

Технические средства для исследования приземной атмосферы и распространения звуковых волн

Н.П. Красненко^{1,2}, А.Н. Кудрявцев^{1,3}, Д.С. Раков¹, П.Г. Стафеев^{1,2*}

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634021, г. Томск, пр. Академический, 10/3

²Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40

³Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 7.10.2011 г.

Описаны созданные в ИМКЭС СО РАН аппаратно-программные акустические комплексы для измерения параметров атмосферного пограничного слоя и исследования приземного распространения звуковых волн. Они включают средства локального и дистанционного акустического зондирования параметров атмосферы, а также мощные излучающие и приемные средства. Созданные комплексы дают широкие возможности в области исследований атмосферного пограничного слоя, приземного распространения звуковых волн, а также радио- и оптических волн.

Ключевые слова: акустическое зондирование атмосферы, содар, атмосферный пограничный слой, аппаратно-программные акустические комплексы, распространение звуковых волн; acoustic sounding of the atmosphere, sodar, atmospheric boundary layer, hardware and software of acoustic complexes, propagation of acoustic waves.

Введение

Исследования атмосферного пограничного слоя (АПС) и распространения волн различной природы (звуковых, оптических, радио) в приземной атмосфере требуют оперативного получения информации о структуре и пространственно-временной изменчивости АПС [1–4]. Для решения данной задачи используются как локальные, так и дистанционные методы и средства измерений различных параметров атмосферы.

Проблемы создания современной экспериментальной базы для проведения исследований приземной атмосферы и распространения волн чрезвычайно актуальны [1–4]. С одной стороны, при решении ряда задач фундаментального и прикладного характера требуется проведение непрерывных измерений (мониторинг) многочисленных параметров атмосферы в различных погодных условиях, в различные сезоны года и время суток. С другой стороны, при проведении научных исследований всегда ощущается недостаток кадров и желательна автоматическая работа приборов при наборе большего количества данных. Важную роль здесь приобретают и технические решения, обеспечивающие такие непрерывные автоматические измерения. Воз-

никает необходимость и в дистанционности измерений. Исследования и разработки, проведенные нами в последнее десятилетие, привели к созданию достаточно надежных и удобных метеорологических измерителей, использующих акустические методы.

В настоящей статье приведено описание созданных аппаратно-программных акустических комплексов для измерения параметров АПС и исследования приземного распространения звуковых волн. На характеристики распространяющейся волны помимо самой атмосферы влияют еще и свойства подстилающей поверхности (тип поверхности, топография местности) [1, 4]. Решение этих задач требует измерения большого числа характеристик канала распространения волн и набора экспериментальных данных в различных, изменяющихся условиях проведения опытов (метеорологические условия, подстилающая поверхность) с целью выявления статистических закономерностей.

Описание технических средств

На основе разработанных ультразвуковых метеорологических комплексов и акустического локализатора [4–10] на полигонах Института мониторинга климатических и экологических систем и Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники были созданы исследовательские стенды для контроля метеорологических пара-

* Николай Петрович Красненко (krasnenko@imces.ru); Андрей Николаевич Кудрявцев; Денис Сергеевич Раков; Павел Георгиевич Стафеев.

метров и турбулентных характеристик АПС и для исследования приземного распространения звуковых волн. Стенды обеспечивают проведение экспериментальных исследований атмосферного пограничного слоя и распространения волн (состав и структурная схема стенда приведены на рис. 1 и 2).

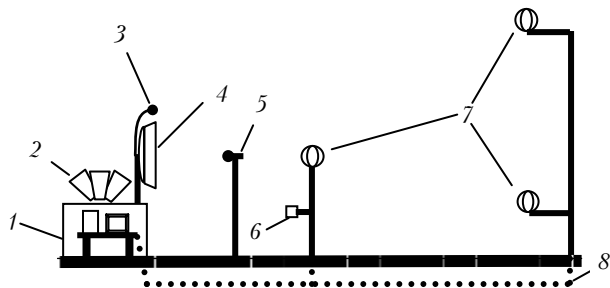


Рис. 1. Стенд для контроля метеорологических и турбулентных характеристик атмосферы и исследования приземного распространения звуковых волн: 1 – операторская; 2 – акустический локатор; 3 – точечный излучатель звука тросового измерителя; 4 – акустическая излучающая антенна; 5 – микрофон опорного измерителя уровня звука; 6 – датчики давления и влажности ультразвукового метеоконкомплекса; 7 – ультразвуковые головки метеоконкомплексов (слева на мачте высотой 5 м и справа на двух уровнях на 10-метровой мачте); 8 – устройство связи и кабельная сеть

Поскольку нижний слой атмосферы характеризуется наибольшей изменчивостью, то для обеспечения текущей метеорологической информацией о характеристиках этого слоя наряду с локальными метеоизмерителями используются и акустические

измерители параметров атмосферы, такие как содар [8] и ультразвуковые метеостанции [6, 7], позволяющие с высокой оперативностью определять характеристики атмосферы.

Ультразвуковая метеорологическая станция [5–7] представляет собой устройство для измерения, сбора, обработки и хранения метеорологических, турбулентных и статистических параметров атмосферы и состоит из следующих частей:

- трех ультразвуковых головок (датчиков);
- датчиков давления и влажности;
- устройства связи;
- персонального компьютера (ПК) с программным обеспечением (ПО).

Ультразвуковые датчики предназначены для безынерционного измерения скорости и направления ветра в трех ортогональных координатах, а также одновременного определения температуры воздуха. Ближний к операторской ультразвуковой датчик находится на мачте высотой 5 м на удалении 50 м, дальние расположены на мачте (см. рис. 2) на высотах 2 и 10 м соответственно и удалены на расстояние 200 м. В качестве дополнительных локальных средств измерения метеорологических параметров используются стандартные промышленные датчики давления и влажности.

Устройство связи [9] предназначено для подключения приборов, имеющих последовательный интерфейс типа RS-232 (до 4 приборов к одному блоку), организации связи нескольких блоков по последовательному каналу RS-485 на расстоянии до 1000 м, буферизации принимаемых блоков информации, организации обмена информацией с ЭВМ по COM-порту.

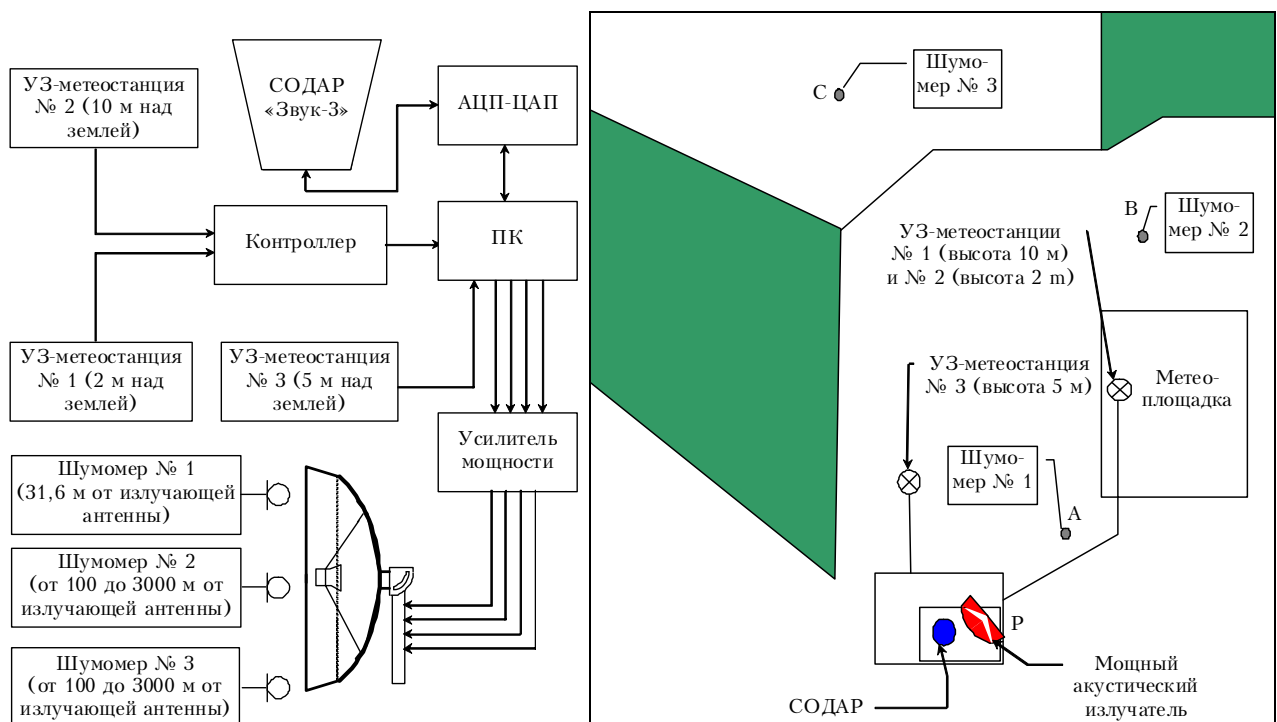


Рис. 2. Структурная схема стенда и карта размещения составных частей на местности полигона

Программное обеспечение метеорологического комплекса предназначено для обработки, хранения и отображения измеряемых данных, а также для вычисления турбулентных параметров атмосферы.

Помимо стандартных метеорологических параметров, определяются такие параметры турбулентности, как полная энергия турбулентных движений, потоки импульса, тепла, масштабы ветра, температуры, Мони́на–Обухова и др., а также их статистические характеристики.

Через устройство связи и кабельную сеть данные с ультразвуковых датчиков и датчиков давления и влажности поступают на вход персонального компьютера, где производится их дальнейшая обработка. На основе поступивших данных определяются текущие значения скорости и направления ветра в трех ортогональных координатах, а также температуры воздуха в трех точках пространства, давления и влажности воздуха. При этом диапазон измерений скорости ветра составляет 0–40 м/с с погрешностью измерения $\pm 0,1$ м/с, направления ветра 0–360° с погрешностью $\pm 2^\circ$, температуры воздуха –40 ... +40 °С с погрешностью $\pm 0,1$ °С.

Моноста́тический средневысо́кочастотный акустический ло́катор «Звук-3» [8] предназначен для измерения атмосферной стратификации, высоты слоя перемешивания, высоты и мощности инверсии, профилей вертикальной скорости ветра

и структурной постоянной C_T^2 в нижнем слое атмосферы. Пространственное разрешение локатора составляет 25 м. Высота зондирования – до 500 м. Обмен данными с компьютером осуществляется через контроллер АЦП-ЦАП.

Точечный излучатель звука предназначен для измерения структурной постоянной акустического показателя преломления C_n^2 косвенным базовым методом путем определения флуктуаций амплитуды непрерывного сигнала относительно среднего значения.

Перечень измеряемых характеристик атмосферы приведен в таблице. Вся аппаратура (за исключением устройства связи) расположена в операторской, где осуществляются регистрация и обработка результатов измерений.

Дополнительно для измерения профилей температуры и влажности до высоты 150 м на полигоне используется привязной аэростат. Для него С.А. Кураковым был разработан автономный измеритель температуры и влажности воздуха (АИПТ). Он прикреплялся к воздушному шару и при запусках регистрировал и накапливал данные по температуре и влажности воздуха. Измеритель состоит из блока регистратора и зонда с датчиком температуры и влажности воздуха. Сбор данных с АИПТ и установление параметров выполнения измерений производятся через кабель/модем, подключаемый к USB-порту компьютера.

Измеряемые характеристики атмосферы

Измеритель	Характеристика
Двухуровневый ультразвуковой метеорологический комплекс (высота расположения датчиков 2 и 10 м)	температура воздуха скорость и направление ветра масштаб Мони́на–Обухова структурная постоянная флуктуаций температуры C_T^2 структурная постоянная флуктуаций скорости ветра C_V^2 структурная постоянная флуктуаций акустического показателя преломления C_n^2 градиенты температуры, определяемые по данным отдельных измерителей градиент температуры в слое от 2 до 10 м $\Delta T/\Delta H = (T_{10} - T_2)/8$, определяемый по усредненным данным на отдельных уровнях измерения
Ультразвуковой метеорологический комплекс (высота расположения датчиков 5 м)	температура воздуха скорость и направление ветра масштаб Мони́на–Обухова структурная постоянная флуктуаций температуры C_T^2 структурная постоянная флуктуаций скорости ветра C_V^2 структурная постоянная флуктуаций акустического показателя преломления C_n^2 градиент температуры
Трассовый измеритель	структурная постоянная флуктуаций акустического показателя преломления C_n^2 на высоте 7,2 м над землей (на оси излучающей антенны, по направлению трассы распространения звука, на расстоянии 30–40 м)
Акустический локатор	тип стратификации атмосферы в слое 0–200 м качественный ход профиля температуры (знак градиента температуры) в слое 0–200 м; профиль структурной постоянной флуктуаций температуры C_T^2

Основные характеристики АИПТ:

Диапазон измеряемых температур	-40...+50 °C
Абсолютная погрешность измерения температуры	±0,1 °C
Диапазон измеряемой относительной влажности воздуха	0–100 %
Устанавливаемый период измерения	от 2 с до 12 ч
Напряжение питания	3,0–3,6 В
Объем энергонезависимой памяти	2 Мбайт (1000000 измерений)

Запуск аэростата и пример результата аэростатного зондирования показаны на рис. 3 и 4.

Для непосредственного проведения натурных исследований по распространению звука используется соответствующее аппаратно-программное обеспечение – излучающая и приемная (регистрирующая) аппаратура (исследовательские стенды).

Создание и использование мобильных систем для проведения таких исследований весьма трудоемки и дороги и возможны только в рамках эпизодических экспедиционных работ. Поэтому желательно иметь постоянную экспериментальную базу с разными типами подстилающей поверхности (орографией местности) в разных азимутальных направлениях и возможностью проведения исследований в различные времена года с изменяющимися метеорологическими условиями и подстилающими поверхностями. Желательно создание достаточно мощных направленных акустических излучающих систем для увеличения дальности распространения волн. Наиболее перспективным является использование многоэлементных антенных решеток из отдельных рупорных излучателей [10], что позволяет

повышать излучаемую звуковую мощность за счет увеличения количества элементов решетки, а также реализовать требуемую ширину диаграммы направленности и малый уровень боковых лепестков. Однако антенные решетки дороги для научных исследований.



Рис. 3. Аэростат с привязным АИПТ

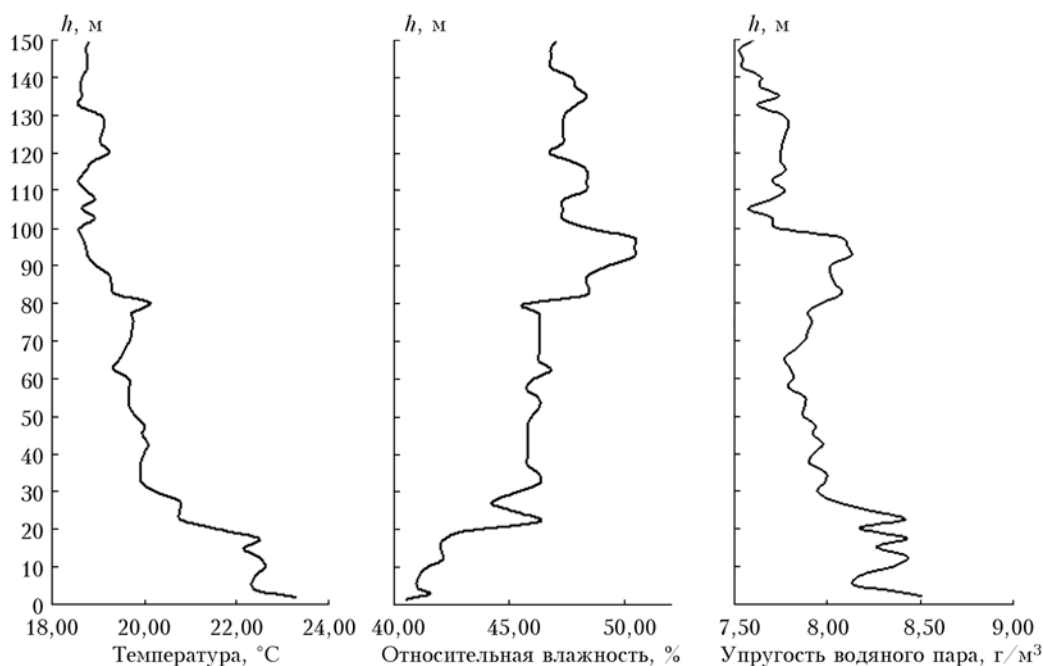


Рис. 4. Результат одного из запусков аэростата 27.08.2010 г.: профили температуры и влажности воздуха до высоты 150 м (вертикальная ось)

С помощью созданного акустического стенда решаются следующие задачи:

- генерация и излучение акустических волн большой мощности (электрическая мощность излучающей системы 1000–1200 Вт);
 - работа в импульсном и непрерывном режимах;
 - обеспечение генерации и формирования звуковых сигналов при помощи персонального компьютера со звуковой картой;
 - калибровка звукового давления излучаемого сигнала в дальней зоне (мачта с микрофоном на дистанции 20–30 м от излучающей стационарной антенны);
 - исследование приземного распространения звуковых волн в различных условиях при помощи трассовых измерителей звукового давления (2 шт. на дистанции 1–3 км);
 - отработка алгоритмов прогнозирования приземного распространения акустических волн на различных дальностях в зависимости от метеорологических условий, характеристик подстилающей поверхности и др.;
 - проверка точности прогнозов уровня звука.
- В состав стенда входят (см. рис. 1 и 2):
- мощная излучающая антенна (защищенная зеркальная или антенная решетка);
 - трассовые измерители уровня звукового давления;
 - компьютер с устройством сбора данных от различных комплексов, а также программным обеспечением для генерации звуковых волн.

В стационарном варианте на полигоне использовалась излучающая зеркально-параболическая антенна диаметром 1,5 м с защитной блендой. Для увеличения мощности излучения был применен многоголовочный (на 4 акустические головки) рупорный облучатель. Внешний вид антенны и ее характеристики направленности даны на рис. 5.

На рис. 5, б, в приведены диаграммы направленности защищенной антенны и уровни минус 3 дБ, характеризующие ширину диаграммы направленности антенны стенда на частотах от 1000 до 8000 Гц.

Рекомендуемая высота защиты и радиус апертуры лежат в диапазонах: $H = (0,2-3,3)\lambda$, где H – высота звукозащитной бленды; λ – длина волны; $R_{Smax} = (1,2-2,4)\lambda$; R_{Smax} – радиус верхней (излучающей) апертуры защищенной антенны. Расчет бленды для частоты 1000 Гц с учетом характеристики направленности рупора, затенения раскрыва, уровня амплитуды поля на краю апертуры зеркала дал следующие параметры: $H = 1,45\lambda$ и $R_{Smax} = 2,82\lambda$. Отсюда высота звукозащитной бленды была взята 0,5 м, диаметр верхней апертуры – 1,95 м.

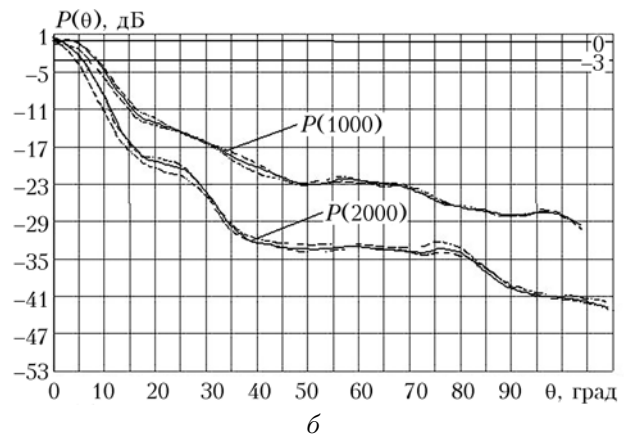
Как видно из рис. 5, ширины диаграммы направленности для частот от 1000 до 8000 Гц составили от 16 до 6°. Уровни боковых лепестков:

- в секторе от 30 до 60° от минус 20 (для 1000 Гц) до минус 35 дБ (для 8000 Гц);
- в секторе от 60 до 90° от минус 25 (для 1000 Гц) до минус 38 дБ (для 8000 Гц);

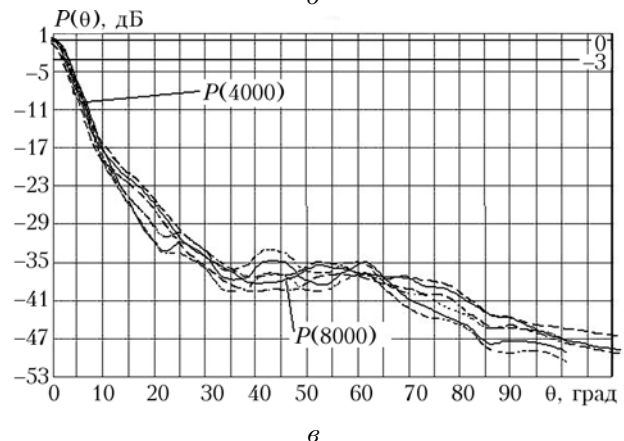
– в направлении 90° от минус 28 (для 1000 Гц) до минус 48 дБ (для 4000 Гц). Антенна обеспечивала максимальный уровень звукового давления 151 дБ.



а



б



в

Рис. 5. Внешний вид антенной системы стенда (а) и ее диаграммы направленности для частот 1000, 2000 (б) и 4000 и 8000 Гц (в)

Программное обеспечение стенда позволяет формировать сигналы звуковой частоты на компьютере и генерировать их с помощью высококачественной 4-канальной звуковой карты. Сигнал представляет собой либо непрерывный тональный сигнал, либо пачку импульсов произвольной формы

(для исследования прохождения импульсно-модулированных сигналов) различной частоты в диапазоне от 20 до 20 000 Гц, либо шумовой сигнал (белый шум). Затем сигнал усиливается при помощи 4-канального усилителя мощности и посредством антенной системы излучается в атмосферу.

Другой вариант акустического стенда для проведения исследований распространения звука в приземном слое атмосферы включает в себя мобильную акустическую антенную решетку [10] (рис. 6), блок управления с программным обеспечением, блок измерения метеорологических параметров (давления, температуры и влажности воздуха) и два направленных микрофона (рис. 7).



Рис. 6. Внешний вид мобильной излучающей системы акустического стенда в развернутом положении

Характеристики мобильного акустического стенда приведены ниже (тип излучающей системы – антенная решетка).

Ширина диаграммы направленности на частоте 2 кГц	10°
Количество элементов	40 шт.
Частотный диапазон	2–8 кГц
	Ограничен электроникой
Максимальное звуковое давление на частоте 2 кГц	145 дБ
Кол-во усилительных модулей	40 шт. Индивидуальные усилители для каждого излучающего элемента
Блок управления:	
компьютер	1 шт.
программное обеспечение	Специально разработанное ПО
Дополнительные параметры:	
напряжение питания	220 (12) В
рабочий температурный диапазон	– 30 ... +40°



Рис. 7. Направленный микрофон с параболическим зеркалом диаметром 32 см

Направленные микрофоны, входящие в состав акустического стенда, изготовлены на основе параболического зеркала диаметром 32 см и прикрепленной к нему ручки, внутри которой расположена электронная часть микрофона. Также на корпусе имеются разъемы для подключения головного телефона или соединительного кабеля с линейным входом в компьютер. Основные характеристики микрофона приведены ниже, внешний вид показан на рис. 7.

Антенная система микрофона:

диаметр зеркала	0,32 м
фокус параболического зеркала	0,13 м
глубина параболического зеркала	0,05 м

Электронная часть микрофона:

напряжение питания	9 В
полоса частот	300–3500 Гц
чувствительность	48 мВ/Па
коэффициент усиления	100 дБ

Акустические измерители (в данном случае шумомеры) позволяют осуществлять прием и измерение уровней звукового давления распространяющихся в атмосфере сигналов. Шумомеры позволяют производить измерения как непрерывных (или импульсных) тональных сигналов, так и спектра шумового сигнала. В случае приема непрерывного тонального сигнала шумомер измеряет среднюю, максимальную и минимальную величины звукового давления за время излучения этого сигнала. При регистрации импульсных сигналов в шумомере предусмотрен режим быстрых измерений с сохранением результатов в памяти и определением тех же величин сигнала, что и в предыдущем случае. Для случая, когда излучается шумовой сигнал, измеритель звукового давления производит измерение спектра шумового сигнала по октавной либо треть-октавной сетке частот.

Измерители расположены относительно излучающей антенны следующим образом. Первый измеритель находится на расстоянии 31,6 м (что соответствует дальней зоне излучающей антенны) и применяется для контроля и калибровки звукового давления сигнала до прохождения им исследуемой

трассы. Другие измерители звукового давления располагаются в различных точках трассы на расстояниях от 100 до 3000 м относительно излучающей антенны.

Шумомеры позволяют измерить минимальное, максимальное и среднее значения импульсных и непрерывных сигналов и спектральных составляющих шумового сигнала. Кроме того, сохраненные в памяти шумомера файлы данных при помощи связи с ПК и пакетов специального ПО фирмы «Брюль и Кьер» позволяют производить статистическую обработку измеренных данных и нанесение значений уровней звукового давления на карту местности.

Подстилающая поверхность полигона представляла собой по одной трассе – ровное поле с прямой дальностью видимости до расстояния 650 м и далее пересеченную местность, заросшую лесом, по другой трассе – закрытую ровную трассу с перелесками, невысокой застройкой и полями.

Заключение

Разработаны и реализованы исследовательские стенды, которые дают широкие возможности в области исследований атмосферного пограничного слоя, приземного распространения звуковых волн, а также радио- и оптических волн.

Следует отметить, что звуковые волны, обладающие слышимостью, малой скоростью распространения и соответственно наглядностью, помимо их использования в решении чисто научных задач, также являются очень удобными при обучении студентов.

Их применение в радиоэлектронных локационных системах позволяет отрабатывать навыки проектирования таких систем, начиная от антенн, передатчиков, приемников и кончая системами обработки информации (сигналов), как аналоговыми, так и цифровыми методами, а также изучать эффекты взаимодействия акустического излучения с атмосферой.

1. *Красненко Н.П.* Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя. Томск: Водолей, 2001. 278 с.
2. *Лукин В.П.* Особенности использования адаптивных оптических систем в атмосфере // Оптика атмосф. и океана. 1995. Т. 8, № 1–2. С. 280–290.
3. *Богомолов В.Ю., Богушевич А.Я., Гордов Е.П., Корольков В.А., Крупчатников В.Н., Тихомиров А.А.* Информационно-измерительная система для регионального мониторинга и прогноза опасных метеорологических явлений // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 1. С. 52–59.
4. *Красненко Н.П., Тихомиров А.А.* Технические средства и технологии дистанционного зондирования атмосферы и подстилающей поверхности // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15, № 1. С. 51–61.
5. *Тихомиров А.А.* Ультразвуковые анемометры и термометры для измерения пульсаций скорости ветра и температуры воздушных потоков: Обзор // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 7. С. 585–600.
6. *Азбукин А.А., Богушевич А.Я., Ильичевский В.С., Корольков В.А., Тихомиров А.А., Шелевой В.Д.* Автоматизированный ультразвуковой метеорологический комплекс АМК-03 // Метеорол. и гидрол. 2006. № 11. С. 89–97.
7. *Красненко Н.П., Стафеев П.Г.* Автоматизированный комплекс по измерению, сбору и обработке метеорологических данных от удаленных датчиков // Приборы и техн. эксперим. 2006. № 1. С. 160–162.
8. *Красненко Н.П., Кудрявцев А.Н., Мананко Е.Е., Стафеев П.Г.* Акустический локатор «Звук-3» для зондирования атмосферы // Приборы и техн. эксперим. 2006. № 6. С. 144–145.
9. *Галкин В.И., Красненко Н.П., Стафеев П.Г., Ушаков В.Г.* Гальванически развязанная система связи с удаленными датчиками // Приборы и техн. эксперим. 2005. № 5. С. 155–156.
10. *Красненко Н.П., Раков А.С., Сандуков Ц.Д.* Излучающие акустические антенные решетки для атмосферных приложений // Методы и устройства передачи и обработки информации: Межвуз. сб. науч. тр. Вып. 11 / Под ред. В.В. Ромашова, В.В. Булкина. М.: Радиотехника, 2009. С. 164–172. ISBN 978-5-88070-239-8.

N.P. Krasnenko, A.N. Kudryavtsev, D.S. Rakov, P.G. Stafeev. Hardware for investigation of the near-ground atmosphere and propagation of acoustic waves.

The paper describes the hardware and software of acoustic complexes developed at the IMCES SB RAS for measurements of the atmospheric boundary layer parameters and investigation of the near-ground propagation of acoustic waves. The complexes comprise systems of local measurements and remote acoustic sounding of the atmospheric parameters and high-power transmitters and receivers of acoustic radiation. They provide wide opportunities for investigations of the atmospheric boundary layer and near-ground propagation of acoustic waves together with radio and optical waves.