериментальных исследований инфразвуковых колебаний давления, возникающих при горении штабелей древесины. Установлено, что при превышении энергетического порога малоразмерным пожаром в спектре инфразвуковых колебаний давления наблюдается одновременное появление трех характерных спектральных составляющих, частоты которых связаны между собой эмпирическими соотношениями: $F_2/F_1 = 1.32 \pm 0.09$, $F_3/F_1 = 2.82 \pm 1.16$, где наименьшая частота характерных составляющих спектра F_1 находится в диапазоне 0.04-0.11 Гц.

Представлены результаты измерений температуры и плотности теплового потока во время горения штабелей древесины. Установлено, что максимальные амплитуды характерных спектральных составляющих наблюдаются во время максимальных значений плотности теплового потока в зоне пожара.

На основе измерения площади пламени и распределения радиационной температуры на поверхности горящего штабеля с помощью тепловизора Inframetric, а так же измерения величин плотности теплового потока во время всего процесса горения штабеля установлено, что генерация инфразвуковых колебаний давления, превышающих уровень фона, происходит тогда, когда плотность теплового потока малоразмерного пожара превышает 60 кВт/м^2 при площади пламени во время установившегося процесса горения не менее 50 м^2 .

В пятой главе приведены основные результаты экспериментальных исследований по пеленгации инфразвуковых колебаний давления, генерируемых малоразмерными пожарами. Установлена возможность определения угловых координат теплового источника по направлению прихода инфразвуковой волны. Рассчитана минимальная ошибка пеленга для случая приема инфразвуковых волн на трех независимых частотных составляющих спектра. По совокупности измерений инфразвукового фона и инфразвуковых волн при малоразмерных пожарах рассчитано изменение минимальной ошибки пеленга в зависимости от сезона года и частотных окон спектральных составляющих инфразвуковых волн.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в ходе проведенных исследований:

1. Разработан и реализован инфразвукометрический комплекс для регистрации инфразвуковых колебаний давления в диапазоне частот $0.01 - 50 \text{ Гц}$, состоящий из трех измерительных модулей и центральной станции. Реализован калибровочный стенд для калибровки и последующей поверки измерительных модулей. Разработано специальное математическое обеспечение функционирования комплекса, архивации и обработки данных.

2. На разработанном инфразвукометрическом комплексе проведен двухлетний цикл непрерывного измерения инфразвукового фона в условиях г. Томска, в ходе которого установлены следующие закономерности:

- в годовом цикле наибольшие значения суточного среднеквадратичного отклонения амплитуд инфразвукового фона в диапазоне частот 0.01-1.5 Гц приходятся на зимние месяцы и составляет ~ 0.05 Па;
- суточный ход среднеквадратичного отклонения амплитуд инфразвукового фона в диапазоне частот 0.01-1.5 Гц имеет одномодальное распределение с максимумом в дневное время суток независимо от сезона года;
- максимальные значения суточного распределения амплитуд инфразвукового фона в летнее время года наблюдаются около 17 часов, в зимнее время года - около 11 часов местного времени;
- закон распределения спектральных составляющих энергетического спектра инфразвукового фона в диапазоне частот 0.07-1.5 Гц описывается зависимостью амплитуды от частоты в виде $S(f) \approx f^{-\frac{7}{3}}$, что свидетельствует о значительном вкладе инфразвуковых флуктуаций давления турбулентного происхождения в указанном диапазоне частот.

3. Предложенное аппроксимационное описание спектральной плотности мощности инфразвуковых колебаний позволяет сократить объемы хранимой и анализируемой информации, а также позволяет адекватно восстанавливать величины флуктуаций давления в любом участке спектра, не выходящем за пределы частотного ограничения аппроксимации 0.07-1.5 Гц.

4. Малоразмерные пожары с плотностью теплового потока не менее 60 кВт/м^2 при площади пламени во время установившегося процесса горения не менее 50 м^2 являются источниками инфразвуковых колебаний давления.

5. В спектре инфразвуковых колебаний атмосферного давления при превышении энергетического порога малоразмерным пожаром наблюдается одновременное появление трех характерных спектральных составляющих, максимальные амплитуды которых превышают уровень фона приблизительно в три раза в непосредственной близости от источника. Зависимость между составляющими спектра описывается эмпирическими соотношениями $F_2/F_1=1.32\pm 0.09$, $F_3/F_1=2.82\pm 1.16$, где наименьшая частота характерных

составляющих спектра F_I находится в диапазоне 0.04-0.11 Гц, что является критерием обнаружения малоразмерных пожаров.

6. Определена минимальная ошибка пеленга по измерениям трех спектральных составляющих, установлен минимальный ожидаемый разброс значений угловых координат источника инфразвуковых волн в зависимости от сезона года и частотных окон характерных спектральных составляющих.

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю и сотрудникам кафедры космической физики и экологии, кафедры физической и вычислительной механики ТГУ, отдела радиофизики, отдела геофизики и экологии СФТИ за помощь в получении и обсуждении результатов, изложенных в диссертации, за полезные дискуссии и внимание, способствовавшие выполнению диссертационной работы.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. А.В. Соловьев, Е.Д. Тельпуховский Исследование инфразвуковых колебаний давления при маломасштабных пожарах // Изв. Вузов. Физика. № 1. 2001. С.91-93.
2. Соловьев А.В., Тельпуховский Е.Д. Вариации и спектральный состав инфразвуковых шумов в атмосфере // Изв. Вузов. Физика. № 8. 2002. С.63-65.
3. Гришин А.М., Голованов А.Н., Долгов А.А., Лобода Е.Л., Падуюнко В.Н., Рейно В.В., Ручкин В.В., Соловьев А.В., Тельпуховский Е.Д., Цвык Р.Ш., Шерстобитов М.В. Экспериментальные исследования лесных пожаров, горения штабелей древесины и инфразвуковых колебаний давления. // Математическое и физическое моделирование сопряженных задач механики реагирующих сред и экологии. Томск: Изд-во Томского университета. 2000. С.102-124.
4. Соловьев А.В., Ручкин В.В., Падусенко В.Н. Комплекс инфразвукового мониторинга окружающей среды // Проблемы региональной экологии. Вып. 6.

- "Материалы I региональной научно-практической конференции молодежи" (Томск, 10 - 12 ноября 1998 г.). Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2000. С.93-94.
5. Соловьев А.В., Тельпуховский Е.Д. Сезонно-суточные вариации инфразвуковых шумов в атмосфере // Сборник статей третьей всероссийской научной конференции "Физические проблемы экологии (экологическая физика)". Москва: Изд-во МГУ. 2001. Т.7. С.17-27.
 6. Соловьев А.В., Тельпуховский Е.Д. Сезонно-суточные вариации микропульсаций атмосферного давления // Сборник статей молодых ученых "Современные проблемы физики и технологий". Томск. 2001. С.281-283.
 7. Соловьев А.В., Говоров А.В. Суточные вариации инфразвукового фона окружающей среды // Труды школы молодых ученых "Физика окружающей среды". Томск. 2002. С.38-40.
 8. Соловьев А.В., Ручкин В.В., Падусенко В.Н. Мониторинг инфразвукового фона окружающей среды // Сборник трудов международной школы молодых ученых и специалистов "Физика окружающей среды". Томск. 1999. С.109.
 9. Соловьев А.В., Тельпуховский Е.Д. Возможный метод обнаружения малоразмерных пожаров // Труды школы молодых ученых "Физика окружающей среды". Томск. 2000. С.102-105.
 10. Соловьев А.В. Инфразвуковые волны в атмосфере при малых пожарах // Экологические проблемы и пути их решения: Сборник научных трудов аспирантов и студентов. Томск: Томский государственный университет. 2001. С.67-69.
 11. Соловьев А.В. Сезонное изменение спектрального состава инфразвуковых шумов // Труды школы молодых ученых "Физика окружающей среды". Томск. 2002. С.181-184.
 12. Соловьев А.В. Использование инфразвукометрии при обнаружении пожаров // Физика радиоволн: Труды Всерос. научн. конф. Томск: изд-во Том. ун-та. 2002. С. 338-36.

13. Соловьев А.В., Тельпуховский Е.Д., Ручкин В.В., Падусенко В.Н. Мониторинг инфразвукового фона окружающей среды // Материалы Научной сессии молодых ученых "Гео- и гелиофизические исследования". Иркутск. 1998. С.14.
14. Соловьев А.В., Тельпуховский Е.Д., Ручкин В.В., Падусенко В.Н. Инфразвукометрическая система обнаружения лесных пожаров // Материалы международной конференции "Пожары в лесу и на объектах лесохимического комплекса: возникновение, тушение и экологические последствия". Красноярск. 1999. С.123.
15. Соловьев А.В., Тельпуховский Е.Д. Сезонно-суточные вариации инфразвуковых шумов в атмосфере // Материалы Третьей всероссийской научной конференции "Физические проблемы экологии (экологическая физика)". Москва. 2001. С.48.
16. Гришин А.М., Голованов А.Н., Долгов А.А., Тельпуховский Е.Д., Соловьев А.В., Цвык Р.Ш. О возникновении инфразвуковых волн, образующихся при горении штабелей древесины // Материалы Международной конференции "Сопряженные задачи механики и экологии". Томск. 2000. С.72-73.
17. Гришин А.М., Голованов А.Н., Тельпуховский Е.Д., Соловьев А.В., Лудзиш О.С., Долгов А.А. К вопросу о возникновении инфразвуковых колебаний давления во время горения штабелей древесины // Материалы 4-й международной конференции «Лесные и степные пожары: возникновение, распространение, тушение и экологические последствия». Иркутск. Изд-во Томского университета. 2001. С.55-58.

Подписано в печать "___" декабря 2003 г.

Тираж 100 экз. Бесплатно

Заказ № _____ КЦ «Южный»,

г.Томск, ул. 19-й Гвардейской дивизии, 25.