

**СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО
СЛОЯ С ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ
(МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ, НАИБОЛЕЕ ВАЖНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ)**

В нижней части тропосферы — атмосферном пограничном слое (АПС) происходит обмен количеством движения, теплотой и влагой между свободной атмосферой и подстилающей поверхностью. Большое влияние на процессы в АПС оказывают рельеф земной поверхности, радиационные и микроклиматические условия, а также процессы синоптического масштаба. В результате структура АПС, высота которого колеблется от 100 м до 2 км, может быть весьма разнообразной. Этим объясняется тот факт, что для описания такого жизненно важного слоя пока не существует универсальной теории. Вот почему при решении любых задач, связанных с процессами в АПС, возрастает роль экспериментальных исследований, позволяющих установить его реальные физические характеристики.

Наиболее важными характеристиками АПС являются распределение по вертикали и горизонтали основных метеопараметров, или метеовеличин (температуры и влажности воздуха, скорости и направления ветра, давления), а также особенности турбулентности. Последняя порождает пространственные и временные пульсации всех метеовеличин. Знание пространственно-временного характера изменения метеопараметров, процессов в АПС дает возможность объективно оценивать опасность загрязнения окружающей среды, влияние турбулентности на распространение радиоволн, влияние ветрового сдвига нижних уровней на летательные аппараты при взлете и посадке и т.д. Для исследования АПС применяются как контактные (прямые) методы, так и неконтактные (косвенные).

Контактные методы связаны с необходимостью подъема метеодатчиков, для которого используются метеобашни и метеомачты, радиозонды, аэростаты, планеры, самолеты, другие летательные аппараты. Метеобашни представляют собой дорогостоящие уникальные сооружения. Они позволяют определять пространственно-временные изменения метеопараметров лишь до высоты, ограниченной вертикальными размерами башни (обычно не более 300 м). Метеобашни и метеомачты дают возможность анализировать изменения метеовеличин на небольших

высотах, причем только в районах их установки. В местах, где такие сооружения отсутствуют, состояние АПС оценивают с помощью радиозондов, или метеодатчиков, в качестве носителей которых применяют аэростаты, планеры, шары-пилоты и т.п.

Прямые методы измерения метеовеличин далеко не всегда удовлетворяют потребностям практики, поскольку полученные с помощью таких методов данные носят дискретный пространственно-временной характер, что объясняется, в первую очередь, большими финансовыми затратами.

Необходимость в мониторинге (непрерывном контроле) атмосферы в интересах экологии, радиосвязи, радиолокации, авиации привела к созданию дистанционных неконтактных методов зондирования атмосферы. К числу устройств, реализующих последние, относятся радары, содары, системы радиоакустического зондирования, лидары, радиометры и др. В основном дистанционное зондирование пограничного слоя осуществляется с помощью радаров, содаров и систем радиоакустического зондирования. Поэтому ниже дается обзор современного состояния именно этой техники и результатов, достигнутых с ее помощью.

Радары

Использование радаров (радиолокаторов) для изучения атмосферы базируется на зависимости характеристик отраженного радиолокационного сигнала от состояния атмосферы. В импульсных радиолокаторах зондирующий импульс отражается от совокупности отражателей, заключенных в рассеивающем объеме, который ограничен пространственной протяженностью импульса и шириной диаграммы направленности радиолокатора. В качестве рассеивателей могут выступать "элементы" тех или иных метеобразований (дождь, облака, туманы, снег и т.п.). По статистическим характеристикам сигнала на выходе приемника радиолокатора можно судить о характере метеобразований [1]. В определенной мере можно сделать выводы и о распределении тех или иных метеопараметров (градиентах ветра, влажности и др.), а также об атмосферной турбулентности, порождающей отражения от "ясного неба" [2].

В последнее время в метеорологии широко используют доплеровские радиолокаторы для измерения профиля ветра. Их называют радиолокационными ветровыми профилометрами (РВП). Индивидуальные РВП или их сети почти при любой погоде обеспечивают непрерывные измерения, экономично и автоматически, с временным разрешением, необходимым для наблюдения за многими важными явлениями как синоптического масштаба, так и мезо- и меньших масштабов. РВП

позволяют измерять скорость ветра с погрешностью не более 1 м/с. Диапазон высот и разрешение обусловлены рабочей частотой и формой зондирующего сигнала. Выбор частотных диапазонов для РВП по просьбе Всемирной метеорологической организации (ВМО) взял на себя Международный союз коммуникаций (International Telecommunication Union — ITU). Его выводы таковы, что рабочие частоты для РВП должны быть следующими:

РВП с номинальными частотами, МГц:	Рабочие частоты, МГц:
50	40...80 (47...68)
400	440...450 (420...435; 438...450) 470...500
1000	904...928; 1235...1241; 1270...1295; 1300...1375

Цифры в скобках здесь соответствуют так называемым Общевропейским предложениям (European Common Proposal — ECP) [3].

Наиболее распространенные частоты, на которых сегодня работают РВП, близки к 50, 482, 915 и 1290 МГц. Для зондирования АПС применяют РВП с рабочей частотой не ниже 915 МГц, так как уже на частоте 500 МГц "мертвая зона" превышает 500 м, а разрешение по высоте, как правило, составляет не менее 150 м [4–6]. На практике же зачастую чрезвычайно важно знать ветровые характеристики на высотах ниже 500 м: например, в аэропортах — при решении задач взлета и посадки самолетов, в промышленных зонах — для исследования загрязнения воздуха в нижней части АПС [7]. Поэтому сегодняшние разработки направлены на уменьшение нижнего предела высоты и улучшение разрешающей способности. Примером может служить ветровой профилометр АПС NOAA (NP), работающий на частоте 915 МГц, — компактный мобильный радар, сконструированный для измерения ветра в нижней тропосфере с "мертвой зоной" не более 100 м и вертикальным разрешением до 60 м. Снижение "мертвой зоны" до 100 м и улучшение пространственного разрешения до 25 м достигается также за счет применения широкополосного радиолокатора метрового диапазона волн [8].

При исследовании АПС данные РВП применяются:

- в целях прогнозирования погоды (при использовании сетей РВП);
- для изучения динамической (пространственно-временной) структуры АПС;
- для обеспечения безопасности взлета и посадки самолетов, запуска и посадки космических аппаратов;

— в качестве входных данных при моделировании АПС.

РВП могут поставлять такую важную метеорологическую информацию, как высота конвективного слоя перемешивания, от которой в значительной степени зависит вертикальное распределение примеси [9]. С помощью РВП можно определять момент количества движения [10]. Они применяются для исследования озонового переноса в нижней тропосфере [11] и изучения гравитационных волн [12].

Среди проблем, с которыми сталкиваются сегодня пользователи РВП, ключевой остается обеспечение высококачественной обработки сигналов. Непрерывная эксплуатация различных РВП в течение ряда лет показала серьезные недостатки в этой области. Однако в последнее время здесь открылись новые возможности благодаря сравнительно дешевым мощным компьютерам.

Стоимость РВП, применяемых для изучения АПС (с рабочей частотой 900...1300 МГц), может составлять от 250 тыс. [13] до 2 млн долларов [14].

Содары

Принцип действия содара, или акустического локатора, основан на высокой степени взаимодействия звука с атмосферой, при котором акустические волны рассеиваются на естественных температурных и ветровых неоднородностях, образованных атмосферной турбулентностью. Чувствительность показателя преломления к изменениям температуры, влажности и скорости ветра для акустических волн в нижней атмосфере на несколько порядков превышает чувствительность этого параметра для волн радио- и оптического диапазонов.

Начало "содарной эре" было положено работой А.М. Обухова, где показана возможность определения спектра турбулентности по рассеянию звуковых волн [15]. Эта теория экспериментально подтверждена М.А. Каллистратовой [16]. Позднее, в 50–60-е гг. в США разрабатывался метод акустического зондирования (АЗ), проводились первые эксперименты по изучению турбулентности в приземном слое и нижней тропосфере. Первый содар был создан в Австралии в 1968 году. В 70–80-е гг. велась разработка методики исследования АПС методом акустического зондирования, определялись оптимальные частоты и мощности зондирования, разрабатывались шумозащитные устройства. Был начат серийный выпуск содаров, с помощью которых проводились качественные наблюдения за динамикой и структурой турбулизированных слоев АПС. Разработана методика количественного определения

вертикальных профилей скорости ветра доплеровским содаром. Были сделаны попытки определения с помощью содара температуры воздуха по задержке во времени прихода отраженного сигнала от двух смежных слоев атмосферы. Однако выяснилось, что на точность получения данных о температуре таким способом большое влияние оказывают ветер, акустический шум, рефракция звука, турбулентность [17].

Период с конца 80-х гг. и до настоящего времени характеризуется переходом к серийному выпуску акустических локаторов многими зарубежными фирмами, такими, как "Ксонтечинк" (США), "РЕМТЕК" (Франция), "Аэровайронмент" (США), "Метек" (Германия), "Сцинтек" (США). Некоторым из этих фирм удалось реализовать новые подходы к созданию содаров — применить содарные фазированные антенные решетки (ФАР), многочастотное зондирование и т.п. Например, содар FAS64, выпускаемый фирмой "Сцинтек", является первым представителем новой серии содаров с плоской ФАР. Имея небольшие размеры, он обеспечивает измерение трехмерных профилей скорости ветра и структуры турбулентности в деталях, недостижимых ранее при использовании многих больших содаров. Диапазон высот зондирования — от 15 до 1000 м с разрешением, достигающим 5 м. Содар работает одновременно на нескольких частотах (до десяти). Сигналы всех частот принимаются и оцениваются одновременно, в результате чего увеличивается отношение сигнал-шум, уменьшается необходимое время усреднения, улучшается вертикальное разрешение. Описываемый содар способен излучать и принимать сигналы под девятью различными углами. Одномоментно запуск звуковой посылки здесь может происходить в двух противоположных направлениях (например, по и против направления ветра). С целью уменьшить акустическое загрязнение населенных районов, причиной которого является значительное боковое излучение акустической антенны содара, фирма "Сцинтек" выпустила так называемый шепчущий содар (FAS64-SH), который производит гораздо меньше шума. Благодаря применению новой методики затенения удалось обойтись без использования громоздких механических укрытий. Согласно этой методике излучаемые отдельными передатчиками сигналы подстраиваются по амплитуде таким образом, чтобы интерференция приводила к максимальной мощности в главном лепестке диаграммы направленности содара и минимальной — в боковых [18].

При изучении тонкой структуры АПС повышаются требования к разрешающей способности содаров. Улучшение ее возможно посредством повышения частоты зондирования. Поэтому в последние годы появляются мини-содары, работающие на частотах, достигающих 5 кГц. Примерами

их служат: BOKU mini-sodar с четырехлучевой антенной системой [19]; серийный AV SODAR 4000 с 32-элементной ФАР, с помощью которой формируются три ортогональных луча, необходимых для измерения трехмерного профиля ветра на высотах 15 ... 200 м с разрешением 5 м [20].

Стоимость серийных содаров зависит от их конфигурации и рабочей частоты и, по зарубежным данным, может составлять 100...300 тыс. долларов для аппаратуры, работающей на частоте 1,2 ... 2,5 кГц [21], и 50...150 тыс. долларов для мини-содаров.

В СССР работы по акустическому зондированию начались в середине 70-х годов [17]. Первый содар был создан в Институте радиотехники и электроники (ИРЭ) АН СССР (Москва). Достоинствами этого содара являлись, в частности, малая потребляемая мощность, высокое разрешение по времени и по высоте. К числу первых можно отнести также акустические локаторы Института оптики атмосферы (ИОА) Сибирского отделения АН СССР (Томск), Института физики атмосферы АН СССР (Москва).

Первым содаром в Украине был акустический локатор "ИВА", разработанный в Харьковском институте радиоэлектроники (ХИРЭ), ныне ХТУРЭ. Он позволил получить характеристики турбулентности с заданных высотных уровней [22].

После того как содар ИРЭ был передан в ХИРЭ и модернизирован, что позволило повысить его помехозащищенность, а также визуализировать направление вертикальных потоков, он был использован для мониторинга АПС над Черноморским побережьем, в Харьковской области и в Подмосковье [23].

Рассмотрим теперь наиболее важные результаты, полученные с помощью содаров.

Отметим, что уже первые содарные данные показали перспективность этой техники. Как предсказал еще в 1969 г. К. Литтл [24], содары могут применяться для решения многих задач. К ним относится измерение до высот 1500 м следующих параметров:

- вертикальных профилей скорости и направления ветра (ветрового сдвига нижнего уровня);
- вертикальных профилей влажности (с помощью системы, работающей на нескольких частотах);
- высоты и интенсивности температурных инверсий;
- трехмерного спектра температурной неоднородности (моностатическим содаром);
- трехмерного спектра поля турбулентных скоростей; турбулентных потоков теплоты, количества движения и давления водяного пара.

К. Литтл тогда же предположил, что содары позволят: "визуализировать" структуру атмосферы, вызывающей отражение, посредством акустической голографии; исследовать рассеяние звука каплями облаков и осадками; определить влияние турбулентности в АПС на распространение электро-магнитных волн, а также решать проблемы загрязнения воздуха.

Опыт эксплуатации содаров в течение тридцати лет подтвердил, в значительной мере, прогнозы К. Литтла. При этом выяснилось, что существует две области применения, где содар не имеет себе равных: а) исследование процессов турбулентного перемешивания в АПС; б) изучение полей ветра и других параметров АПС над сложной подстилающей поверхностью и в труднодоступных местах (в горах, в прибрежных районах, на полярных станциях, в пустынях, а также над городскими застройками) [25].

С помощью содаров исследовались различные типы инверсий, бризы, туманы и точечные когерентные структуры в прибрежной полосе Индийского океана [26–28]. Быстрый рост индустриализации привел к тому, что остро встал вопрос о загрязнении атмосферы. В связи с этим, например, в горных районах Индии проводятся содарные исследования метеорологических параметров, связанных с загрязнением воздуха [29].

В результате многолетних исследований с помощью содаров, установленных в нескольких точках Москвы, получен интересный статистический материал о температурных инверсиях над этим мегаполисом [30].

В течение некоторого времени с помощью содара осуществлялся мониторинг АПС в Алма-Ате и Кемерове. Результаты убедительно показали, что акустическое зондирование является мощным инструментом текущего мониторинга атмосферных инверсионных слоев над городами, позволяя выявить ситуации, когда концентрация вредных воздушных примесей может возрастать во много раз. Теперь не вызывает сомнений целесообразность создания на основе акустического локатора систем оперативного прогнозирования неблагоприятных экологических ситуаций в крупных промышленных центрах.

Интересные и разносторонние результаты были получены благодаря многолетнему акустическому мониторингу АПС на северо-западе Черноморского побережья. По ним можно судить о связанных со сложной береговой линией особенностях структуры АПС в этом районе при прохождении атмосферных фронтов, при бризах, туманах, грозах и других метеорологических явлениях [31]. Были проанализированы виды и повторяемость приподнятых инверсий, обусловленные различными

причинами: действием местных ветров, адвективными (с моря) и радиационными туманами, проходящими через пункт зондирования атмосферными фронтами. Значительное внимание также уделено точечным отражениям на регистрирующих устройствах содара, превышающим по мощности эхо-сигналы, обусловленные флуктуациями температуры и влажности. По результатам многочисленных экспериментов были сделаны попытки определить природу точечных когерентных структур, ответственных за такие отражения на регистраторах содаров. Другими словами, требуется знать, что же фиксируется: атмосферные неоднородности или попавшие в поле акустической антенны биологические объекты? Несмотря на то что необходимы дополнительные исследования, можно считать установленной связь появления в исследуемом районе точечных когерентных структур с метеорологической и синоптической ситуацией [32–36].

Предприняты попытки получения двумерной картины турбулентности в приземном слое с помощью томографии [37] и трехмерных спектров мощности турбулентности в АПС [38].

Чтобы получить информацию о сдвигах ветра в нижней части АПС для обеспечения безопасности при взлете и посадке самолетов, содары внедрялись в систему метеобслуживания аэропортов [17].

В ходе эксплуатации содаров обнаружились некоторые проблемы. В первую очередь, выявилась повышенная чувствительность содаров к окружающему шуму, в связи с чем многочисленные попытки использовать их в аэропортах оказались не столь результативными, как ожидалось ранее. По этой причине иногда содары заменяют радиолокационными ветровыми профилометрами [7], которые, однако, не дают такой подробной, как содарная, информации о сдвигах ветра в нижнем 200...300-метровом слое.

В связи с тем что проблема отношения сигнал-шум при акустическом зондировании не теряет остроты, было предложено большое количество методик обработки отраженного акустического сигнала. Но зачастую они, "убирая" шум, ведут к потере полезной информации и тем самым полностью перекрывают путь к изучению тонкой структуры АПС. Поэтому в настоящее время в акустическом зондировании переходят к применению радиолокационных методов обработки сигналов. Так, исследуется возможность использования излучаемых сигналов сложной формы [39–41]. Однако эти разработки находятся пока на стадии численного моделирования и еще не проверены в реальных атмосферных условиях.

Системы радиоакустического зондирования

При радиоакустическом зондировании (РАЗ) в атмосферу излучаются акустические сигналы, которые создают неоднородности диэлектрической проницаемости воздуха. При облучении их радиоволнами часть волн от них отражается и через приемную радиоантенну попадает на вход приемника радиолокатора. Скорость распространения созданных звуком пространственных "решеток" в атмосфере зависит от температуры и скорости движения среды. Доплеровская частота принятых радиосигналов соответствует скорости распространения звуковой посылки. Поэтому по доплеровской частоте принятых радиоволн можно дистанционно, с поверхности земли восстановить профиль температуры воздуха.

Первые успешные измерения вертикального распределения температуры воздуха методом РАЗ атмосферы были осуществлены в 1969 г., когда Дж.Маршалл и др. (Стэнфордский университет, США) соединили источник звуковых волн (с частотой 85 Гц) и доплеровский радар, используемый для наблюдения за метеоритами. Успех первой системы РАЗ стимулировал в 70-е гг. развитие этого метода в нескольких странах (США, СССР, Италии, ФРГ, Швейцарии). Были разработаны радиоакустические системы разных конфигураций (моно- и бистатические), с различными формами электромагнитных и акустических сигналов (непрерывными и импульсными) и в разных диапазонах длин волн. Выбор того или иного диапазона, определяющий предельную дальность зондирования и пространственную разрешающую способность, зависит от конкретных геофизических задач. Так, созданные в США системы РАЗ на длинах радиоволн 8,1 и 0,68 м обеспечили удовлетворительную точность определения температуры на высотах 1400...3000 м и 200...1000 м соответственно [16]. Однако разрешающая способность этих систем РАЗ, отвечающая длине их рабочей волны, далека от удовлетворительной с точки зрения изучения тонкой структуры АПС.

Первая в СССР система РАЗ, функционирующая в дециметровом диапазоне, была разработана в ХИРЭ [42]. Позднее подобные системы были созданы в ИФА (длина волны 3 см) и в Воронежском заочном машиностроительном институте (ВЗМИ) совместно с ИФА (длина волны 30 см).

Остановимся подробнее на системе РАЗ ХИРЭ.

Авторы этой разработки поставили перед собой задачу исследовать возможности системы РАЗ по определению не только температурных профилей, но и профилей скорости и направления ветра, а также относительной влажности в нижней части АПС с разрешением 20...30 м. Было создано несколько методик определения скорости ветра по скорости

прохождения "отраженного пятна" через апертуру приемной радиоданной. По профилям температуры воздуха и скорости ветра вычислялись профили числа Ричардсона, позволившие количественно оценить стратификацию нижней части АПС. Предположение о возможности определения влажности воздуха было основано на различиях в зависимости интенсивности поглощения звука от влажности для двух разных частот (3,4 и 6,8 кГц). С этой целью система РАЗ была модернизирована для работы в двухчастотном режиме [43]. Сопоставление полученных с ее помощью данных о влажности с данными прямых (контактных) измерений показало, что в определенных метеорологических условиях результаты вполне согласуются. К сожалению, в связи с тяжелой экономической ситуацией в Украине дальнейшие работы по расширению возможностей определения влажности методом РАЗ пришлось прекратить. Тем не менее есть основания полагать, что дополнительная модернизация имеющейся системы и оснащение ее более мощным вычислительным устройством могут сделать реальным измерение влажности в нижней части АПС в широком диапазоне погодных условий.

С помощью системы РАЗ можно по амплитуде отраженного радиосигнала сделать заключение о динамике АПС [44], а на базе корректных данных о температуре, скорости и направлении ветра и влажности определить коэффициент турбулентной диффузии по методике, описанной в [45]. Последнее, в свою очередь, полезно для оценки дисперсии примеси при загрязнении атмосферы. Одним из применений аппаратуры РАЗ является использование ее выходных данных в качестве входных при моделировании АПС.

На сегодняшний день наиболее успешно технику РАЗ используют для измерения профилей температуры до высот, обусловленных рабочей частотой акустического излучателя, входящего в ее состав [46]. Погрешность измерения температуры составляет 0,5...1 К.

Работы в области радиоакустического зондирования атмосферы сегодня в основном направлены: на повышение точности определения температуры [47-51]; совершенствование аппаратуры мобильных систем РАЗ [52-54]; повышение быстродействия и точности РАЗ путем применения новых форм звукового зондирующего излучения [55].

Стоимость коммерческих систем РАЗ, составными частями которых являются СВЧ-радиолокаторы и источники звука, складывается из стоимости радиолокаторов и затрат в размере 50...100 тыс. долларов на остальное оборудование. Здесь необходимо иметь в виду, что радиолокаторы, используемые в системах РАЗ атмосферы, отличаются от радаров, служащих ветровыми профилометрами, тем, что для работы

радиолокатора РАЗ требуется энергетический потенциал примерно на 40 дБ ниже, чем для работы РВП. Это объясняется когерентной структурой искусственно созданных неоднородностей диэлектрической проницаемости, в отличие от некогерентных отражателей радиоизлучения при работе РВП, в связи с чем последние должны иметь большую мощность и приемную антенну гораздо большей площади. Соответственно, системы РАЗ имеют преимущества перед РВП по стоимости.

Комплексные системы

Каждый из перечисленных выше дистанционных методов зондирования АПС имеет те или иные ограничения. Поэтому целесообразно использовать комплексы аппаратуры, которые позволяли бы измерять одновременно несколько метеопараметров в широком диапазоне высот с достаточным разрешением и высокой точностью.

Например, при комплексировании содара с системой РАЗ данные о ветре, полученные с помощью содара, позволяют уточнить температурные данные, измеренные с помощью РАЗ. Значения последних определяются не только реальной температурой АПС, но и вертикальной составляющей ветра на высоте зондирования. В свою очередь, содарные данные о высоте инверсий могут уточняться по температурным профилям РАЗ [56].

Сегодня применяются комплексы, включающие в себя автономные системы РАЗ и ветровые профилометры (акустические или радиолокационные) [57], либо комплексы, в которых РАЗ атмосферы становится возможным в результате дооснащения РВП одним или несколькими источниками звука [58].

Для наиболее полного исследования АПС создают комплексы аппаратуры, в которых измерения проводятся в ряде частотных диапазонов и по разным методикам. В мире в настоящее время насчитывается несколько таких комплексных систем, включающих в себя контактную и неконтактную аппаратуру. В состав средств дистанционного неконтактного зондирования входят ветровые профилометры различных частот, системы РАЗ, содары, мини-содары, лидары, радиометры и спектрометры [59]. Одна из наиболее известных таких систем, находящаяся в Германии, получила название Линденбергская колонна. Она включает в себя следующие средства исследования атмосферы [60]: станцию радиозондирования (Vaisala RS-80); профилирующую систему на привязном баллоне (A.I.R. TMT-4a); ветровой профилометр АПС с системой РАЗ (LAP-3000, производства компании "Радиян"); трехантенный моностатический доплеровский содар (ECHO-1D); мини-

содар с фазированной решеткой (AV-4000, фирмы "Аэровайронмент"). С их помощью измеряются температурные и ветровые профили, по диапазону высот (от 15 до 1800 м или 5500 м) и по разрешению (от 5 до 200 м) дающие такую информацию о пограничном слое атмосферы, какую невозможно получить, используя только один из указанных методов. По содарным измерениям температурных флуктуаций и по измерениям (с помощью ветрового профилометра) флуктуаций ветра оцениваются высота пограничного слоя и высота зоны перемешивания.

Комплексные системы, подобные Линденбергской колонне, успешно используются также в Америке (NOAA), Австралии, Новой Зеландии. Например, в Новой Зеландии с помощью комплексной системы, включающей содар, мини-содар, систему РАЗ, дождевой профилометр и ультразвуковой спектрометр, оценивалось мезомасштабное влияние небольших возвышенностей на распределение ветра и осадков [61].

В странах СНГ в связи со сложной экономической ситуацией создание подобных комплексов весьма затруднено. Тем не менее здесь осуществляются новые подходы к комплексированию дистанционной аппаратуры. Например, совмещение приемопередающей радиоантенны с акустической в разрабатываемом в настоящее время содарно-радиоакустическом комплексе [62] делает последний сравнительно недорогим, весьма компактным и мобильным. С помощью такого комплекса, в частности, может быть значительно ослаблено влияние внешнего шума в расположении аэродрома на точность измерений.

Выводы

Приведенный обзор современного состояния дистанционного зондирования АПС с поверхности земли показывает, что за последние 5–10 лет исследования в этой области заметно продвинулись вперед.

Применительно к развитию средств неконтактного зондирования наиболее интересными представляются новые подходы к созданию аппаратуры, а также работы, направленные на комплексирование систем и внедрение современных методов обработки сигналов с использованием мощной вычислительной техники.

Усовершенствование аппаратуры и методов обработки сигналов позволило, наряду с расширением географии исследований и более глубоким изучением "традиционных" параметров АПС (в частности, профилей температуры воздуха и вектора ветра), получить новые данные о структуре АПС. Это дву- и трехмерные характеристики турбулентности, момент количества движения, высота пограничного слоя и т.д.

Степень изученности разных метеовеличин, дающих представление о структуре АПС, весьма различна. Если задачи измерения температуры и вектора ветра можно считать в основном решенными, то остаются, в частности, проблемными:

— надежное измерение влажности акустическими и радиоакустическими методами;

— автоматизация содарного определения типа термической структуры и высоты слоя перемешивания АПС;

— выявление особенностей тонкой структуры АПС при различных метеоявлениях;

— выяснение природы локальных когерентных структур.

Необходимость в решении перечисленных задач, а также явное возрастание потребности в дистанционных методах изучения АПС (в связи с ухудшением экологической ситуации) делают дальнейшие исследования в этой области весьма актуальными.

Автор выражает признательность д-ру техн. наук Я.С. Шифрину и канд. техн. наук Ю.Н. Ульянову за ценные советы при подготовке данного обзора.

Список литературы: 1. *Atmospheric studies using collocated 915 and 2835 MHz profilers / W.L. Ecklund, C.R. Williams, P.E. Johnston et al. // Extended abstracts of PWS-97. Engelberg, Germany, 1997. P. 106-109.* 2. *Черников А.А. Радиолокационные отражения от ясного неба. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 148 с.* 3. *Welko B.-D. Frequency and sharing aspects of a wind profiler at 482 MHz and 1290 MHz // Extended abstracts of PWS-97. Engelberg, Germany, 1997. P. 43-48.* 4. *Czechovsky P., Schmidt G., Rüster R. The mobile SOUSY Doppler radar: technical design and first results // Radio Science. 1984. Vol. 19. P. 441-450.* 5. *Ikonen I. Interference test between a wind profiler and a radiosonde // Meteorol. Rundschau. 1990. Vol. 42, N 3-5. P. 155-157.* 6. *Winston H.A. Clear-air Doppler wind profiling radar // Vaisala News. 1990. Vol. 121. P. 12-16.* 7. *Winston H.A., Neuschaefer W. The use of boundary-layer wind profiling radars for airport terminal operations // Extended abstracts of PWS-97. Engelberg, Germany, 1997. P. 384.* 8. *A VHR boundary-layer radar: first results / R.A. Vincent, S. Dullaway, A. MacKinnon et al. // Extended abstracts of PWS-97, Engelberg, Germany, 1997. P. 85-92.* 9. *White A.B., Gottas D. The use of Doppler wind profilers for air pollution studies // Extended abstracts of PWS-97. Engelberg, Germany, 1997. P. 147-150.* 10. *Fluxes of heat and momentum measured with a boundary-layer wind profiler radar-radio acoustic sounding system / W.M. Angevine, S.K. Avwery, W.L. Ecklund, D.A. Carter // J. of Appl. Meteorol. 1993. Vol. 32. N 1. P. 73-80.* 11. *Bigler-Engler V.J., Wagner K.K. The use of data from 915 MHz profilers in forecasting and analysis of ozone episodes in San Diego, California // Extended abstracts of PWS-97. Engelberg, Germany, 1997. P. 66-71.* 12. *The MU radar with an active phased-array system. 1 - Antenna and power awplifiers, 2 - In house equipment / S. Fukao, T. Sato, T. Tsuda et al. // Radio Science, 1985. Vol. 20, N 6. P. 1155-1176.* 13. *A 1290 MHz profiler with RASS for monitoring wind and temperature in the boundary layer / D. Engelbart, H. Steinhagen, U. Görsdorf et al. // Contr. to Atmosf. Physics. 1996. Vol. 69/1. P. 63-80.* 14. *Peters G., Hasselmann D., Pang S. A new mobile 1,29 GHz wind and temperature profiler - Description and first measurements // The Third Intern. symp. on troposph. profil.: needs and technologies. Hamburg, 1994. P. 320-322.* 15. *Обухов А.М. Рассеяние звука в турбулентном потоке // Докл. АН СССР. 1941. Т. 30. С. 611.* 16. *Каллистратова М.А., Кон А.И. Радиоакустическое зондирование атмосферы. М.: Наука,*

1985. 197 с. 17. *Красенко Н.П.* Акустическое зондирование атмосферы. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1986. 144 с. 18. *Scintec sensors and systems. A new class of sodar. FAS64, FAS64-SH: High performance boundary layer profiler for wind speed and turbulence / Scintec, Atmosphärenmesstechnik AG, Germany.* S. a. 4 p. 19. *Mursh-Radlgruber E., Rengarajan G.* Aspects of high frequency acoustic sounding - examples from applications of the BOKU-minisodar // Proc. of ISARS'98. Vienna, Austria, 1998. P. 103-106. 20. *AV Sodar system, Minisodar / AeroVironment Inc., California, USA.* S. a. 4 p. 21. *Asimakopulos D.N., Helmis C.G.* Recent advances on atmospheric acoustic sounding // Intern. J. Rem. Sensing. 1994. Vol. 15, N 2. P. 223-233. 22. *Investigation of the atmosphere boundary layer with the sodar "IVA" / V.I. Aliokhin, V.V. Dorovsky, A.I. Ryzhenko, O.A. Tarasenko* // Proc. of ISARS'98. Vienna, Austria, 1998. P. 140-142. 23. *Максимова Н.Г.* Точечные ангел-эхо в акустике. Аппаратура и методика их исследования // Радиотехника. 1997. Вып. 101. С. 101-108. 24. *Little C.G.* Acoustic methods for the remote probing of the lower atmosphere // Proc. of IEEE. 1969. Vol. 57. P. 571-578. 25. *Kallistratova M.* Progress in the practical use of sodars in the atmospheric research and current problems // Proc. of ISARS'98. Vienna, Austria, 1998. P. 94. 26. *Singal S.P., Aggarwal S.K.* Sodar and radiosonde studies of thermal structure of the lower atmosphere at Delhi // Ind. J. of Radio and Space Physics, 1979. Vol. 8. P. 76-81. 27. *Purnachandra Rao M., Raghu Kumar A., Sree Rama Murthy J.* Sea breeze detection with acoustic radar // Ind. J. of Radio and Space Physics. 1981. Vol. 10. P. 176-181. 28. *Singal S.P.* Studies of sodar-observed dot echo structures // J. Atmosphere-ocean. 1985. Vol. 23. N 3. P. 304-312. 29. *Singal S.P., Kumar S.* Sodar studies of air pollution associated meteorological parameters in the hills of Assam, India // Proc. of ISARS'98. Vienna, Austria, 1998. P. 302-306. 30. *Локощенко М.А.* Акустическое зондирование приподнятых инверсий // Метеорология и гидрология. Обнинск, 1994. № 7. С. 24-37. 31. *Результаты совмещенного акустического и радиоакустического зондирования атмосферы на границе суша-море / Ю.Н. Ульянов, А.Ю. Панченко, Н.Г. Максимова и др.* // Исследование пограничного слоя атмосферы над сушей и океаном акустическими методами. М., 1990. Ч. 1. С. 47-54. (Препр. / АН СССР. Ин-т физики атмосферы; 7). 32. *Локальные неоднородности в устойчивом пограничном слое атмосферы по результатам акустического и радиоакустического зондирования в прибрежной зоне / Ю.Н. Ульянов, А.Ю. Панченко, В.А. Андрианов, Н.Г. Максимова* // 1992. 21 с. (Препр. / РАН. Ин-т радиотехники и электрон.; 7 (575)). 33. *Petenko I.V., Kallistratova M.A.* Dash echo structures as observed by acoustic sounding // Proc. of ISARS'96. Moscow, 1996. P. 6.109-6.14. 34. *Vetrov V.I., Ulyanov Yu.N.* A dot echo investigations with sodar and RASS techniques // Proc. of ISARS'96. Moscow, 1996. P. 6.115-6.120. 35. *Vetrov V.I., Ulyanov Yu.N., Prokopenko Yu.V.* The local atmospheric structures having abnormally strong sodar returns: some possible mechanism of its formation // Proc. of ISARS'96. Moscow, 1996. P. 6.83-6.88. 36. *Vetrov V.I., Ulyanov Yu.N., Bedin V.S.* Formation features and the fine structure of sodar dot-echoes // Proc. of ISARS'98, Vienna, Austria, 1998. P. 115-118. 37. *Ziemann A., Arnold K., Raabe A.* Acoustic tomography - a method for remote sensing of the atmospheric surface layer // Proc. of ISARS'98. Vienna, Austria, 1998. P. 29-32. 38. *Petenko I.V., Kallistratova M.A.* Wind turbulence measurements with a mono-bistatic sodar // Proc. of ISARS'96. Moscow, 1996. P. 3.55-3.60. 39. *Bradley S.S.* Use of coded waveforms for sodar systems // Proc. of ISARS'98. Vienna, Austria, 1998. P. 67-70. 40. *Wavelet filtering of sodar signals / J.R. Jordan, S.W. Abbott, B.D. Templeman, R.J. Lataitis* // Proc. of ISARS'98. Vienna, Austria, 1998. P. 71-77. 41. *Petenko I.V., Bezverkhni V.A.* Specific scales of the convective ABL derived from sodar data with the wavelet transform // Proc. of ISARS'98. Vienna, Austria, 1998. P. 247-250. 42. *Мобильная радиоакустическая система для определения основных метеорологических величин: Информ. листок. X: / С.И. Бабкин, Н.Г. Максимова, А.Ю. Панченко и др.* // Облтолиграфиздат, 1986. 2 с. 43. *Измерение влажности воздуха радиоакустическим зондированием атмосферы / С.И. Бабкин, Ю.Н. Ульянов, Н.Г. Максимова и др.* // 9-й Всесоюз. симп. по лазер. и акуст. зондированию атмосферы. Томск, 1991. С. 29 -- 36. 44. *Proshkin E.G.* Atmosphere boundary layer turbulence level estimation with radioacoustic sounding // Proc. of ISARS'98. Vienna, Austria, 1998. P. 187-191. 45. *Андрианов В.А., Панченко А.Ю.* Восстановление высотных

профилей метеопараметров по результатам акустического и радиоакустического зондирования // Исследование пограничного слоя атмосферы над сушей и океаном акустическими методами. М., 1990. Ч. 1. С. 34–38. (Препр. / АН СССР. Ин-т физики атмосферы; 7). 46. *Vogt S.* Advances in RASS since 1990 and practical application of RASS to air pollution and the ABL studies // Proc. of ISARS'96. Moscow, 1996. P. G.37–G.50. 47. *Görsdorf U.* The accuracy of temperature measurements with RASS // Extended abstracts of PWS-97. Engelberg, Germany, 1997. P. 231–234. 48. *Peters G., Angevine W.M.* On the correction of RASS-temperature errors due to turbulence // Beitr. Atmosph. 1996. Vol. 69, N 1. P. 81–96. 49. *Petenko I.V.* Improved estimation of RASS-measured temperature corrections // Proc. of ISARS'98. Vienna, Austria, 1998. P. 154–159. 50. *Görsdorf U., Petenko I.V.* Some results of experimental investigation of the RASS-measured temperature accuracy // Proc. of ISARS'98. Vienna, Austria, 1998. P. 71–77. 51. *Kartashov V., Korytsev I.* Optimal algorithms of signal processing in radio acoustic systems // Proc. of ISARS'98. Vienna, Austria, 1998. P. 107–109. 52. *Improvements of a decimetric RASS / P. Trivero, A. Marzorati, P. Marcacci et al.* // Proc. of ISARS'98. Vienna, Austria, 1998. P. 196–199. 53. *Akai Y., Kanzaki T.* The application of a mobile RASS to observation of an urban heat island // Proc. of ISARS'98. Vienna, Austria, 1998. P. 200–203. 54. *Ulyanov Y., Prokopenko Y., Vetrov V.* Potentialities of the monostatic inclined RASS system for PBL temperature and wind profiling // Proc. of ISARS'98. Vienna, Austria, 1998. P. 179–182. 55. *Ульянов Ю.Н., Прокопенко Ю.В., Максимова Н.Г.* Радиоакустическое зондирование с использованием звуковых одиночных импульсов // 2-я Междунар. конф. "Теория и техника передачи, приема и обработки информации": Тез. докл. X., 1996. Ч. 2. С. 53. 56. *Maksymova N., Ulyanov Y.* Research of sea breezes over Black sea northwest coast by means of acoustic and radioacoustic sounding // Proc. of ISARS'98. Vienna, Austria, 1998. P. 277–280. 57. *A small RASS – as an extension of a doppler sodar / G. Peters, H.J. Kirtzel, B. Fischer, T. Schlotfeldt* // Proc. of ISARS'96. Moscow, 1996. P. 3.7–3.11. 58. *Design and preliminary field test of a combined RF acoustic phased-array antenna for profiler operations / D.E. Wolfe, R.J. Lataitis, B.L. Weber et al.* // Extended abstracts of PWS-97. Engelberg, Germany, 1997. P. 151–154. 59. *On turbulence measurements with RADAR, RASS, SODAR and DIAL / G. Peters, L. Hirsch, B. Fischer et al.* // Extended abstracts of PWS-97. Engelberg, Germany, 1997. P. 195–197. 60. *Towards the "Lindenberg Column" – simultaneous measurements of vertical profiling systems / F. Beyrich, D. Engelbart, U. Görsdorf et al.* // Extended abstracts of PWS-97. Engelberg, Germany, 1997. P. 166–171. 61. *Bradley S.S., Taylor J.* Sodars, mini-sodars, RASS, rain profiler and ultrasonic spectrometer use in a mesoscale // Proc. of ISARS'98. Vienna, Austria, 1998. P. 167–170. 62. *Maksimova N.G., Ulyanov Yu.N., Prokopenko Yu.V.* Combined radio-acoustic antenna for the air field complex of acoustic and radioacoustic sounding of the atmosphere // Proc. of ICATT'97. Kyiv, 1997. P. 175–176.

Харьковский государственный технический
университет радиозлектроники

Поступила в редколлегию 13.10. 98