

## **Сравнительный анализ методов и приборов для измерения профилей температуры атмосферного пограничного слоя**

Е.Н. Кадыгров<sup>1</sup>, А.К. Князев<sup>1</sup>, А.С. Вязанкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория», 141700, Московская область, г. Долгопрудный, ул. Первомайская 3,  
E-mail: [enkldz@mail.ru](mailto:enkldz@mail.ru), [ldz@cao-rhms.ru](mailto:ldz@cao-rhms.ru)

*Дан сравнительный анализ возможностей различных методов и приборов для измерения термической стратификации атмосферного пограничного слоя.*

*Ключевые слова: атмосферный пограничный слой, методы, аппаратура, термическая стратификация*

## **Comparative analysis of methods and instruments for measuring atmospheric boundary layer temperature profiles**

E.N. Kadygrov<sup>1</sup>, A.K. Knyazev<sup>1</sup>, A.S. Vyazankin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Central Aerological Observatory

*Advances in profiling the thermodynamic state of the Boundary Layer: comparison of methods and instruments.*

*Keywords: atmospheric boundary layer, methods, equipment, thermal stratification*

### **Введение**

Атмосферный пограничный слой (АПС), или как его еще называют планетарный пограничный слой (ППС), или слой трения, или слой возмущения, является нижним слоем тропосферы и имеет высоту от земной поверхности до 100-300 м в полярных районах и до 1600 м в средних широтах. Высота АПС также зависит от степени шероховатости земной поверхности. В АПС происходит обмен импульсом, теплом и влагой между подстилающей поверхностью и атмосферой. В этом слое резко выражены суточные изменения температуры и других метеорологических величин (скорости ветра, характеристик влажности воздуха и турбулентного обмена). Поэтому основной задачей исследований АПС является определение законов вертикального распределения профилей температуры, ветра и характеристик турбулентности. С точки зрения экологии распространения загрязняющих веществ в АПС по вертикали зависит от степени устойчивости воздуха, т.е. от вида термической стратификации. Лучшие условия для рассеяния вредных примесей создаются при сильной неустойчивости, когда температура с высотой монотонно уменьшается. Худшие условия возникают при устойчивой стратификации АПС, когда возникают так называемые температурные инверсии, при которых температура АПС повышается с высотой. Турбулентность при этом придавлена, вертикальные движения ослаблены. Инверсия обычно возникает, когда воздух выхолаживается снизу (в основном под влиянием радиационных факторов) или нагревается сверху (например, при адиабатическом опускании, а также когда происходит адвекция теплого или холодного воздуха) [1]. В приборном плане получать регулярные данные о термической стратификации АПС оказалось не простой задачей. В основном для этого использовались данные радиозондов. Но они не обеспечивали непрерывности измерений, особенно когда аэрологическая сеть перешла на зондирование два раза в сутки [2-4]. Также данные поступали с исследовательских

самолетов, привязных аэростатов, и высотных метеорологических мачт [5,6,7]. Но это были не мобильные и весьма дорогостоящие измерения. Появились и дистанционные методы и приборы: оптические (лидары), радиоакустические (системы RASS), а также многоканальные СВЧ радиометры, обеспечивающие непрерывные измерения вплоть до высоты 10 км., а с 1993 г появились одноканальные сканирующие по углу места СВЧ профиломеры, специально предназначенные для мониторинга термической стратификации АПС [2,8]. Такое разнообразие методов измерения термической стратификации АПС вызывает необходимость сравнения их эффективности и выбора оптимального подхода, что и является задачей данного доклада. Непрерывные измерения профиля температуры АПС позволяют получать данные, необходимые для: оценки состояния планетарного пограничного слоя атмосферы (стабильность, турбулентность); мониторинга возникновения, развития и разрушения температурных инверсий; прогноза распространения загрязнений в атмосфере городов и крупных промышленных объектов, исследования вертикальной структуры городского острова тепла; прогноза условий распространения радиоволн, повышения качества сверхкраткосрочного и краткосрочного прогнозов погоды, прогноза опасных метеорологических явлений; анализа и прогноза возникновения и диссипации тумана, в том числе в аэропортах; повышения точности работы сети метеорологических радиолокаторов за счет введения оперативной поправки на индекс рефракции, возможность устранения грубых ошибок в определении высоты верхней границы облаков [1,8].

## **Контактные методы и аппаратура для измерения термической стратификации АПС**

### **1. Радиозонды**

Основным источником получения регулярной информации о термической стратификации АПС многие годы (с 1930 г.) были радиозонды, имевшие максимальную высоту подъема порядка 40 км. Главным их назначением является измерение метеорологических параметров тропосферы и стратосферы, но начальная фаза полета проходит в АПС. К сожалению, после 1990 г. выпуски радиозондов стали производиться два раза в сутки вместо четырех, да и число аэрологических станций уменьшилось с 228 до 113[4]. При этом изменчивость термической стратификации АПС гораздо больше, чем более высоких слоев атмосферы. Для АПС такое редкое зондирование не является оптимальным, особенно в части контроля возникновения и развития температурных инверсий, одного из важнейших параметров в системе экологического мониторинга. Технически аэрологическая сеть совершенствовалась - вместо радиолокаторов появлялись гораздо более компактные радиотеодолиты, зонды переводились на более современные радиокомпоненты, появились современные навигационные системы радиозондирования, например, финский комплекс с зондом RS92-SGR и приемником DigiCoraMW31 компании Vaisala, а также отечественный комплекс «Полюс», в состав которого входит наземное приемное устройство и радиозонд с приемником ГЛОНАСС/GPS и навигационный зонд МР3-Н1. Эта система обеспечивает надежное сопровождение радиозонда до высоты 40 км и удалении до 250 км. Вес зонда 400 г, в качестве датчика температуры используется миниатюрный бусиновый термистор с малым показателем тепловой инерции, масса аппаратуры поста оператора 45 кг [4,8]. Но по-прежнему радиозонды не обеспечивают непрерывности измерений и являются приборами однократного использования.

## **2. Привязные аэростаты**

Помимо радиозондов в прошлые годы для измерения термической стратификации АПС довольно широко использовались привязные аэростаты [5,6]. Однако в последнее время им на смену приходят метеозонды на основе БПЛА и дистанционные приборы. Привязной аэростат представлял собой оболочку с газом, как правило, это не просто шар как у радиозонда, а все-таки определенной обтекаемой формы с улучшенными аэродинамическими характеристиками, чтобы меньше увлекаться ветром, а также тросовое хозяйство и прибор типа радиозонда для измерения температуры, водяного пара и ветра. Высота подъема составляла порядка 200-300 м., максимальная - 600 м, измерение профиля температуры проводилось во время подъема и спуска, а также имеется возможность продолжительных измерений на фиксированных высотах. Достаточно долго привязные аэростаты использовались учеными Центральной аэрологической обсерватории-как в Долгопрудном Московской области, так и на полевой экспериментальной базе ЦАО (г. Рыльск Курской области) [5,8]. Был уникальный английский привязной аэростат (в Кардингтоне), который мог находиться часами на высоте порядка 600 м, а на тросе были на разных высотах различные приборы («пробы»), весьма сложные и исключительно дорогие, в их состав кроме обычных метеодатчиков входили датчики для измерения турбулентных характеристик АПС [6].

## **3. Самолетные приборы**

Во многих научных проектах по исследованию процессов в АПС используются данные контактных датчиков температуры, установленных на специализированных самолетах-метеолабораториях. Подобные самолеты имеются в разных странах, наиболее известными являются «HEAPER»(США), «Hercules» C130Q(США ), «Halo» (Германия), «Twin Otter (Канада), «Hercules» C-130K (Англия), «Merlin» (Франция), «Falcon» (Германия), и другие. В нашей стране в советские времена было более 10 самолетов-метеолабораторий (Ил-18В (ЦАО), Ил-18 (ГГО), Як-40 (Лирос), Ил-18Д (Циклон), Ил-18Д (Метеор), Ан-12 (Циклон), Ту-16 (Циклон), АН-26 Б (Циклон) [7]. В настоящее время в РФ есть два самолета-метеолаборатории: Як-42 «Росгидромет» (ЦАО) и Ту-134 «Оптик-Э» (Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН) [7,8]. Для задач исследования АПС в самолетах имеется специальный измерительный комплекс, обеспечивающий получение навигационных параметров полета и термодинамических характеристик атмосферы (температуры, влажности, давления, плотности, скорости ветра). Измерения производятся во время взлета, посадки, горизонтального полета с минимально допустимой высотой 500 м. Прямые измерения термодинамических параметров с борта самолета-лаборатории невозможны, т.к. он движется не только относительно земной поверхности, но и относительно воздушной массы и вносит искажения в окружающую среду. Поэтому температура воздуха и турбулентные пульсации определяются в результате расчетов с привлечением измеренных привлеченных параметров – полного и статистического давлений, измеренной температуре воздуха, характеристик собственного движения самолета (путевой скорости, углам положения самолета) [7]. При этом к самолетным датчикам температуры предъявляются особые требования – повышенная точность измерений, малая тепловая инерция и возможность измерения в облаках с жидко-капельной фракцией. Наибольшее распространение среди самолетных датчиков температуры получили термометры сопротивления [7]. Наиболее широко в самолетах – метеолабораториях используются следующие датчики температуры: Rostmount 102 СТ2СВ; датчик температуры полного торможения П-104, датчик температуры проточный П-5, гигрометр точки росы GE 1011В BUCK (температура точки росы) и

другие. Датчики температуры располагаются на подкрыльевой штанге самолета-метеолаборатории. Подробно характеристики различных самолетных датчиков температуры летно-технические характеристики самого самолета приводятся в [7]. Достоинством самолетных измерений является возможность получения данных на больших пространствах, над водной поверхностью, а также в полярных районах. К недостаткам- высокая стоимость измерений и ограниченные возможности в исследованиях АПС над жилыми массивами.

#### **4. Метеозонды на основе БПЛА**

Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с контактными датчиками температуры открыли новые возможности для измерения термической стратификации АПС. Существуют два основных типа БПЛА - самолетного типа и многороторные вертолеты (мультикоптеры, или дроны)[8-11]. Преимуществом метеозондов на основе БПЛА является возможность их многократного использования и возможность измерений в вертикальном столбе атмосферы (в то время как радиозонд может уноситься ветром за сотни километров от точки выпуска). В качестве датчиков температуры используются термометры сопротивления в виде платиновой нити, термопары, термисторы типа как в радиозондах. Примером БПЛА вертолетного типа может быть «Цимлянин», используемый специалистами ИФА РАН им. Обухова и МГУ. Кроме того предусмотрен комбинированный вариант полета-с вертикальным взлетом. Его характеристики: размах крыла 2.4 м; взлетный вес 9 кг, максимальная высота полета 1.5 км, максимальная продолжительность полета 60 минут, для измерения температуры атмосферы используется датчик Vaisala HMP110 [9]. Мультикоптерные БПЛА стали развиваться гораздо позже, но в настоящее время они стали наиболее популярными и часто используемыми в метеорологических задачах. Их ключевым преимуществом является простота управления, маневренность, возможность взлетать и садиться в условиях ограниченного пространства, зависать или двигаться вертикально над заданной точкой. Примерами могут быть CopterSonde (США), MeteoDrone (Швейцария) [8]. В РФ для метеоизмерений часто используются квадрокоптеры DJI Phantom 4 с датчиками температуры iMet-XF, термисторами NTC, а в последние годы появляется все большее число разнообразных метеозондов на основе БПЛА [8-11].

#### **5. Высотные метеорологические мачты**

На регулярной основе проводятся измерения термической стратификации АПС с помощью контактных датчиков, расположенных на различных уровнях высотных метеорологических мачт. В нашей стране наиболее известной является высотная метеорологическая мачта в г. Обнинске Калужской области (ВММ-310). На ней с 1959 г. проводятся непрерывные измерения профилей температуры, давления, влажности, скорости и направления ветра, а также определяются турбулентные характеристики во всем 300-метровом слое атмосферы. Высота мачты 310 м, диаметр 2.3 м, имеется 13 площадок для установки аппаратуры, а также 4 выдвижные рейки длиной 6 м. В качестве датчиков температуры используются промышленные датчики температуры с платиновыми термометрами сопротивления ТСП-500, установленные на уровнях 2;25;75;120;169;217 метров над земной поверхностью. Погрешность измерения температуры воздуха не превышает  $0.2^{\circ}\text{C}$  при доверительной вероятности 0.95 [12,13]. Вторая в РФ известная специализированная высотная мачта с датчиками температуры была построена в 2006 г. по совместному российско-германскому проекту и установлена в поселке Зотино Красноярского края-мачта ZOTTO. По сути это не метеорологическая, а экологическая мачта, предназначенная для мониторинга

содержания парниковых газов. Высота мачты ZOTTO составляет 302 метра, воздухозаборники (и датчики температуры) установлены на высотах 4, 52, 92, 156, 227 и 301 м. Проводится мониторинг содержания углекислого газа, метана, окислов азота, аэрозоля, а также профилей температуры АПС. Известные высотные метеорологические мачты имеются также в США (недалеко от г. Боулдер, штат Колорадо, высота 302 м, датчики температуры установлены на высотах 10м, 50 м, 100 м, 200 м, 300 м), а также в Японии - в г. Цукуба (высота 213 м, датчики температуры на высотах 10м, 25м, 50 м, 100 м, 150 м, 200 м). Основными преимуществами высотных метеорологических мачт по сравнению с другими методами измерения термической стратификации АПС является возможность синхронного измерения метеорологических величин во всем 300-метровом слое атмосферы с высоким вертикальным разрешением при любых погодных условиях, а к недостатком следует отнести высокую стоимость сооружения и невозможность мобильных измерений.

### **Дистанционные методы и приборы**

Кроме вышеописанных контактных методов и приборов для измерения профилей температуры АПС, где датчик и прибор непосредственно «контактируют» с атмосферой в самой среде, развиваются и дистанционные методы, позволяющие измерять параметры АПС на расстоянии, ярким примером являются спутниковые приборы дистанционного зондирования. К сожалению, из-за сложностей учета вариаций собственного излучения подстилающей поверхности на данный момент не существует спутниковых приборов для мониторинга термической стратификации АПС. В США в настоящее время делается попытка создать комплексную систему мониторинга параметров АПС, куда помимо ряда наземной аппаратуры будут использоваться спутниковые приборы лимбового зондирования атмосферы (A Global Planetary Boundary Layer Observing System) [14].

#### **1. Акустические (звуковые)**

Одним из первых дистанционных методов измерения метеорологических характеристик АПС был метод использования акустических волн. Эти волны обладают свойством наиболее сильного взаимодействия с параметрами атмосферы. Приборы, реализующие эти методы, называются содарами (**Sound Detection And Ranging**). Обычно содар состоит из акустической антенны, блока электроники, и компьютера для обработки информации [2,8,15-17]. Содар излучает звуковой импульс, который преломляется мелкомасштабными турбулентностями в атмосфере, которые переносятся ветром, и скорость ветра может быть определена из доплеровского сдвига частоты. Хотя содары не измеряют непосредственно профили температуры, но они могут определять наличие температурных неоднородностей и температурных инверсий. В содарах обычно используются звуковые частоты в диапазоне 1-2 кГц. В зависимости от типа антенной системы и рабочей частоты высотный диапазон содаров составляет 100-1000 м. Основным их достоинством является достаточно низкая стоимость по сравнению с другими дистанционными приборами при достаточно высокой информативности. [15,16]. Одним из недостатков, особенно при работе в городе, является громкий звук излучения. Современные коммерческие содары начала XXI века можно подразделить на маловысотные и обычные. Первые имеют максимальную высоту зондирования до 200 м и обычно используются для обслуживания устройств альтернативной энергетики (ветровых электростанций). Примером могут служить содары TRINON (США), PCS.2000-24/LP (Германия), 4000 WE (США) и другие [8]. Вторая группа содаров имеет более высокую высоту зондирования и используется для метеорологических и экологических целей. Здесь

примеров гораздо больше: XFAS, MFAS, SFAS (Германия); PCS.2000 (Германия); PAO-5 (Франция - США); Echosonde 300, 600, 600 PA (Англия - США); Волна-3 (Россия), ЛАТАН-3 (Россия) и другие. Чем ниже частота зондирования и больше площадь параболической тарелки-излучателя, тем выше высота зондирования [2,8].

## 2. Радиоакустические (RASS- Radio Acoustic Sounding System )

Сущность метода RASS состоит в том, что в атмосферу излучается акустический импульс, создающий периодические изменения плотности, а значит и диэлектрической проницаемости, движущийся со скоростью звука. Эта находящаяся в движении периодическая структура сопровождается радиолокатором. При прохождении звукового импульса через атмосферу его параметры оказываются зависящими от ее состояния, прежде всего от температуры. Радиолокатор, сопровождающий звуковой импульс, определяет скорость его движения. Т.к. скорость звука при распространении в атмосфере является функцией виртуальной температуры, то измеряя скорость вертикального распространения фронта звуковой волны, теоретически можно получить профиль виртуальной температуры атмосферы. Увеличение рассеяния наблюдается при определенном соотношении частот звуковой и радио волн (Брегговское рассеяние) [17]. Под виртуальной акустической аппаратурой понимают функцию от температуры  $t$ , атмосферного давления  $p$  и упругости водяного пара  $e$  :  $t = t_v + 80 e/p$ , входящая в формулу скорости звука во влажном воздухе. RASS способен определять профили виртуальной температуры атмосферы до высот порядка 1-2 км. Однако эти системы не получили широкого распространения в метеорологических сетях наблюдений. Это связано с сильной зависимостью точности измерений от метеорологических условий и весьма высокой стоимости [18]. Примером коммерческих систем RASS могут служить LAP-3000 (Финляндия), приставки RAE-1 (Германия), 1290 MHz RASS и 482 MHz RASS (Германия), AP1000 RASS (Германия); RWP50 (США) и другие [8,15,18].

## 3. Оптические

В оптическом диапазоне для измерения профилей температуры и ветра используются приборы с использованием лазеров - лидары. LIDAR (Light Detection And Ranging) - это радар, использующий лазерное излучение вместо радиоволн [2]. Он испускает лазерный импульс в атмосферу и принимает свет, отраженный от молекул атмосферы, облаков и аэрозолей. LIDARы работают в видимом и инфракрасном свете и имеют несколько конфигураций. Распределение в атмосфере воды, температуры, аэрозолей и облаков извлекается из информации об интенсивности принимаемого излучения, а распределение скорости ветра - из доплеровского сдвига [19-21]. Системы, использующие длину волны около 600 нм и комбинационное рассеяние, которое возникает при рассеянии лазерного излучения от молекул воды, азота и кислорода в атмосфере, использовались для измерения температуры и влажности в ночное время. DIAL (Differential absorption LIDAR) используют разницу в затухании рассеянного сигнала для двух длин волн. Они используются для определения атмосферной температуры и влагосодержания [2,19,20]. На начальном этапе DIAL работали на длинах волн от 700 до 800 нм, и технология использовала CO<sub>2</sub>-LIDAR. В современных лидарных системах, использующих 3 различных метода измерения температуры, высота профиля температуры возросла до уровня верхней мезосферы. Примерами коммерческих лидаров могут служить Windcube 8(70,200) (Франция); WLS7 (Франция), STREAM-Line (Германия), LB10 (20,30) (Греция); HSRL (США), Loza-M (Россия). Многие университеты и институты ведут разработки собственных лидаров для измерения профилей температуры, в основном выше АПС. Такие лидары являются наиболее дорогими и сложными из всех типов профиломеров, и, похоже, они

будут использоваться в основном для исследования верхней стратосферы, а не для АПС [2,20,21].

#### 4. Радиофизические методы

Существует несколько методов определения профилей температуры атмосферы в радиодиапазоне, например метод радиопросвечивания, метод радиополяриметрии, но они пока в основном в стадии разработки. Пожалуй, из всех дистанционных приборов наиболее пригодными для мониторинга термической стратификации АПС являются приборы, основанные на приеме собственного излучения атмосферы в радиодиапазоне. Их принцип действия основан на приеме собственного теплового излучения молекулярного кислорода атмосферы (на частотах вблизи 60 ГГц или 118 ГГц) [2,3,18,21-25]. Физические основы этого метода довольно глубоко исследованы, имеются серийные приборы – микроволновые температурные профилемеры [22]. Исторически появились первыми многоканальные приборы-сначала единичные экземпляры, в США (Денвер) и в СССР (Нижний Новгород, НИРФИ; Долгопрудный, ЦАО). Они обеспечивали непрерывные измерения профилей температуры до высот 10 км при безоблачной атмосфере и 3-4 км при наличии облачности. Одновременно измерялись общее содержание водяного пара и водозапас облаков [8]. В конце XX века появились серийные коммерческие образцы таких приборов: МР-3000 А (США), RPG-НАТPRO (Германия) [8]. В то же время серьезную конкуренцию этим приборам в части измерений термической стратификации АПС составил разработанный нами в ЦАО микроволновый температурный профилемер МТР-5 для АПС. Если в зарубежных приборах зондирование профилей температуры проводилось в зенит (например, в RPG-НАТPRO для этого использовалось 14 частотных каналов), то в МТР-5 использовалось угломестное сканирование и был один канал, практически в центре поглощения  $O_2$ , что позволило использовать ширину полосы пропускания этого канала почти 2 ГГц (при этом коэффициент поглощения был почти постоянным), а значит получить очень высокую чувствительность радиометра-порядка (0.05 К) и более высокое вертикальное разрешение [24-27]. Одноканальность существенно упростила как обработку данных, так и техническую часть прибора, при сохранении высокой точности измерения профиля температуры (0.5 К). Интересно отметить, что после этого в приборе RPG-НАТPRO тоже ввели сканирование на каналах 54.94 ГГц; 56.66 ГГц; 57.30 ГГц и 58.0 ГГц.

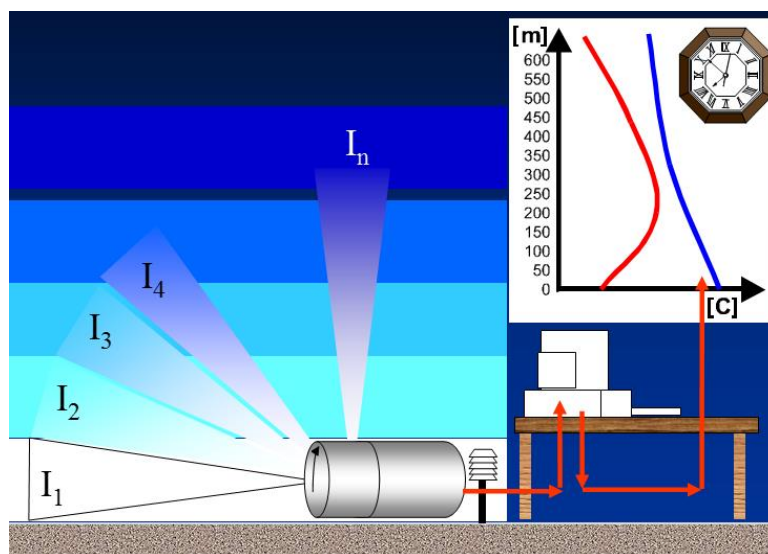
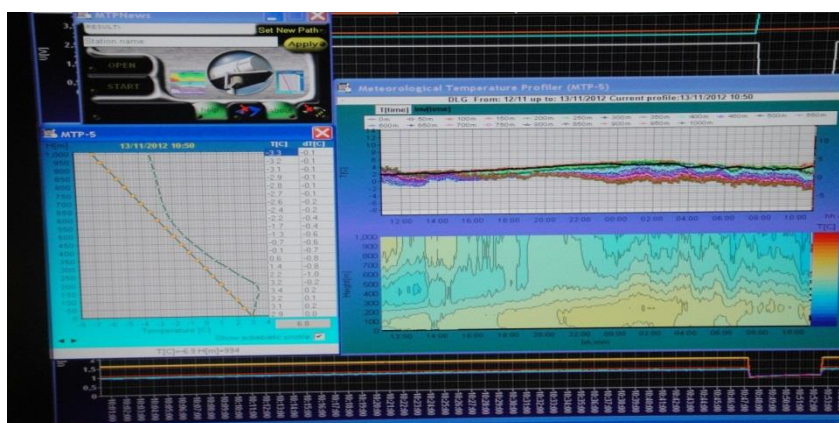


Рис. 1. - Принцип действия микроволнового температурного профилемера для АПС



**Рис.2. Примеры одноканальных микроволновых температурных профиломеров МТР5**



**Рис. 3. Пример визуальной записи за текущие сутки на мониторе профиломера МТР-5**

### **Заключение**

Проведенный анализ измерительных систем для мониторинга термической стратификации АПС показал, что в этой задаче преимущество имеют радиофизические приборы. При этом достоинством многоканальных микроволновых приборов является большая высота зондирования профилей температуры и наличие данных о содержании водяного пара и водозапаса облаков. К их недостаткам можно отнести более высокую стоимость и сложность абсолютной калибровки. Преимуществом одноканальных сканирующих температурных профиломеров для АПС является полностью автоматический режим работы, включая калибровку, практически в любых метеорологических условиях, простота установки и эксплуатации, более высокое вертикальное разрешение, более низкая стоимость прибора[8,24-27]. Основным минусом является ограничение максимальной высоты зондирования - 1000 м и тот факт, что для корректных измерений атмосфера должна быть горизонтально однородной хотя бы в пределах 500 м от места установки прибора .

### **Литература**

1. Орленко Л.Р. Строение планетарного пограничного слоя атмосферы. Ленинград.: Гидрометеиздат. 1979. 270 с.
2. Kadygrov E.N. Operational aspects of different ground-based remote sensing observing techniques for vertical profiling of temperature, wind, humidity and cloud structure: a review. WMO.2006.IOM Report No 89. WMO/TD No 1309, Geneva, Switzerland.: 34 p.



3. Lohnert U., Crewell S., Krasnov O., O'Connor E., Russchenberg H. Advances in Continuously profiling the Thermodynamic State of the Boundary Layer: Integration of Measurements and Methods // *Journ. of Atmospheric and Oceanic Technology*. August 2008. V.25. P 1251-1266.
4. Зайцева Н.А., Балагуров А.М., Крестьянникова Н.Н., Николаев А.В. Современное состояние и перспективы развития аэрологической сети России // *Метеорология и гидрология*. 2021. № 9, с.5-20.
5. Девятова В.А. Микроаэрологические исследования нижнего километрового слоя атмосферы // Ленинград.: Гидрометеиздат. 1957. 144 с.
6. Kadygrov E.N., Pick D.R. The potential for temperature retrieval from an angular-scanning single-channel microwave radiometer and some comparisons with in situ observations.// *Oxford Press. Meteorological Applications*, 1998, V. 5, Issue 4, P. 393-404.
7. Струнин М.А. Методы исследования термодинамического состояния атмосферы с помощью самолета-лаборатории. Москва, ООО «Шанс», 2020, 211 с.
8. Кадыгров Е.Н. Микроволновая радиометрия термической стратификации атмосферы. Москва.: П.С. ООО «Шанс», 2020. 271 с.
9. Репина И.А., Варенцов М.И., Чечин Д.Г. и др. Использование беспилотных летательных аппаратов для исследования атмосферного пограничного слоя // *Инноватика и экспертиза*. 2020. Выпуск 2 (30) с. 20-39.
10. Ситников Н.М., Борисов Ю.А., Чекулаев И.И., Ефремов Д.И., Акмулин Д.В., Ситникова В.И., Улановский А.Э. Возвращаемый аэрологический зонд на базе беспилотного или дистанционно пилотируемого летательного аппарата для баллонного зондирования атмосферы // *Метеорология и гидрология*, 2014. № 9. С. 90-96.
11. Gustaffson J., Brus D., Hirsikko A. Drone development project in FMI Observation services // *Abstract WMO-CIMO-TECO-2018*. Amsterdam.: Paper No 87.
12. Бызова Н.Л. Типовые характеристики нижнего 300-метрового слоя атмосферы по измерениям на высотной мачте. М.: Гидрометеиздат. 1982. 69 с.
13. Вязанкин А.С., Кадыгров Е.Н., Мазурин Н.Ф., Троицкий А.В., Шур Г.Н. Сравнение данных микроволнового радиометра и высотной метеорологической мачты при измерениях профиля температуры и структуры ее неоднородностей // *Метеорология и гидрология*. 2001 № 3. С. 34-44.
14. Teixeira J., J.R. Piepmeier., A.R. Nehrir, C.O. Ao, S.S. Chen, C.A. Clayson, A.M. Fridlind, M. Lebsock, W. McCarty, H. Salmun, J.A. Santanello, D.D. Turner, Z. Wang, X. Zeng. Toward A Global Planetary Boundary Layer Observing System // *The NASA PBL Incubation Study team Report*, 2021, 136 p.
15. Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя . Томск.: СО РАН. 2001. 280 с.
16. Локощенко М.А., Пекур М.С. Использование эффекта рассеяния звука для изучения температурной стратификации атмосферного пограничного слоя (АПС) // *Оптика атмосферы и океана*. 1992. Т.5. №3. С. 313-316.
17. Каллистратова М.А., Кон А.И. Радиоакустическое зондирование атмосферы. Москва.: Наука. 1985. С.198.
18. Westwater E. R., Han Y., Irisov V. G., Levskiy V., Kadygrov E. N., Viazankin S.A. Remote sensing of boundary layer temperature profiles by a scanning 5-mm microwave radiometer and RASS: Comparison Experiments.// *Journal of Atmosp., and Ocean. Techn.*, 1999, V. 16, July , P. 805-818.
19. Захаров В.М., Костко О.К. Метеорологическая лазерная локация. Л.: Гидрометеиздат.1977. 222 с.
20. Зуев В.Е., Зуев В.В. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы. Санкт-Петербург.: Гидрометеиздат. 1992. 231 с.

21. Matsui I., Sugimoto N., Maksyutov S., Inoue G., Kadygrov E., Viazankin S. Comparison of Atmospheric Boundary Layer Structure Measured with a Microwave Temperature Profiler and a Mie Scattering Lidar.//Jpn.Journal Appl. Phys.,V.35.Port 1.No 4a.April 1996.P.2168-2169.
22. Караваев Д. М., Щукин Г. Г. Современное состояние и перспективы применения микроволновой радиометрии атмосферы // Оптика атмосферы и океана, 2015, т.28, № 12, с.1122-1127
23. Schonwald B. Determination of vertical temperature profiles for the atmospheric boundary layer by ground based microwave radiometry // Boundary-Layer Meteorology.No 15. 1978. P.453-464.
24. Гайкович К. П., Кадыгров Е. Н., Косов А. С., Троицкий А. В. Термическое зондирование пограничного слоя атмосферы в центре линий поглощения кислорода // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1992 . Т. 35. № 2. С. 130-136.
25. Кадыгров Е. Н., Кузнецова И. Н.. Методические рекомендации по использованию данных дистанционных измерений профилей температуры в атмосферном пограничном слое микроволновыми профиломерами: теория и практика. Долгопрудный, Изд. «Физматкнига»,2015,с.171.
26. Cadeddu M.P., Peckham G.E., and Gaffard C. The vertical resolution of ground-based microwave radiometers analyzed through a multiresolution wavelet technique // IEEE Trans. On Geos. and Rem. Sens. 2002. V. 40.No 3. P.531-540.
27. Kadygrov E.N., Shur G.N., and Viazankin A.S. Investigation of atmospheric boundary layer temperature, turbulence, and wind parameters on the basis of passive microwave remote sensing // Radio Science. 2003. V. 38. No 3. P. Mar 13-1÷13-12.
- 28.Кадыгров Е.Н., Князев А.К., Шапошников А.Н. Современные микроволновые приборы для мониторинга термической стратификации атмосферы-ретроспектива и перспективы развития// Метеорология и гидрология.2022.№12.С.88-98 (спецвыпуск :Радиофизические методы исследования атмосферы. Под редакцией проф. Г.Г.Щукина).