
СИГНАЛЫ, ИХ ФОРМИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА

УДК 551.501.7

МЕТОДИКА АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ЗАДАЧЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ

В.В. СЕМЕНЕЦ, В.И. ЛЕОНИДОВ

Рассматривается один из подходов к использованию метода дистанционного акустического зондирования для мониторинга процессов распространения вредных выбросов в пограничном слое атмосферы. Разработана система информативных признаков эхограмм, получаемых при зондировании инверсионных температурных слоев атмосферы.

One way to use a method of remote acoustic sounding for monitoring the propagation processes of harmful emissions in boundary layer of atmosphere is considered. The system of informative attributes of echograms that are obtained as result of sounding of inversion temperature layers of atmosphere is developed.

ВВЕДЕНИЕ

Природная среда (экосфера) является важнейшим условием жизни и деятельности человека. Современная динамика изменения окружающей среды под действием техногенных факторов представляет проблему большого научного и социального значения.

Атмосфера, в особенности ее приземный слой, является одной из наиболее динамичных составляющих экосферы. Концентрация примесей в атмосфере и на земной поверхности, помимо мощности источников, в значительной степени зависит от метеорологических условий, среди которых важнейшее значение имеют скорость и направление ветра, их изменение с высотой, термическая устойчивость атмосферы, облака, осадки и т. д. Долгое время под влиянием воздушных течений и химического разложения атмосферный воздух почти полностью очищался уже на небольшом расстоянии от источника выброса. В последние 10 ... 20 лет объемы выбросов возросли настолько, что они уже не могут рассеиваться естественным путем до безвредной концентрации. В связи с этим важнейшим направлением в исследованиях по разработке методик снижения загрязнения атмосферы является создание системы предупреждения предприятий о необходимости снижения или полного прекращения выбросов в периоды особенно неблагоприятных метеорологических условий, из которых наиболее опасными, с точки зрения повышения концентрации загрязнений, являются слабый ветер и инверсионная термическая стратификация, препятствующая оттоку примесей в более высокие слои и способствующая накоплению их в приземном слое атмосферы. В то же время термическая конвекция способствует интенсивному оттоку и рассеиванию вредных выбросов в более высоких и удаленных областях атмосферного пограничного слоя (АПС).

Поэтому основной составляющей системы предупреждения является методика мониторинга и идентификации типа термодинамического состояния (ТДС) АПС.

Проблемной лабораторией медико-экологической электронной техники Харьковского национального университета радиоэлектроники проводятся исследования в области разработки методов и средств дистанционного мониторинга АПС в целях обеспечения автоматической идентификации типов термодинамических процессов с помощью методов и средств акустического зондирования (АЗ). Исследования в этой области ведутся в ХНУРЭ с 1974 г. За этот период разработаны методы и средства эффективного зондирования АПС в различных климатических районах земной поверхности и океана [1–10]. Преимущество метода АЗ, по сравнению с используемым в настоящее время стандартным аэрологическим зондированием, состоит в возможности проведения массовых и непрерывных наблюдений. Разрабатываемые методика и система зондирования предназначены для научных исследований в области разработки математических моделей рассеивания вредных выбросов в АПС, для обеспечения разработок в области создания методик прогнозирования локальных метеорологических условий, что даст возможность осуществить заблаговременное предупреждение о возможности возникновения экологически опасных состояний АПС, а также для осуществления стандартных наблюдений его состояния с целью обеспечения непрерывного экологического и метеорологического контроля.

Существующие в настоящее время методики акустического зондирования [11–14] ограничиваются измерениями спектров мощности эхо-сигналов как функций высоты и времени, сопоставлением этих данных с прямыми контактными измерениями фи-

зических величин в АПС и статистическим анализом структуры эхограмм на основе их визуальной классификации. Такой подход ограничивает возможности методики АЗ кругом задач научных исследований.

В связи с этим целью настоящей работы является расширение функциональных возможностей метода АЗ путем разработки методики автоматизированной классификации эхограмм по принципу их соответствия экологически опасным метеорологическим ситуациям. Это даст возможность использовать системы АЗ в практике экологического и метеорологического контроля.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И НАПРАВЛЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

Загрязнение атмосферы происходит вследствие производимых предприятиями плановых (разрешенных) выбросов, а также вследствие аварийных (непредусмотренных) выбросов вредных веществ. В зависимости от термодинамического состояния атмосферы выбрасываемые вредные вещества могут либо рассеиваться, либо накапливаться в определенных районах. Накопление вредных веществ даже при производстве только плановых выбросов при неблагоприятных метеоусловиях приводит к увеличению концентрации вредных веществ до сверхдопустимых и опасных значений. Определить факт наступления неблагоприятных условий в зоне действия предприятия с достаточной точностью в пределах 20 ... 30 км по данным простых метеонаблюдений или по картам погоды не удастся, поскольку продолжительность неблагоприятных состояний невелика и составляет 0,5 ... 3 ч. Однако этого времени оказывается достаточно для того, чтобы люди и окружающая среда подверглись опасному воздействию.

При возникновении аварийных выбросов важно знать направление и характер распространения вредных веществ (происходит их накопление или рассеивание).

В настоящее время нами исследуется методика зондирования АПС в зоне промышленного города с помощью действующей радиоэлектронной системы.

Принцип действия системы основан на зондировании атмосферы короткими акустическими сигналами (вместо запуска радиозондов) с последующим анализом полученных эхо-сигналов, которые возникают за счет флуктуаций, а также за счет вертикальных изменений метеопараметров атмосферы [7]. Анализ эхо-сигналов производится с помощью компьютера в автоматическом режиме или по указаниям исследователя. Режим зондирования может быть круглосуточным. Максимально достижимые характеристики исследуемой области АПС: высота исследуемого слоя атмосферы до 1 км, радиус контролируемой зоны при использовании одного пункта наблюдения составляет 10 ... 20 км в зависимости от типа местности. При необходимости контроля более обширных территорий может быть создана сеть пунктов зондирования.

Основное направление исследований – разработка методов эффективной обработки данных акустического зондирования с целью предупреждения о возможности возникновения экологически опасных метеорологических условий.

Система разрабатывается для определения следующих данных: вертикальных профилей температуры, влажности и скорости ветра в пограничном слое атмосферы, типа термодинамического состояния воздушной массы; высоты проникновения термиков в пограничный слой атмосферы и частоты их возникновения при неустойчивой стратификации; высоты и мощности (толщины) температурных инверсионных слоев; амплитуды и частоты волн тяжести в устойчивой стратификации;

Предполагается, что в процессе контроля состояния АПС система будет осуществлять распознавание типа процесса загрязнения и производить расчет и отображение конфигурации загрязненной зоны.

Разработку методики определения метеорологических параметров предполагается осуществить на основе непрерывного анализа данных вертикального акустического зондирования, автоматической классификации пространственно-временных структур акустических эхо-сигналов, и далее, на основании этой классификации осуществить идентификацию термодинамического состояния АПС с последующим расчетом метеопараметров по моделям, адекватным выявленному термодинамическому состоянию АПС.

Термодинамическое состояние атмосферы целесообразно идентифицировать программно или по заданию пользователя. При использовании одного пункта наблюдения радиус контролируемой зоны может быть порядка 10 ... 20 км в зависимости от метеоусловий, при этом анализ атмосферных процессов производится непрерывно по 15 ... 30-минутным временным выборкам эхо-сигналов.

2. ИНФОРМАТИВНЫЕ ПРИЗНАКИ ЭХОГРАММ ПРИ УСТОЙЧИВОМ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ АПС (ТЕМПЕРАТУРНОЙ ИНВЕРСИИ)

Возможность автоматизированного анализа данных акустического зондирования АПС при термической конвекции рассмотрена в [7–9]. Поэтому далее проанализируем возможность определения системы информативных признаков при акустическом зондировании устойчиво стратифицированных температурных слоев в АПС.

Для разработки системы информативных признаков проведем анализ массивов данных, которые получены путем зондирования АПС акустическими импульсными сигналами с синусоидальным заполнением на несущей частоте 1800 Гц. Длительность зондирующего импульса $\tau_s = 0,03$ (разрешающая способность по высоте $\Delta z \cong 5$ м), период повторения зондирующего импульса $T_s = 3$ с. На рис. 1 приведен пример совокупности реализаций (выборка) эхо-сиг-

налов (эхограмма), полученной путем зондирования АПС при устойчивой температурной стратификации (инверсии температуры). Общая продолжительность выборки (сеанса зондирования) составляет один час. Данные систематизированы в виде матрицы, состоящей из 1200 столбцов (профилей эхо-сигналов), каждый профиль представлен совокупностью 24 000 отсчетов.

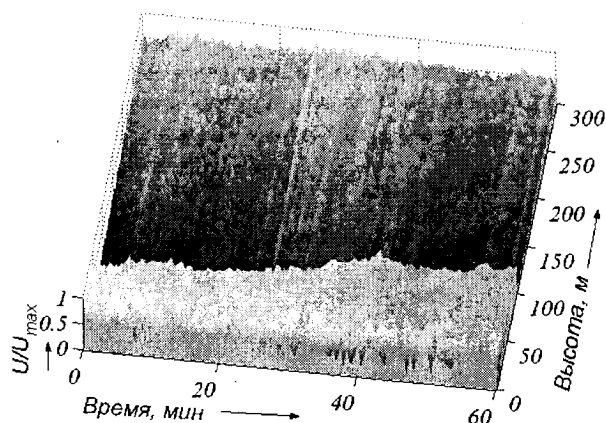


Рис. 1. Эхограмма акустических эхо-сигналов, полученная в условиях инверсионной температурной стратификации АПС

В качестве первого информативного признака рассмотрим усредненные профили эхо-сигналов, полученные на выходе приемного устройства с линейно нарастающим коэффициентом усиления на интервале времени, равному периоду повторения зондирующих импульсов – временной автоматической регулировкой усиления (ВАРУ). Учитывая, что, как следует из рис. 1, верхняя граница инверсионного слоя имеет постоянный тренд и периодическую флуктуацию высоты, разобьем исходный массив данных на три подмассива продолжительностью по 20 мин каждый, усредним профили эхо-сигналов по этим массивам и пронормируем результирующий профиль на его минимальное значение. Результаты расчетов приведены на рис. 2. Из анализа полученных профилей следует, что эхо-сигнал в данном случае обладает свойством устойчивости формы, имеет явно выраженную верхнюю границу, в нижней части наблюдаются хорошо различимые периодические колебания эхо-сигнала. Изменение верхней границы эхо-сигнала обусловлены трендом высоты инверсионного слоя и периодическими колебаниями верхней границы, так называемыми «гравитационными» волнами. Устойчивость формы профилей позволяет выдвинуть гипотезу о наличии корреляционной связи между последовательными профилями эхо-сигналов в пределах выделенного блока. Для проверки этой гипотезы был проведен корреляционный анализ, состоящий в расчете коэффициентов корреляции между первым по времени профилем в блоке данных и каждым из последующих профилей. В результате были получены три (по числу анализируемых блоков данных) зависимости коэффициентов корреляции от номера профиля в блоке. Далее, полученные три зави-

симости были усреднены. На рис. 3 приведен график полученной усредненной корреляционной функции (кривая 1). Полученная функция хорошо аппроксимируется кусочно-линейной зависимостью (кривая 2), среднее квадратичное значение разности между реальной и аппроксимирующей функцией не превышает 2%. Таким образом, вид этой корреляционной функции может рассматриваться как второй информативный признак эхограммы инверсионной термодинамической структуры в АПС.

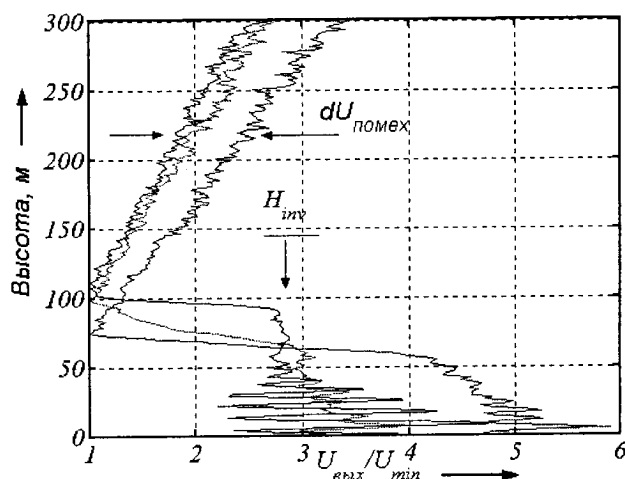


Рис. 2. Усредненные по 400 зондированиям (на временном интервале 20 мин) вертикальные профили эхо-сигналов эхограммы температурной инверсии (рис. 1)

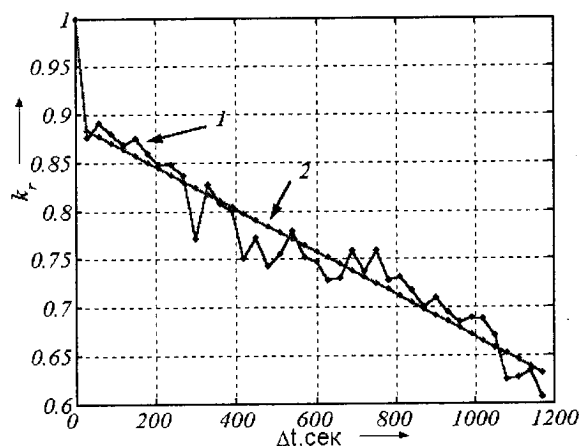


Рис. 3. Усредненная зависимость коэффициента корреляции (кривая 1) между столбцами матрицы выборки эхограммы (рис.1) и аппроксимирующая функция – 2.
Ср. кв. откл. $\sigma_k \cong 2\%$

Как следует из анализа эхограммы, приведенной на рис. 1, верхняя граница эхо-сигнала флуктуирует с периодом гравитационной волны. Период этой волны примем в качестве третьего информативного признака рассматриваемой эхограммы. Для получения этого периода выделим программно из анализируемого массива область верхней границы эхо-сигналов, компенсируя при этом тренд изменения высоты. Толщину слоя, в пределах которого наблюдается исследуемая флуктуация, оценим из рис. 2 и примем равной 20 м.

На рис. 4 приведено трехмерное изображение полученного слоя верхней границы инверсии температуры. Из его анализа следует, что периодические осцилляции явно различимы. Для количественной оценки периода этих осцилляций применим автокорреляционный анализ фрагмента строк исходной матрицы в пределах выделенного интервала высоты от 60 до 80 м, относящихся к выделенному фрагменту. На рис. 5 приведен график семейства этих строк, а на рис. 6 — их усредненная автокорреляционная функция.

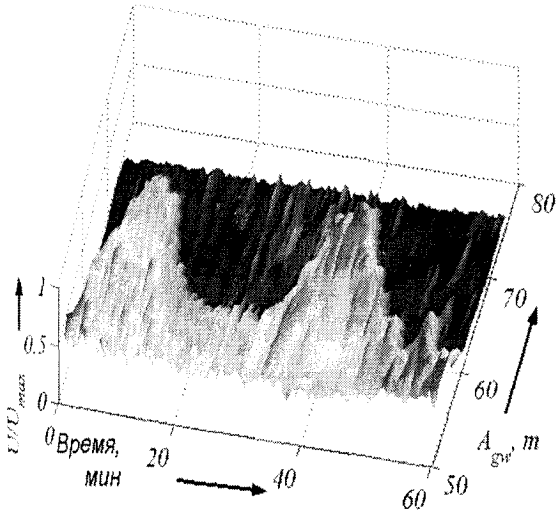


Рис. 4. Гравитационная волна на верхней границе инверсии температуры. Выделено из эхограммы рис. 2

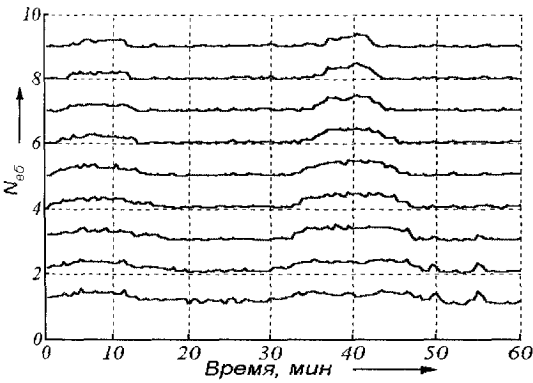


Рис. 5. Семейство выборок фрагментов профилей эхо-сигнала в области верхней границы слоя инверсии температуры

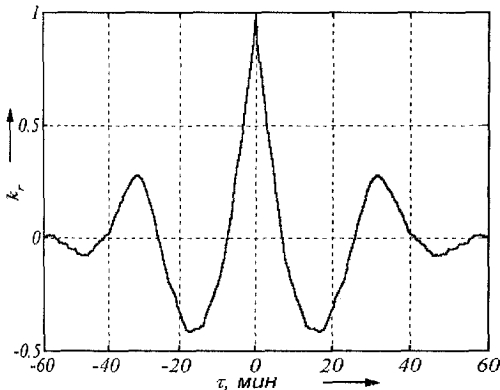


Рис. 6. Усредненная автокорреляционная функция фрагментов профилей эхо-сигналов в области верхней границы температурного инверсионного слоя

Как следует из графика рис. 6 период гравитационной волны в данном случае оценивается величиной порядка 30 мин.

По мере прогрева подстилающей поверхности высота верхней границы инверсионного слоя начинает увеличиваться, и на профилях рис. 2 в его нижней части становится все более различимой слоистая структура эхо-сигнала, вертикальный масштаб которой, по-видимому, увеличивается с увеличением высоты температурной инверсии. Эту особенность усредненного профиля эхо-сигнала будем рассматривать как следующий информативный признак эхограммы устойчиво стратифицированного слоя АПС. Проанализируем возможность выявления, выделения и измерения периода этих волн. Как следует из рис. 2, профили, даже усредненные по последовательно полученным блокам продолжительностью 20 мин, содержат низкочастотные флуктуации значительной амплитуды. Высота устойчиво стратифицированного слоя изменяется примерно в два раза, при этом усредненная амплитуда эхо-сигнала примерно в 1,7 раза. Поэтому для выявления вертикальной волны эхо-сигнала рассмотрим функции приращений значений эхо-сигналов в профиле на некотором шаге высоты. В данном случае элементарный шаг высоты составит $\Delta h \approx 0,0125$ м. Поэтому функции приращений рассчитаем для шага $\Delta H = 10\Delta h = 0,125$ м. На рис. 7 приведены три такие функции, рассчитанные для выделенных блоков данных. Так как нас интересует только форма зависимостей, то на этих графиках по оси "у" отложены приращения относительной (безразмерной) амплитуды, использованной при построении графиков рис. 2. Цифрами указаны номера блоков данных, по которым построены усредненные профили рис. 2. Интересно отметить, что высота верхней границы на этих зависимостях имеет явно различимые отметки в виде всплесков амплитуды, на которые указывают стрелки. Автокорреляционные функции зависимостей рис. 7 приведены на рис. 8, из которых следует, что факт возникновения мелкомасштабной слоистой структуры в устойчиво стратифицированном слое может быть идентифицирован путем анализа эхограмм акустического зондирования.

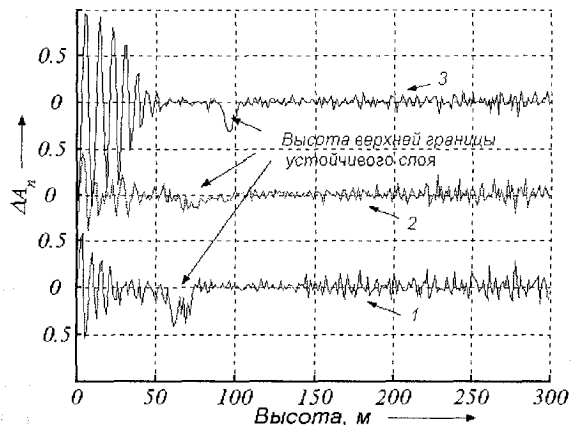


Рис. 7. Нормированные функции приращений усредненных профилей эхо-сигналов (рис. 2) для трех выделенных блоков данных

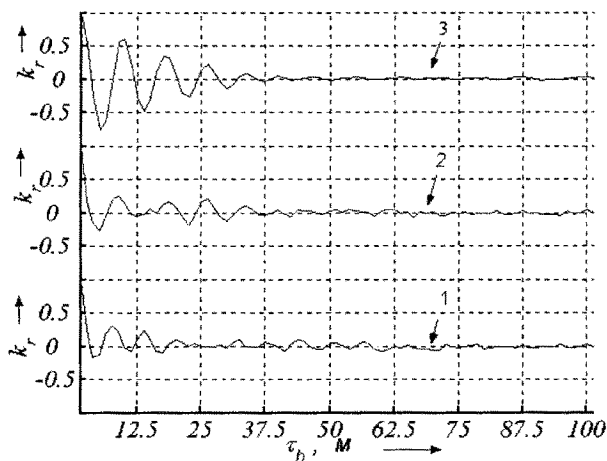


Рис. 8. Нормированные автокорреляционные функции зависимостей, приведенных на рис. 7

С целью наиболее полного описания эхограммы целесообразно рассмотреть гистограммы распределения статистической вероятности P^* безразмерной амплитуды эхо-сигналов: $A_x = U/U_{max}$. Учитывая структурные особенности исследуемой эхограммы (рис. 1), разобьем соответствующую ей матрицу данных на три подмассива по высоте и сформируем три блока данных, каждый из которых содержит все столбцы (всего 1200 столбцов на интервале времени один час) матрицы-выборки, а строки распределим следующим образом: первый блок содержит строки, соответствующие интервалу высоты от 21 до 50 м — данные внутри слоя инверсии, второй — от 51 до 80 м — эхо-сигналы переходного слоя, включая область изменяющейся высоты, третий — от 81 до 110 м — сигналы, обусловленные акустическими помехами. На рис. 9–11 представлены соответствующие гистограммы распределений статистических вероятностей.

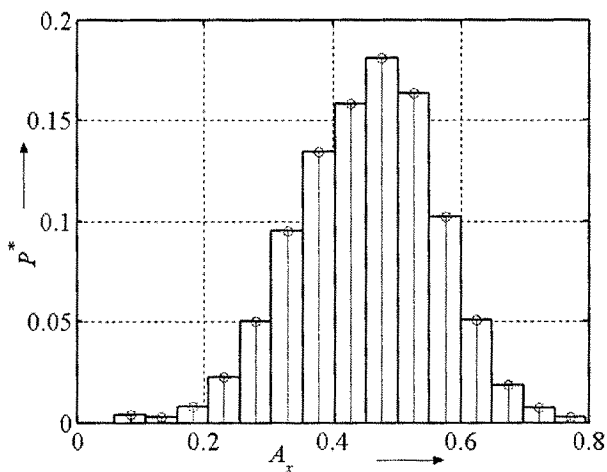


Рис. 9. Распределение статистической вероятности относительной амплитуды акустических эхо-сигналов, полученных в устойчиво стратифицированном слое АПС

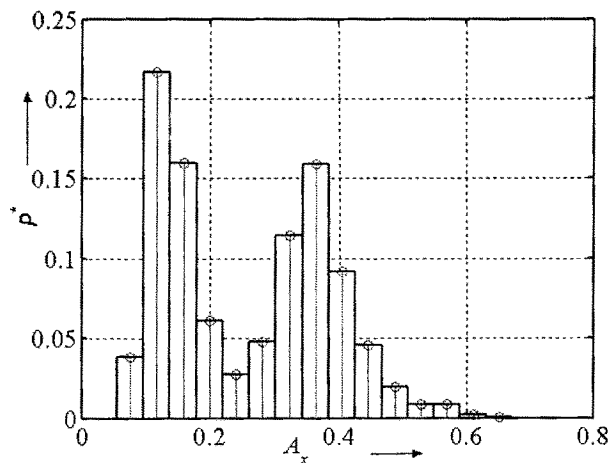


Рис. 10. Распределение статистической вероятности относительной амплитуды акустических эхо-сигналов в промежуточном слое эхограммы (рис. 1)

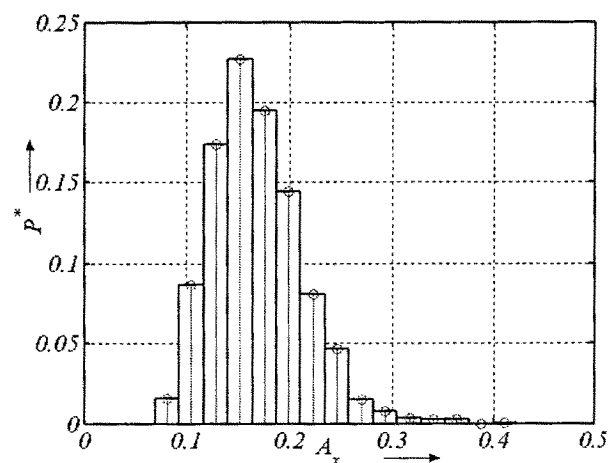


Рис. 11. Распределение статистической вероятности относительной амплитуды акустических помех в слое над инверсией температуры

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы рассмотрели типичную эхограмму для устойчивого термодинамического состояния в АПС с тенденцией к его трансформации в тепловую конвекцию.

Гравитационная волна и тренд высоты устойчиво стратифицированного слоя — известные атрибуты устойчивости. Мы хотели выяснить, удастся ли из эхограммы выделить эту волну и оценить ее параметры — период и амплитуду. Мы показали, что корреляционный анализ позволяет это сделать. Слоистую структуру устойчиво стратифицированного слоя АПС также оказалось возможным выделить и оценить ее параметры.

Корреляционная связь профилей в пределах выделенных блоков следует из статистической однородности процесса выхолаживания при устойчивой стратификации. Следовательно, величина коэффициента корреляции в данном случае может рассматриваться как признак эхограммы. Этот признак це

лесообразно использовать также и в связи с тем, что при конвективном режиме эта корреляционная связь между профилями эхо-сигналов будет практически отсутствовать

Так как в данном случае информативные признаки получены в виде функций, то в дальнейшем необходимо направить усилия на исследование и разработку методов параметризации этих функций, а также на разработку правил их использования как системы информативных признаков при классификации эхограмм акустического зондирования АПС.

Таким образом, в результате проведенного анализа показано, что эхограммы, полученные акустическим зондированием устойчивого термодинамического состояния (температурных инверсий) в АПС могут быть идентифицированы с помощью разработанной системы информативных признаков. Дальнейшая формализация процедуры анализа эхограмм путем расчета количественных значений информативных признаков даст возможность автоматизировать процесс анализа, который до настоящего времени ограничивался только визуальным исследованием записей акустических эхо-сигналов. Автоматизация анализа в данном случае приводит к возможности получать качественно новые результаты за счет систематической обработки больших объемов данных. К таким результатам относится расширение перечня идентифицируемых классов термодинамических состояний и разработка на этой основе новых, а также усовершенствование известных моделей АПС, что невозможно сделать на базе только аэрологического зондирования.

Потенциальными потребителями системы дистанционного мониторинга термодинамического состояния АПС являются: предприятия, производящие плановые выбросы загрязняющих веществ в АПС; предприятия с повышенной опасностью аварийных выбросов; организации, контролирующие уровень загрязнения; аэропорты и службы контроля за воздушным движением.

Литература. 1. Леонидов В.И., Кивва Ф.В. Прогнозирование вертикальных профилей коэффициента преломления воздуха над океаном по данным дистанционного акустического зондирования // Физические исследования с использованием радиоволн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов: Сборник научных трудов ИРЭ АН Украины. — Харьков, 1991 г. — С. 103–111. 2. Леонидов В.И., Кивва Ф.В., Алехин В.И. Некоторые особенности формирования волноводных структур над морской поверхностью // Научное приборостроение в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах волн: Сборник научных трудов. ИРЭ АН Украины. — Харьков, 1992 г. — С. 73–80. 3. Б.В. Дзюндзюк, В.И. Леонидов. Система контроля загрязнения атмосферы вредными выбросами // Теория и техника передачи, приема и обработки информации. 2-я Международная конференция: Тез. докл. Часть 2. — Харьков—Туапсе, 17–19 сентября 1996 г. 4. Борзенков Б.И., Леонидов В.И., Малюк В.Г. Система оперативного контроля экологии воздушного бассейна промышленного района // Теория и техника передачи, приема и обработки информации. 4-я Международная конференция: Сборник научных трудов. — Харьков—Туапсе, 28–30 сентября 1998 г. 5. Борзенков Б.И., Малюк В.Г., Леонидов В.И., Ключка Р.В. Аппроксимация функции рас-

пределения приземной концентрации примеси // Вопросы проектирования, эксплуатации технических систем в металлургии, машиностроении, строительстве: Труды международной научно-технической конференции. — Старый Оскол, 15–16 сентября 1999 г. Часть I. — С. 29–31. 6. Борзенков Б.И., Малюк В.Г., Леонидов В.И., Ключка Р.В. Прогнозирование распространения загрязнений в атмосфере // Вопросы проектирования, эксплуатации технических систем в металлургии, машиностроении, строительстве: Труды международной научно-технической конференции. — Старый Оскол, 15–16 сентября 1999 г. Часть I. — С. 35. 7. Леонидов В.И., Сидоров Г.И. Автоматизация классификации амплитудно-временных структур эхо-сигналов в системах акустического зондирования пограничного слоя атмосферы // Радиотехника. — № 137. — 2004. — С. 123–129. 8. Леонидов В.И., Сидоров Г.И. Автоматизация анализа данных в системах акустического зондирования пограничного слоя атмосферы: Материалы III Международной научно-практической конференции «Динамика научных исследований '2004», 21–30 июня 2004 г. Том 33. Экология. — Днепропетровськ. — Наука і освіта, 2004. — С. 44–45. 9. Леонидов В.И., Сидоров Г.И. Идентификация и оценка параметров конвективных слоев пограничного слоя атмосферы с помощью систем дистанционного акустического зондирования // Сборник тезисов докладов по материалам 10-й Юбилейной международной конференции «Теория и техника передачи, приема и обработки информации». Часть 1. 28 сентября – 1 октября 2004 г. — Харьков—Туапсе, 2004. — С. 261–262. 10. Леонидов В.И. Анализ методики комплексного радиоакустического и акустического зондирования пограничного слоя атмосферы // Прикладная радиоэлектроника. Том 3, № 3, 2004. — С. 22–26. 11. Brown E.H., Holl F.F. Advances in atmospheric acoustics // Rev. Geophys. Space Phys. 1978 — Vol. 16, № 1. — P. 47–110. 12. Каллистратова М.А., Карюкин Г.А. Исследование вертикальной структуры флуктуаций показателя преломления методом акустического зондирования. Астроклимат и эффект. телескопов: Тр. Всес. Конф. РГ Астроклимат астросовета АН СССР. — Абастумани, 23–26 ноября 1981 г. Вып. 6. — С. 90–93. 13. F. Beyrich, D. Engelbart et al. Towards the «Lindenberg Column – simultaneous measurements of vertical profiling systems // Ext. abstracts of PWS-97, Engelberg, Germany. — 1997. — P. 320–323. 14. R.L. Coulter. «Remote sensing of micrometeorological quantities». Proceedings of the 11th International Symposium on Acoustic Remote Sensing and Associated Techniques of the atmosphere and Oceans. 24–28 June 2002, Rome, Italy, P. 321–327.

Поступила в редколлегию 15.08.2005



Семенец Валерий Васильевич, доктор технических наук, профессор, проректор ХНУРЭ. Область научных интересов: системы автоматизированного проектирования.



Леонидов Владимир Иванович, заведующий ПНИЛ ХНУРЭ. Область научных интересов: автоматизация анализа электрических сигналов методами распознавания образов в экологии и медицине.