

Обзор методов и средств ветрового зондирования атмосферы

В.В. Стерлядкин¹, А.Г. Горелик², Г.Г. Щукин³

¹ *Московский государственный университет приборостроения и информатики, (МГУПИ),*

² *Московский физико-технический институт (МФТИ)*

³ *ВКА им. Можайского*

e-mail address: sterlyadkin@mail.ru

Проводится анализ существующих методов и средств ветрового зондирования атмосферы. Обсуждаются физические принципы формирования сигналов при оптических, акустических, радиоакустических и радарных измерениях, методы зондирования, достоинства и недостатки каждого из них. Рассмотрены возможности и перспективы ветровой РЛС миллиметрового диапазона длин.

The analysis of existing methods and tools for wind sounding of the atmosphere are presented. The physical principles of the signals formation for optical, acoustic, radio acoustic, and radar measurements, the methods of sounding, advantages and disadvantages of each are discussed. The possibilities and prospects of millimeter wind profiler are considered.

Информация о ветре и его параметрах: турбулентности, порывах, сдвигах и градиентах ветра чрезвычайно важна для очень большого числа потребителей, начиная от метеослужб аэропортов и заканчивая простыми людьми, которые планируют выйти из дома. В настоящее время самые распространенные средства измерений ветра – анемометры, которые устанавливаются на мачтах различной высоты. Но эти измерения имеют контактный характер и не позволяют получить профиль ветра по высоте или его основные характеристики.

Другой распространенный тип приборов – радиозонды, которые используют поднимающуюся оболочку с измерительными приборами, наполненную водородом или гелием [1,2]. Регистрируя с помощью радиолокатора положение оболочки в пространстве в различные моменты времени (или положение оболочки и доплеровскую частоту за счет ее движения), определяют скорость ветра на различных высотах. Радиозондирование до сих пор в мире является основным средством определения вертикального профиля ветра. Но радиозондирование, наряду с высокой стоимостью расходных материалов, имеет недостаток, связанный с редкой частотой выпуска радиозондов (обычно 2-4 раза в сутки). Учитывая, что ветровое поле может изменяться кардинально за несколько минут, такая низкая оперативность получения ветровых данных не устраивает многих потребителей.

Выходом является использование дистанционных средств ветрового зондирования, которые оперативно регистрируют ветровые характеристики в значительном объеме пространства, и могут заблаговременно предупреждать об опасных явлениях. В данном обзоре мы остановимся на основных методах и средствах дистанционного определения параметров ветра, обсудим физические основы измерений в каждом случае. Особо остановимся на достоинствах и недостатках используемых приборов и принципиальных ограничениях всех рассматриваемых средств ветрового зондирования.

В настоящее время имеется четыре основных типа дистанционных измерителей ветра. Это содары, которые работают на акустических волнах, лидары, использующие оптическое излучение, радиолокаторы, излучающие и принимающие радиоволны, и радиоакустические системы, которые комбинируют акустическое и электромагнитное излучение. Все дистанционные методы зондирования основаны на излучении волн, которые при распространении через атмосферу рассеиваются в обратном направлении

и регистрируются приемником. Рассмотрим каждый из перечисленных видов зондирования.

1. Акустические системы ветрового зондирования, содары

Теория рассеяния акустических волн в атмосфере впервые была рассмотрена А.М. Обуховым в 1941 г.[3]. В дальнейшем развитию теории способствовали работы В.И.Татарского и других авторов [4-7]. Большой цикл теоретических и экспериментальных работ в СССР был выполнен М.А.Каллистратовой. [8]. Интенсивность взаимодействия акустической волны с атмосферными неоднородностями очень велика, примерно в миллион раз сильнее, чем для электромагнитных волн. Поэтому в результате взаимодействия происходит не только рассеяние волн, но и их сильное поглощение и рефракция. Это приводит к тому, что высота акустического зондирования обычно не превышает 1000 метров. Перечисленные эффекты очень сильно зависят от частоты излучения, (примерно пропорционально квадрату частоты), поэтому при высоте зондирования до 300 м используются частоты 5-10 кГц, а для достижения высоты в 1000м частоту снижают до 1 кГц.

При акустическом зондировании в атмосферу излучается короткая пачка звуковых волн, которая при распространении рассеивается на акустических неоднородностях атмосферы. Источником акустических неоднородностей в атмосфере являются неоднородности поля ветра и температуры, которые в первую очередь связаны с турбулентными движениями. Отраженные звуковые волны регистрируются акустическим приемником, расположенным, как правило, вблизи источника излучения (моностатический содар). По времени задержки отраженного сигнала определяют дальность рассеивателей R, по мощности отраженного сигнала можно судить об интенсивности турбулентности, а по доплеровскому сдвигу частоты – определять проекцию ветра на направление зондирования. Длительность излучаемого импульса обычно лежит в интервале $\Delta\tau_{и} = 0.05-0.3$ секунды. Учитывая, что скорость распространения звука составляет масштаб $C = 340$ м/с, получим, что разрешение по дальности такой системы будет весьма высоким: $\Delta R = C\Delta\tau_{и}/2 = 8-55$ м.

За счет движения рассеивающей среды (со скоростью ветра), обратно рассеянная звуковая волна будет иметь частоту, сдвинутую за счет эффекта Доплера. Доплеровский сигнал выделяется на смесителе, при сложении принятого сигнала с опорным. Оценим, какой вид будет иметь доплеровский сигнал, и какое разрешение по скорости можно получить при таком зондировании. Напомним, что смещение рассеивателя на половину длины волны $\lambda/2$ приводит к изменению фазы отраженного сигнала на 2π и появлению в регистрируемом доплеровском цуге одного полного периода синусоиды. Если проекция скорости ветра на направление зондирования составляет $V_{в}$ м/с, то за время одного импульса частица сместится вдоль луча на расстояние $V_{в} \Delta\tau_{и}$, а доплеровский цуг будет содержать $N = 2V_{в}\Delta\tau_{и}/\lambda$ полных периодов колебаний. Из спектрального анализа известно, что чем больше N полных периодов в доплеровском цуге, тем уже спектр, и тем более точно определяется доплеровская скорость $\Delta V_{в}$. А именно, $V_{в}/\Delta V_{в} = N$. Из данного свойства получаем, что разрешение по скорости $\Delta V_{в}$ определяется длительностью импульса и длиной волны:

$$\Delta V_{в} = \lambda/2\Delta\tau_{и}.$$

Чем длиннее импульс, тем лучше разрешение по скорости. Но, с другой стороны, чем длиннее импульс, тем хуже разрешение по дальности $\Delta R = C\Delta\tau_{и}/2$. В результате, для внутриимпульсной обработки сигнала получается соотношение неопределенностей:

$$\Delta R \Delta V_v = \lambda C / 4, \quad (1)$$

где ΔV_v - разрешение по скорости,
 ΔR - разрешение по дальности,
 C - скорость звука,
 λ – длина волны.

При типичной частоте зондирования раной 1,5 кГц, (длина волны $\lambda=23$ см) и длительности импульса 100 мс разрешение по скорости составит 1,1 м/с, а разрешение по дальности 17м. Для большинства метеорологических задач это вполне приемлемые величины.



Рис.1. Трехлучевой содар TRITON имеет высоту зондирования 200м.

Достоинством содаров является их относительная простота и не очень высокая стоимость, они достаточно надежно обеспечивают измерение скорости и направления ветра в диапазоне высот от 20 до 200-800 м метров при относительно высоком вертикальном разрешении (порядка 5 - 50 метров). Многочисленные сравнительные испытания подтвердили эти характеристики [9-13]..

К недостаткам следует отнести то, что излучаемый сигнал (обычно в диапазоне 1-10 кГц) является слышимым для человеческого уха и вызывает неприятные ощущения у людей, поэтому содары рекомендуется использовать вне населенных пунктов. Предельная высота зондирования сильно зависит от метеорологических условий во время измерений, снижается при наличии температурных инверсий в атмосферном пограничном слое, при сильной турбулентности и сильных ветрах [10,13]. Измерения весьма чувствительны к посторонним звукам, поэтому измерения практически невозможно проводить при высоком уровне фоновых шумов и при наличии жидких осадков.

Первые коммерческие образцы содаров появились в 70-х годах. Поскольку для приема используются высокочувствительные микрофоны, важно изолировать приемник от посторонних шумов. Для этого вокруг содара создается довольно

громоздкий поглощающий экран. Моностатические содары имеют излучатель и приемник, совмещенные в одном месте. При этом для получения двух компонент ветра требуется либо два и более излучателей, либо необходимо поворачивать моносодар на платформе.

Современные содары нередко используют антенную систему с тремя излучателями, один из которых направлен вертикально, а два других - под углом к горизонту (на север и на запад). В последнее время созданы содары с мини излучателями в виде плоской антенной решетки, либо в виде фазированной антенной решетки. Более подробная информация о принципе действия и методах обработки данных содаров имеется в специальных публикациях [9,11].

Современные маловысотные содары имеют максимальную высоту зондирования до 200 м и обычно используются для обслуживания ветровых электростанций. Примером могут служить содары TRITON (США), PCS.2000-24/LP (Германия), 4000 WE (США) и другие [13].

Вторая группа содаров с высотой зондирования до 1000 метров используется для метеорологических и экологических целей [11]. Например: 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.

Можно выделить также передвижные содары. Как правило, они устанавливаются на специальном прицепе, буксируемом автомобилем, что позволяет устанавливать его в короткие сроки в различных местах. Примеры коммерческих образцов: PCL.2000-24/LP (Германия), TRITON-mobil (США); TORAGON AB (Швеция-Германия); 4000 WS/WE (США) и другие.

Таким образом, содары являются неплохим и не очень дорогим инструментом, позволяющим проводить измерения ветра в 300-800 метровом пограничном слое атмосферы в относительно спокойных условиях (без сильного ветра и без жидких осадков).

2. Системы радиоакустического зондирования (RASS)

Принцип радиоакустического измерения скорости ветра заключается в искусственном создании в атмосфере отражающей неоднородности в виде звуковой решетки. Звуковой пакет лоцируют с помощью радара, подбирая длину волны радиолокатора такой, чтобы выполнялось условие Брэгга, а именно: длина волны радиолокатора должна быть вдвое больше длины звуковой волны [8,9]. Скорость распространения звуковой волны складывается из скорости звука, которая определяется только температурой, и скорости ветра. Проводя измерения в вертикальном направлении можно получить профиль температуры, которую затем использовать для получения скорости ветра. Удобство радиоакустики заключается в том, что скорость ветра регистрируется не на нулевых доплеровских частотах, а на частоте, сдвинутой на скорость звука. Это облегчает селекцию сигнала. Недостатки радиоакустики заключаются в искажении звуковой решетки как за счет рассеяния на турбулентности, так и за счет градиентов ветра и сильной рефракции. В результате с увеличением расстояния звуковой пакет расплывается, и отраженный радиолокационный сигнал резко ослабевает или пропадает вовсе [14]. По этой причине ветер средней силы, порядка 10 м/с, часто создает настолько неблагоприятные условия, что измерения становятся невозможными.

Система радиоакустического зондирования (**RadioAcousticSoundingSystem**). (**RASS**) состоит из содара, который дополняется радиолокатором. Поскольку все это располагается на близком расстоянии, большие усилия затрачиваются на развязку излучателя и приемника радиолокатора. Обычная высота зондирования ветра не

превышает 1 км. RASS является весьма эффективным прибором для научных исследований различных явлений в атмосфере, так как одновременно дает информацию о профилях ветра и температуры. Однако опыт использования RASS показал, что он является не оптимальным прибором для проведения сетевых метеорологических наблюдений. Это в первую очередь связано с сильной зависимостью точности измерений от метеорологических условий. Радиоакустические измерения практически невозможно проводить уже при среднем ветре, при выпадении осадков, а также при высоком шумовом фоне [8,14].

Перечислим некоторые коммерческие RASS на мировом рынке. LAP -3000 (Финляндия), приставка 482 MHz RASS (Германия), AP1000 RASS (Германия); RWP50 (США).

3. Оптические ветровые профайлеры (лидары)

Рассмотрим свойства и особенности оптических ветровых профайлеров. Условно лидарные средства для ветровых измерений можно разделить на недоплеровские и доплеровские системы.

Недоплеровские измерения основаны на измерении смещения максимума взаимной пространственно-временной корреляционной функции интенсивности, полученной на различных уровнях конуса зондирования, который описывает лазерный луч в направлении близком к вертикали. Фактически происходит слежение за перемещением неоднородностей отражаемости в горизонтальной плоскости. По времени и направлению смещения неоднородностей проводится оценка скорости и направления ветра на заданной высоте зондирования [16,17]. Недостатком такого метода является возможное невыполнение условия стационарности поля отражаемости при горизонтальном перемещении рассеивателей. При переносе аэрозолей к другому участку конуса за счет турбулентности и вертикальных перемещений центр тяжести неоднородностей смещается не так, как средний ветер, что приводит к нарастанию погрешностей измерений или невозможности их проведения. Вероятно поэтому данные методы ветрового зондирования до сих пор не нашли серийного применения.

Некогерентные доплеровские лидары.

Некогерентные доплеровские лидары регистрируют сигнал, рассеянный на аэрозолях или молекулах воздуха [18,20]. Рассеянное излучение собирают телескопическим приемником и анализируют на интерферометре. При этом происходит прямое детектирование сигнала на различных частотах (каналах). Измеряется доплеровский сдвиг частоты принятого сигнала, по которому определяют проекцию ветра на направление зондирования. При коническом зондировании это позволяет определять и скорость, и направление ветра на различных высотах. Если рассеяние происходит на аэрозолях, то получают достаточно узкий сигнал, который удобно интерпретировать. На больших высотах, где аэрозолей почти нет, основной сигнал формируется при рассеянии на молекулах воздуха. Это свойство является преимуществом метода в сравнении с доплеровскими лидарами, которые не могут работать в отсутствие аэрозолей. Однако, при молекулярном рассеянии спектр сигнала намного шире, чем при аэрозольном рассеянии, из-за чего регистрация доплеровского сдвига становится затруднительной, и требуется длительное накопление сигнала для анализа.

Примером длительного использования данной методики служит ALOMAR лидар, используемый в Норвегии для ветровых измерений в диапазоне высот 10-45 км. Лидар имеет следующие основные параметры: длина волны излучений 532 нм, частота повторения импульсов – 30 Гц, энергия в импульсе – 600 мДж, разрешение по высоте 200 м [19,20].

Данная методика, как правило, используется для зондирования верхней атмосферы. Стоимость такого лидара высока.

Когерентные доплеровские лидары (КДЛ).

В случае КДЛ рассеянное на аэрозольных частицах излучение зондирующего пучка после прохождения через приемную апертуру телескопа смешивается с опорным пучком и подается на чувствительную площадку детектора. Из измерений возникающего в цепи детектора фототока с помощью узкополосного частотного фильтра выделяется сигнал (эхосигнал), несущий информацию о доплеровском сдвиге частоты. Таким образом, в КДЛ используется лазерное гетеродинирование [21]. Необходимым условием такого гетеродинирования является выполнение жестких требований к согласованию волновых фронтов полей рассеянного излучения и опорного пучка в плоскости чувствительной площадки детектора. Эффективность гетеродинирования зависит от размера площадки когерентности рассеянного излучения по отношению к площади поперечного сечения опорного пучка [21-25]. Усиление интенсивности турбулентных пульсаций показателя преломления воздуха в атмосфере может привести к существенному уменьшению радиуса пространственной когерентности рассеянного в атмосфере зондирующего излучения в плоскости телескопа и, как результат, к падению отношения сигнал-шум до уровня, при котором измерения ветра невозможны. С высотой коэффициент аэрозольного обратного рассеяния уменьшается и в свободной атмосфере он может стать настолько малым, что информация о ветре может быть получена или при достаточно больших мощностях зондирующего лазерного излучения или с использованием специальных процедур обработки исходных данных при продолжительных лидарных измерениях.

Зондирующий лазерный пучок может быть как непрерывного, так и импульсного излучения, т.е. когерентные доплеровские лидары по этому признаку подразделяются на два типа: 1) непрерывный КДЛ и 2) импульсный КДЛ.

В случае **непрерывного КДЛ** объем зондирования формируется путем фокусировки лазерного пучка на заданное расстояние. С увеличением фокусного расстояния вместе с ростом дальности измерения происходит увеличение объема зондирования [26,27]. С помощью такого лидара информация о ветре может быть получена с расстояния 10 м, но при фокусировке зондирующего пучка на расстояние 1,5 – 2 км продольный размер объема зондирования становится сравним с дальностью измерения. Максимальная дальность измерения таким лидаром составляет 1 км [48]. Для созданного в НПП «Лазерные системы» (г. Санкт-Петербург) малогабаритного непрерывного КДЛ, марка ПЛВ -300, работающего на длине волны 1,55 мкм, максимальная дальность не превышает 300 м (<http://www.lsystems.ru>). Недостатком непрерывных КДЛ является то, что для восстановления высотного профиля ветра необходимо для каждой высоты осуществлять перефокусировку зондирующего пучка на соответствующее расстояние. Кроме того, при зондировании непрерывным излучением в луч может попадать сильно рассеивающая неоднородность, которая дает дополнительный пик в сигнал почти при любой фокусировке луча. Это затрудняет интерпретацию сигналов. Аналогичный эффект наблюдается при наличии в атмосфере облаков и фокусировке зондирующего пучка на большие расстояния. [28].

Общим недостатком непрерывных доплеровских лидаров является плохое разрешение по дальности, масштаб которого сравним с самой дальностью.

Наибольшими (по сравнению с непрерывными КДЛ) возможностями ветрового зондирования обладают **импульсные КДЛ** [29-40]. Для импульсного КДЛ объем зондирования определяется длительностью зондирующего импульса и поперечным размером лазерного пучка. Следует отметить, что при этом производится внутримпульсная когерентная обработка каждого импульса (аналогично обработке

акустических сигналов у содаров). Это накладывает ограничения на длину волны излучения λ , разрешение по скорости ΔV и по дальности ΔR , которое повторим еще раз:

$$\Delta V \Delta R = C\lambda/4, \quad (1)$$

где C - скорость света.

Из-за этого ограничения использование CO_2 лазеров становится затруднительным, т.к. при приемлемом разрешении по скорости в 1 м/с, разрешение по дальности составит почти 800 м, что представляется слишком большим значением для ветрового зондирования в пограничном слое атмосферы. Попытка добиться улучшения пространственного разрешения (уменьшения продольного размера объема зондирования) неизбежно приводит к уширению доплеровского спектра и, следовательно, к уменьшению пика полезной составляющей спектрального распределения, который в предельном случае может буквально «утонуть» в шуме.

В научной группе Стерлядкина В.В. и Горелика А.Г. созданы новые корреляционные методы внутриимпульсного зондирования, которые позволяют снять вышеприведенное соотношение неопределенности или увеличить разрешение системы в 5-8 раз. Эти методы являются новыми, пока не прошли экспериментальную апробацию, поэтому в данном обзоре на них мы останавливаться не будем.

Из соотношения (1) видно, что для получения лучшего разрешения импульсные доплеровские лидары лучше проектировать на более коротких волнах, например на ближнем ИК излучении. Однако, здесь имеется другая проблема. Для детектирования требуется согласовать на приемнике волновые фронты опорного и рассеянного излучения с точностью до десятых долей длины волны. А в коротковолновом диапазоне это технически очень непростая задача, которая дополнительно осложняется искажением фронта рассеянной волны при двукратном прохождении атмосферы.

К настоящему времени создано несколько типов импульсных КДЛ, работающих на длинах волн 10,6 мкм (лидар, построенный на основе газового CO_2 лазера) [29-32], 2 мкм [33-36], 1,5 мкм [37,38] и 1,06 мкм [39,40] (лидары, построенные на основе твердотельных лазеров). Продольный размер объема зондирования, формируемого импульсным CO_2 лазером, составляет ~ 300 м. Данный лидар при использовании конического сканирования зондирующим пучком предназначен для измерения высотных профилей скорости и направления ветра и в [32] продемонстрирована возможность восстановления профилей ветра до высоты 10 км. У 1,06-микронного лидара энергия зондирующего импульса нередко составляет 1 Дж, что позволило авторам работы [40] восстановить профили скорости и направления ветра до высоты 26 км. У 1,5-микронного лидара энергия зондирующего импульса составляет 100 мкДж, но частота повторения импульсов довольно высокая (10 кГц), что позволяет использовать аккумуляцию доплеровских спектров по большому числу посылок зондирующего импульса, и повысить точность оценки доплеровского сдвига частоты. Максимальная дальность измерения таким лидаром $\sim 1,5 - 2$ км.

Наиболее современные технологии позволили фирме LEOSPHERE (LidarEnvironmentalObservations) создать линию полностью волоконных ветровых лидаров, которые обеспечивают измерения в диапазоне высот от 40м до 6500м. Например, модель Windcubev2, по данным производителя, имеет диапазон измерений 40-200 м, с разрешением по высоте 20 м, точностью измерений скорости ветра 0.2м/с и точности измерения направления 2° . Время усреднения достигает 10 мин. Старшая модель ряда Windcube 200 по данным производителя имеет диапазон измерений 100-6000 м, с разрешением по высоте 50 м и точностью измерений скорости ветра 0.3м/с. Длина волны излучения – 1.54 мкм, когерентная доплеровская обработка сигналов,

отображение данных в требуемом формате с выводением на дисплей в текущем режиме. Достоинством этих приборов является их компактность и возможность

Недостатки производитель не отмечает, однако, при такой методике обработки сильная турбулентность и осадки резко снижает дальность измерений, а осадки, туман и облачность ограничивают всепогодность.

Учитывая изложенное, отметим, что оптические профайлеры прекрасно работают в ясную и тихую погоду, при которой радары испытывают затруднения, и наоборот, при сложных и опасных метеоситуациях: при сильной турбулентности, ветре и при выпадении осадков, наилучшие параметры имеют радары, а лидары практически не работоспособны.

На рис. 2 представлен внешний вид лидаров.



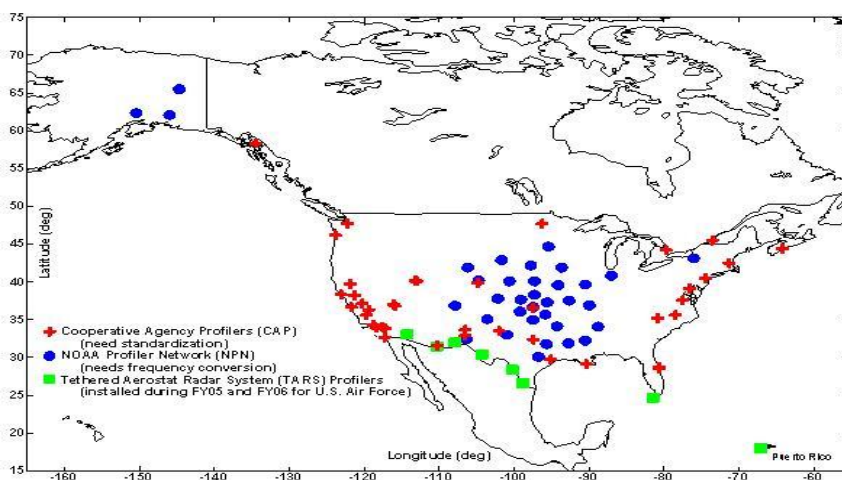
Рис.2. Слева - ветровой полностью волоконный профайлер Windcube-фирмы LEOSPHEREи справа QinetiQ/NaturalPowerZephIR.

3. Радарные ветровые профайлеры

С конца 50-х годов берет начало разработка доплеровских радиолокационных систем предназначенных для определения скорости и направления ветра на различных высотах. Для таких систем носителем информации являются неоднородности диэлектрической проницаемости различной природы, увлекаемые атмосферными потоками.

Одни из первых доплеровских метеорологических радиолокаторов миллиметрового и дециметрового диапазонов были созданы в нашей стране в ЦАО под руководством Костарева В.В., Горелика А.Г. и Мельничука Ю.В.. На базе военного доплеровской станции «Ваза» в 1961-1963 годах создана высокопотенциальная РЛС сантиметрового диапазона, а чуть позднее на базе станции «Экран-Д» дециметровая РЛС [41,42]. Был получен большой опыт их использования, изучена физика формирования сигналов в атмосфере [42,43].. Эти работы получили высокую оценку за рубежом. В дальнейшем работа с доплеровскими РЛС переместилась в МГУПИ и проводилась в научной группе под руководством профессора Горелика А.Г. [44-47]. (Защищено 9 кандидатских и 2 докторские диссертации, опубликовано свыше 100 работ в научных журналах, разработаны и эксплуатируются ряд доплеровских радиолокационных станций). В 1989 году этой группой, совместно с ИФА РАН, были созданы первые системы радиоакустического зондирования (RASS) обеспечивающие температурно-ветровое зондирование тропосферы и РЛС с ЛЧМ., [44]. К сожалению эти работы не были поддержаны финансово и не получили должного развития и внедрения.

Первая аэрологическая сеть ветровых профайлеров была сформирована в США в 1992 году [48,49] WindProfilerDemonstrationNetwork, а в Европе первая демонстрация ветровой сети была проведена в 1997 году. Проект назывался COST Wind Initiative for a Network Demonstration in Europe (European Commission) (CWINDE) [50]. В настоящее время она называется Co-ordinated WIND profiler network in Europe и координируется E-WINDPROF программой EUMETNET. В настоящее время CWINDE состоит из трех десятков профайлеров в 9 странах, большинство из которых работают на частоте 915-1280 МГц, нескольких тропосферных радаров, рассчитанных на высоты до 10 км и пяти MST радаров, обеспечивающих измерения до 30 км. Формат представления данных ASCII или BUFR. Данная сеть используется в численной модели предсказания погоды (NWPM). Аналогичные сети существуют в Японии [51] и Южной Корее [52]. В настоящее время в мире функционирует около 160 профайлеров. На рисунке 2 представлена схема расположения этих радаров на территории США.



Фигура 2. Карта с указанием местоположения различных американских и канадских сетей профайлера. Местоположения недавно установленных профайлеров с частотой 449 МГц обозначены зелеными квадратами.

Традиционно ветровые радиолокационные профайлеры Radar Wind Profilers (RWP) используют длинноволновую часть спектра частот. Полосы, в которых работают типичные профайлеры, составляют:

1. 30-60 МГц (длина волны 10м-5м)
2. 400-550 МГц (длина волны 0.75-0.55м)
3. 900-1300 МГц (длина волны 0.3м-0.23м)
4. В России для целей метеобеспечения вооруженных сил разработан доплеровский ветровой профайлер, работающий в диапазоне 35 ГГц (длина волны 8 мм).

Физика формирования сигнала в радаров отличается от содаров и лидаров тем, что за время импульса зондирования, который имеет масштаб 10^{-6} с, рассеиватели успевают сдвинуться на несколько микрон. По сравнению с длиной волны радиолокаторов это ничтожная величина, поэтому импульс освещает как бы застывший в пространстве ансамбль рассеивателей. Радар обычно излучает пачку из нескольких сотен импульсов с периодом повторения $\tau_{повт}$, который связан с дальностью зондирования R_{max} очевидным соотношением $R_{max} = c\tau_{повт} / 2$, где c - скорость света. (обычные масштабы $\tau_{повт} = 10^{-3}$ с, тогда $R_{max} = 150$ км). На фазовом детекторе приемной системы регистрируется фаза каждого импульса, которая изменяется от импульса к импульсу за счет смещения частиц за время $\tau_{повт}$. В результате на приемнике регистрируется последовательность импульсов, огибающая которых и дает

доплеровский сигнал. Такой режим измерений называют импульсно когерентным. Однако, при таком режиме существует ограничение другого рода. Связано оно с тем требованием, что за период повторения импульсов частицы не должны сдвигаться слишком сильно. Максимально допустимый сдвиг не должен превышать четверть длины волны радиолокатора. Это связано с тем, что для того, чтобы прописать синусоиду на приемнике должно быть не менее двух отсчетов на период синусоиды (теорема Найквиста). Из этого требования вытекает условие $1/\tau_{\text{повт}} = 4V_{\text{max}}/\lambda$. Чем больше диапазон измеряемых скоростей, тем выше должна быть частота повторения импульсов. При этом, очевидно будет снижаться максимальная однозначная дальность зондирования R_{max} . В результате для импульсно когерентных РЛС получаем следующее ограничение:

$$V_{\text{max}}R_{\text{max}} = c\lambda/8. \quad (2)$$

Из этого соотношения следует, что для измерения высоких скоростей на больших дальностях следует выбирать как можно большую длину волны. А переход в сантиметровый или миллиметровый диапазон, который очень привлекателен с точки зрения степени взаимодействия излучения с рассеивателями, будет ограничивать либо дальность, либо измеряемую максимальную скорость. Подробнее эта проблема будет освещена в нашем докладе на конференции.

В настоящее время не существует универсальных радиолокационных средств, позволяющих проводить измерения ветра от уровня земли во всем слое тропосферы при любых погодных условиях. Каждый тип измерителей имеет диапазон условий, в которых он работает, свои достоинства и недостатки. Остановимся подробнее на возможностях и характеристиках каждого типа радарных ветровых профайлеров.

1. Длинноволновые профайлеры диапазона 30-60 МГц имеют длину волны 10м -5 м и рассчитаны на измерения ветра от 2 до 30 км, иногда перекрывая диапазон высот до 60 км [53-56]. Их называют MST радары (Mesosphere, Stratosphere, Troposphere). Рассеивателями для такого излучения служат флуктуации показателя преломления, масштаб которых должен быть сравним с половиной длины волны (условие Брэгга). Однако, с увеличением высоты минимальный размер флуктуаций, которые связаны и инерционным масштабом турбулентности возрастает от нескольких миллиметров у поверхности Земли до нескольких метров в верхней атмосфере. По этой причине, чем больше планируемая высота зондирования, тем большие длины волн приходится использовать. Недостатками MST радаров являются:

- Необходимость большой антенной системы, размеры которой нередко превышают размеры футбольного поля,
- Большая потребляемая мощность,
- Физика формирования отражений такова, что при отклонении луча от вертикали на $5-10^0$ уровень сигнала снижается на 15-30 дБ. В результате зондирование проводят при малых отклонениях лучей от вертикали, вертикальные движения формируют большую часть доплеровского сдвига, а горизонтальная составляющая дает малую часть. Поэтому, для снижения вклада вертикальных движений приходится проводить длительное накопление сигналов, которое составляет от 20 минут до 1 часа. Погрешность измерения скорости ветра достигает 3-5 м/с.

- Диапазон используемых длин волн лежит весьма близко от традиционных рабочих полос телевидения и связи. Поэтому огромная проблема возникает при выборе места установки радара и при разработке методики выделения полезного сигнала на фоне многих сторонних максимумов. Этому посвящены специальные исследования [57].

- Источники отражений в мезосфере и стратосфере являются границы с большим градиентом индекса рефракции, которые, как правило, имеют свое перемещение в пространстве, не связанное со скоростью физического перемещения среды (с ветром). Это вносит дополнительные погрешности в измерение скорости и направления ветра.

Достоинством MST радаров является возможность практически непрерывного измерения профиля ветра до высот 20-30 км и более. Практически это единственное дистанционное средство, обеспечивающее измерения на таких высотах. Примером их использования в метеосети является Франция (5 ST радаров).

2. Ветровые радиолокационные профайлеры диапазона 400-550 МГц имеют намного большее применение в аэрологических наблюдениях [57-60]. В частности они составляют основу американской сети ветровых профайлеров NOAA. Они имеют высоту зондирования, перекрывающую всю тропосферу до высоты тропопаузы (до 10-16 км). Размеры антенной системы составляют порядка 100 м^2 - 170 м^2 (13*13м), а высотное разрешение профайлеров 200-500 м. Источником отражений, как правило, являются неоднородности показателя преломления небольшого размера по сравнению с масштабом зондируемого объема. Внутренний масштаб турбулентности на высотах свыше 10 км составляет 10-30 см. Интенсивность рассеянного сигнала обычно очень мала и близка к пределу чувствительности приемника (составляет приблизительно - 150 дВм (10^{-18} Вт), поэтому для измерения ветрового профиля требуются большие антенны и высокая чувствительность приемников. Высокая чувствительность приемника приводит к тому, что на малых дальностях велика вероятность ложных сигналов от приземных источников (от деревьев, зданий) за счет боковых лепестков. По этой причине измерения на малых высотах практически невозможны.

К недостаткам дециметровых и метровых профайлеров относятся:

- Наличие радиопомех наземных телевизионных систем и радиоисточников.
- Наличие «мертвой зоны» в нижнем пограничном слое атмосферы до высот 300-500м.
- Уменьшение точности измерений при наличии осадков, т.к измерения проводятся при малых отклонениях от вертикали, а при этом велико влияние гравитационного падения рассеивателей.
- Для выбраковки данных требуется много усилий на уровне первичной обработки сигналов. Аппаратурная выбраковка практически невозможна. Это требует квалифицированного персонала.
- Сложность аппаратуры, которая требует регулярного квалифицированного обслуживания.

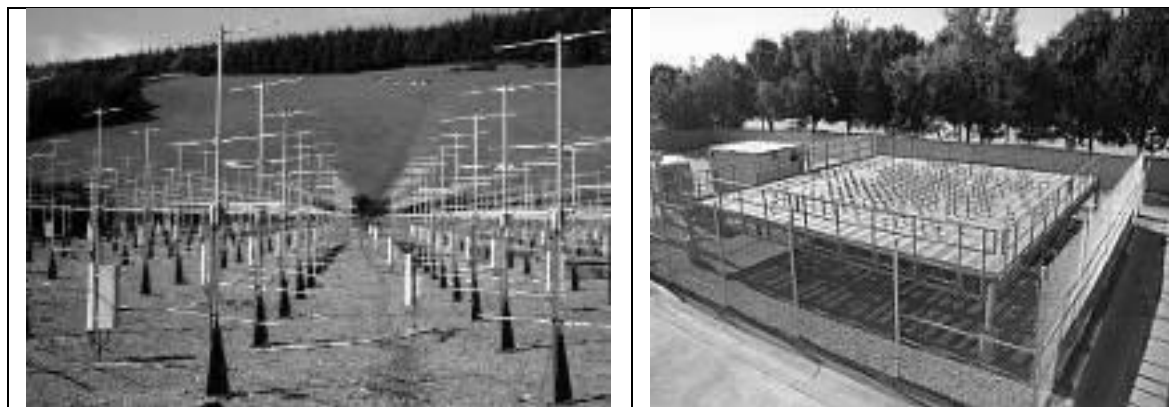


Рис.3. Слева –MST радары, которые имеют площадь антенны порядка $100*100\text{ м}^2$,справа - радар диапазона 500 МГц, имеет площадь антенны $13*13$ метров.

3. Наибольшее распространение в существующих ветровых сетях начинают получать профайлеры L-диапазона, 900-1300 МГц (длина волны 0.3м-0.23м) [49-51]. В частности сеть профайлеров Японии состоит из 31 радара с частотой излучения 1300МГц. Высота зондирования для них составляет 2500 м — 5000 м в зависимости от длительности импульса и мощности излучения. В современном исполнении они выполнены на двойной фазированной антенной решетке, размер которой составляет примерно 3*3 метра. Примером такого профайлера может служить «PCL-1300» компании DegreanHorizon (Франция). Он является импульсным радаром с рабочей частотой 900-1300МГц. Отличительной особенностью является наличие 3х антенн выполненных в виде фазированных решеток и принимающих сигнал одновременно с 3 направлений.

4.



Рис.4. Типичный радар L диапазона использует три антенные решетки, направленные вверх и в две взаимно перпендикулярные стороны.

Система выполняется без поглощающей защиты, а это приводит к значительному влиянию боковых лепестков, которые при высокой чувствительности приемника регистрируют шумы и ложные сигналы от близлежащих деревьев и всех проезжающих видов транспорта. Это приводит к тому, что, несмотря на заявленную высоту зондирования с 150 м, фактическая высота измерений начинается нередко с 500 м. Специальный алгоритм «многопиковой обработки сигналов» позволяет лишь частично подавить «местники».

Недостатки данных профайлеров те же, что и у профайлеров диапазона 450 МГц, однако они выражены в меньшей степени. К основным недостаткам следует отнести ухудшение точности при выпадении осадков, сильном ветре и турбулентности. При этих условиях приходится дополнительно накапливать сигнал для компенсации вертикальных движений. С другой стороны, в условиях низкой турбулентности и температурной однородности дециметровые профайлеры могут не регистрировать сигнал, не обеспечивать заявленные характеристики и получение ветрового профиля. Нередки ситуации, когда при проведении суточных измерений приемлемый уровень сигнала появлялся при прогреве атмосферы после 10-11 часов дня и пропадал в ночное время и утренние часы.

4. Большой интерес с точки зрения ветрового зондирования представляют системы миллиметрового диапазона длин волн. В сложившейся мировой практике миллиметровый диапазон длин волн считался неперспективным и фактически не использовался. Причина - слабые отражения в ясную погоду, когда отсутствуют осадки и облака, а сигнал формируется от флуктуаций показателя преломления.

Нижний масштаб турбулентности на высотах выше 3 км превышает 10 см, поэтому береговые условия формирования отражений для миллиметровых волн становятся невозможными, и сигналы обратного рассеяния на этих высотах почти всегда отсутствуют. Однако ситуация изменяется, если цель профайлера - пограничный слой атмосферы, где ветер наиболее изменчив и нужен практически всем потребителям, а также опасные метеоусловия, сопровождаемые облаками, осадками, умеренным или сильным ветром. В таких условиях миллиметровый диапазон является наиболее приемлемым и перспективным. Если оценить возрастание сигнала при переходе от традиционных 30 сантиметров к 8 мм по формуле Рэля D^6/λ^4 , то мы получим выигрыш на 6 порядков. Рассмотрим рис. 5, на котором представлены графики радиолокационной отражаемости для различных источников формирования отраженных сигналов в зависимости от длины волны.

На графике горизонтальной стрелкой показан порог чувствительности (регистрации сигнала) для рассматриваемого экспериментального образца миллиметрового импульсно когерентного радиолокатора, рассчитанный для дальности зондирования 1000м. Из графиков видно, что в диапазоне 8 мм заметный вклад в отраженный сигнал начинают вносить аэрозольные частицы, которые почти всегда присутствуют в нижней атмосфере. Турбулентность средней и высокой интенсивности также может участвовать в формировании сигналов. Особую роль играют облака. Их отражаемость заметно превышает порог обнаружения почти для всех типов облаков. Это означает, что в миллиметровом диапазоне, велика вероятность получения сигналов в нижнем приземном слое атмосферы. Кроме того, почти все виды облаков формируют отраженный сигнал достаточного уровня и дадут информацию о ветре во всем слое облаков. Если учесть, что в средней полосе России "ясная" безоблачная погода составляет менее 30% времени, то миллиметровая РЛС будет работоспособна до высоты облаков в 70% случаев.

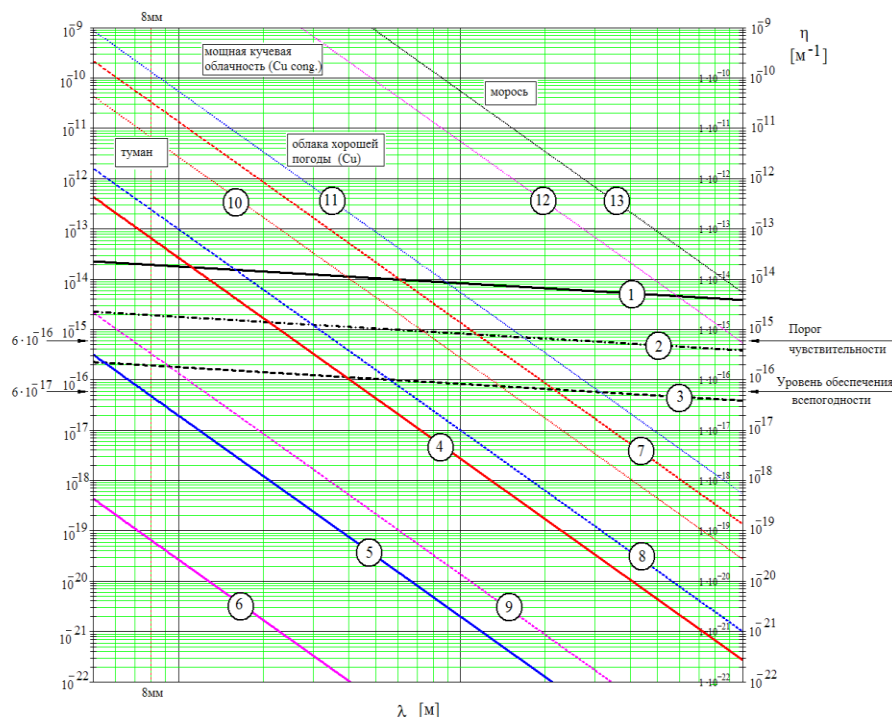


Рис. 5. Зависимости удельной радиолокационной отражаемости η от длины волны для различных метеобъектов: 1, 2, 3 – турбулентность с $C_n^2=10^{-14}$, 10^{-15} , 10^{-16} соответственно, 4, 5, 6 – для капли диаметром 100мкм, 30мкм, 10мкм соответственно с концентрацией 1 капля в м³, 7, 8, 9 – для концентрации 500 капель в м³ диаметром 100мкм, 30мкм, 10мкм соответственно, 10 – туман, 11 – облака хорошей погоды, 12 – мощная кучевая облачность, 13 – моросящий дождь.

Наименее благоприятными с точки зрения обнаружения сигналов является безоблачная погода со слабым ветром. В этом случае высота зондирования может быть снижена до 200-300м, либо отражения не будет регистрироваться вовсе. Однако, эти метеоситуации довольно редки и не являются важными для потребителей. Наиболее значимой для большинства потребителей метеоинформацией являются ситуации, связанные с подходом или прохождением фронтов, когда присутствуют облака или осадки, интенсивная турбулентность и сдвиг ветра. В этих случаях достаточный для регистрации уровень сигналов возникает как за счёт турбулентности, так и за счёт крупного и среднего аэрозолей.

В России разработка ветровых систем миллиметрового диапазона проводилась с 1980 года на базе Московского государственного университета приборостроения и информатики (МГУПИ). Были разработаны новые методы доплеровской томографии, корреляционной доплеровской томографии, использующие непрерывные немодулированные РЛС, которые позволяли проводить измерения в нижнем 1000 метровом слое атмосферы при наличии осадков [45,46,61]. В 1990 году по заказу Министерства обороны МГУПИ приступило к разработке малогабаритного ветрового профайлера. Была обоснована идеология построения ветрового профайлера, методика измерений и алгоритмы программного обеспечения [47]. Экспериментальный образец, опытные образцы и программное обеспечение изготавливались в ОАО ЦКБА г. Тула[62].

Натурные испытания экспериментального образца РЛС, которые проводились в Туле, в целом подтвердили ожидания разработчиков. На рис. 6 красным цветом показана вероятность получения радиолокационной информации о вертикальном профиле ветра в зависимости от высоты полученная с помощью экспериментального образца РЛС, в летний период. На том же рис.6 синим цветом показана вероятность получения сигналов на различных высотах для опытного образца РЛС, который имел несколько худшие по сравнению с экспериментальным образцом параметры. Статистический объем данных составляет более 1760 циклов измерений и получен в процессе проведения сравнительных натурных испытаний на базе ИЭМ ФГБУ «НПО «Тайфун», г. Обнинск в различные сезоны 2011 года.

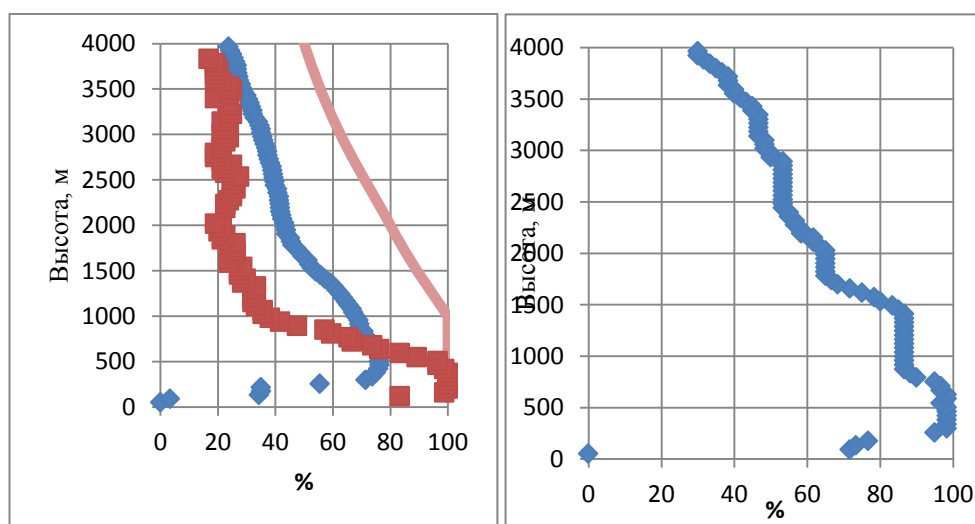


Рис. 6. Красные прямоугольники – статистика (в %) получения сигналов от высоты измерений на экспериментальном образце, (летний период). Синие ромбы- статистика, полученная для опытного образца во все сезоны 2011 года. Сплошная линия ожидаемая статистика для перспективного изделия.

Рис. 7. Надежность получения данных в случае выпадения осадков.

Для таких систем рассеивателями являются мелкий и крупный аэрозоль, осадки любого типа и практически большинство типов облаков. Наилучшие технические показатели такие профайлеры демонстрируют в неблагоприятных погодных условиях, при сильном ветре, в осадках, туманах, облачности, т.е. в тех условиях, когда другие типы профайлеров либо не работают, либо теряют заявленную точность. На рис. 7 показана вероятность получения результатов в условиях выпадения осадков.

Достоинством рассматриваемых профайлеров являются:

- Компактность и малое энергопотребление,
- Работоспособность в неблагоприятных и опасных метеоусловиях,
- Неприязательность к обслуживанию (1 оператор без инженерной подготовки)
- надежность системы: работоспособность независимо от погодных условий при температуре от минус 40 до плюс 55 °С, влажности до 95%, на высоте до 3000 м над уровнем моря, при наземном ветре до 30 м/с.

На рис. 8 представлена фотография 8 мм ветрового профайлера, который прошел все виды климатических и натуральных испытаний, и в настоящее время планируется поставка на вооружение МО РФ.



Рис.8. Ветровой профайлер миллиметрового диапазона длин волн 1Б67-1. (Тула, ЦКБА)

Недостатками миллиметровых профайлеров являются – возможность пропуска измерений из-за слабого отраженного сигнала в спокойной метеорологической ситуации, при ясной безоблачной атмосфере, слабом ветре.

В заключение обзора существующих средств ветрового зондирования отметим, что в настоящее время в мире не существует универсально профайлера, обеспечивающего измерение ветра в любых погодных условиях. Лидары и содары хороши для пограничного слоя атмосферы при отсутствии осадков и несильном ветре. При сложных погодных условиях: в осадках, сильном ветре, при туманах или облачности отличные характеристики демонстрируют радары миллиметрового диапазона. Совместное использование содара или лидара с миллиметровым радиолокатором обеспечит всепогодность ветровых измерений в пограничном 1000 метровом слое. Если же требуется измерять ветер во всем слое тропосферы, от 30 до 10000 метров, то здесь следует дополнительно опираться на профайлеры дециметрового диапазона. При этом обеспечение всепогодности измерений профилей ветра возможно только при комплексном использовании дециметрового профайлера и профайлера миллиметрового диапазона длин волн или лидара (содара). Отметим еще экономическую сторону. В России имеются все условия для выпуска дециметровых

профайлеров, как с точки зрения предприятий, которые уже выпускают подобную технику для решения оборонных задач, так и в плане наличия профессионалов, которые глубоко понимают метеорологическую специфику и имеют большой опыт проведения радарных метеорологических измерений. Однако, до настоящего времени производство ветровых профайлеров в России не налажено, хотя имеется высокая потребность как со стороны Росгидромета, так и со стороны множества других потребителей.

Литература

1. Иванов В.Э., Фридзон М.Б., Ессяк С.П. Радиозондирование атмосферы.// 2004, Екатеринбург, с.596.
2. Sun B., A.Reale, D.J.Seidel, and D.C.Hunt. Comparing radiosonde and COSMIC atmospheric profile data to quantify differences among radiosonde types and the effects of imperfect collocation on comparison statistics. *Journal of Geophysical Research*, 2010, vol.115, pp. 1-16.
3. Обухов А.М. О рассеянии звука в турбулентном потоке. Докл. АН СССР. 1941. т.30. С. 611.
4. Татарский В.И. К теории распространения звуковых волн в турбулентном потоке. ЖЭТФ. 1953. Т.25. с. 74.
5. Gilman G.N. et al. Reflection of sound signals at the troposphere. *J. Acoust. Soc. Amer.* 18, 1946. 274-283.
6. Kraichnan R.H. The scattering of sound in turbulent medium. *J. Acoust. Soc. America*. 1953. V.25.N.11.P.1096-1104.
7. Монин А.С. Некоторые особенности рассеяния звука в турбулентной атмосфере. Акустич. журн. 1961. Т. VII. Вып.4. С. 457-461.
8. Каллистратова М.А., Кон А.И. Радиоакустическое зондирование атмосферы. Москва, Наука, 1985, с.198.
9. Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя.// 2001, Томск, СО РАН, с.280.
10. Finkelstein, P.L., J.C. Kaimal, J.E. Gaynor, M.E. Graves, and T.J. Lockhart. Comparison of wind monitoring system, part II. Doppler SODARs. 1986. *J. Atmos. Ocean Technol.*, 3, 594-604.
11. Новицкий М.А., Н.Ф. Мазурин, Л.К. Кулижникова, О.Ю. Калинчева, Л.А. Терев, Д.Р. Нечаев, В. Л. Сапронов. Сравнение данных измерений ветра при помощи выпускаемого промышленностью содара и Высотной метеорологической мачты в Обнинске. *Метеорология и гидрология*, 2011, № 10, с.74-83.
12. Crescenti, G.H. A study to Characterize Performance Statistics of Various Ground-Bases Remote Sensors. NOAA TMERL, ARL – 229, Air Resources Laboratory, Silver Springs, Maryland. 1999:
13. Antoniou I., Jurgensen H.E., Hunerbein S., et al. Inter-comparison of commercially available SODARs for wind energy application. In: *Proc. of 12-th Intern. Symp. on Acoustic Remote Sensing*. Cambridge, UK, 2004, pp.136-139.
14. Strauch, R.G., K.P. Moran, P.T. May, A.J. Bedard, and W.L. Ecklund, 1988: RASS temperature sounding techniques. NOAA Tech. Memo, ERL WPL-158.
15. North, E.M., A.M. Peterson, H.D. RASS, a remote sensing system for measuring low-level temperature profiles. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 54, No 9, 1973. 912-918.
16. Зуев В.Е., Ельников А.В., Бурлаков В.Д. Лазерное зондирование средней атмосферы. Томск: «ООО изд. «Раско», 2002. 352 с
17. Weitkamp C. Lidar: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere. *Springer series in optical sciences*. 2005. V. 102. 456 p

18. Chanin M.L., Garnier A., Hauchecorne A., Porteneuve J. A Doppler lidar for measuring winds in the middle atmosphere // *Geophys. Re. Lett.* 1989. V. 16. P. 1273-1276.
19. Rees D., McDermid I.S. Doppler lidar atmospheric wind sensor: Reevaluation of a 355-nm incoherent Doppler lidar // *Applied Optics.* 1990. V. 29. P. 4133-4157.
20. Rees D., Nelke G., Fricke K.-H., von Zahn U., Singer W., von Gossert G., Lloyd N.D. The Doppler wind and temperature system of Alomar lidar // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1996. V. 58. P. 1827-1842.
21. Протопопов В.В., Устинов Н.Д. Лазерногетеродинамирование. М.: Наука. 1985. 288с.
22. Frehlich R.G. Conditions for optimal performance of monostatic coherent laser radar // *Optics Letter.* 1990. V. 15. P. 643-645.
23. Frehlich R.G., Kavaya M.J. Coherent laser radar performance for general atmospheric turbulence // *Applied Optics.* 1991. V. 30. P. 5325-5337
24. Zhao Y., Post M.J., Hardesty R.M. Receiving efficiency of Monostaticpulsed coherent Lidars. 1: Theory // *Applied Optics.* 1990. V. 29. N 28. P. 4111-4119.
25. Lawrence T.R., Wilson D.J., Craven C.E., Jones I.P., Huffaker R.M., Thomson J.A.L. A laser velocimeter for remote wind sensing // *The Review of Scientific Instruments.* 1972. V. 43. N 3. P. 512-518.
26. Sonnenschein C.M., Horrigan F.A. Signal-to-noise relationship for coaxial systems that heterodyne backscatter from the atmosphere // *Applied Optics.* 1971. V. 10. N 7. P. 1600-1604.
27. Köpp F., Schwiesow R.L., Werner Ch. Remote measurements of boundary layer wind profiles using a cw Doppler lidar // *Journal of Climate Applied Meteorology.* 1984. V.23. N1. P. 148-158
28. Ch., Köpp F., Schwiesow R.L. Influence of clouds and fog on LDA wind measurements // *Applied Optics.* 1984. V. 23. P. 2482-2487.
29. Smalikho I. N. Techniques of wind vector estimation from data measured with a scanning coherent Doppler lidar // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology.* 2003. V. 20. N2. P. 276-291.
30. Hall F. F., Huffaker R. M., Hardesty R. M., Jackson M. E., Lawrence T. R., Post M. J., Richter R. A., Weber B. F. Wind measurement accuracy of the NOAA pulsed infrared Doppler lidar // *Applied Optics.* 1984. V. 23. N 15. P. 2503-2506.
31. Gordienko V.M., Kormakov A.A., Kosovsky L. A., Kurochkin N. N. Pogosov G.A., Priezhev A.V., Putivskii Y.Y. Coherent CO₂lidars for measuring wind velocity and atmospheric turbulence // *Optical Engineering.* 1994. V. 33. N 10. P. 3206-3213.
32. Reitebuch O., Werner Ch., Leike I., Delville P., Flamant P.H., Cress A., Engelbart D. Experimental Validation of Wind Profiling Performed by the Airborne 10-m Heterodyne Doppler Lidar WIND // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology.* 2001. V.18. N 8. P.1331-1344.
33. Henderson S.W., Hale C.P., Magee J.R., Kavaya M.J., Huffaker A.V. Eye-safecoherentlaserradarsystemat 2-musingTm. Ho: YAG lasers // *Optics Letters.* 1991. V. 16. P. 773-775.
34. Henderson S.W., Suni P.J.M., Hale C.P., Hannon S.M., Magee J.R., Bruns D.L., Yuen E.H. Coherentlaserradarat 2-musingsolid-statelasers // *IEEETrans. Geosci. Remote Sens.* 1993. V. 31. N 1. P. 4-15.
35. Grund C.J., Banta R.M., George J.L., Howell J.N., Post M.J., Richter R.A., Weickman A.M. High-resolution Doppler lidar for boundary layer and cloud research // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology.* 2001. V. 18. N 3. P. 376-393.
36. Hannon S.M. Wind resource assessment using long range pulsed Doppler lidar // *Proceedings of the 15th Coherent Laser Radar Conference.* Toulouse, France. 2009. P.59-62.

37. Kameyama S., Ando T., Asaka K., Hirano Y., Wadaka S. Compact all-fiber pulsed coherent Doppler lidar system for wind sensing // *Applied Optics*. 2007. V. 46. N 11. P. 1953 – 1962.
38. Pearson G., Davies F., Collier C. An analysis of the performance of the UFAM pulsed Doppler lidar for observing the boundary layer // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2009. V. 26. P. 240 -250.
39. Kane T.J., Kozlovsky W.J., Byer R.L., Byvik C.E. Coherent laser radar at 1.06 μ m using Nd:YAG lasers // *Optics Letters*. 1987. V. 12. P. 232-241.
40. Kavaya M.J., Henderson S.W., Magee J.R., Hale C.P., Huffaker R.M. Remote wind profiling with a solid-state Nd:YAG coherent lidar systems // *Optics Letters*. 1989. V. 14. P. 776-778.
41. Горелик А.Г., Мельничук Ю.В. О связи спектра флуктуаций радиолокационного сигнала с движением рассеивателей в метеообъектах.. *ДАН СССР*. Т. 140, «3, 1961, 579-582.
42. Горелик А.Г., Костарев В.В., Черников А.А. Новые возможности радиолокационных ветровых измерений. *Метеорология и гидрология*, 1962\62, №7, с 34-40.
43. Горелик А.Г., Мельничук Ю.В., Черников А.А. Связь статистических характеристик радиолокационного сигнала с динамическими процессами и микроструктурой метеообъектов. *Труды ЦАО*, 1963, вып.48, с. 29-36.
44. Жежерин В.Р., Князев Л.В. Применение радара с частотной модуляцией для исследования пограничного слоя атмосферы. *Изв. АН СССР, ФАО*, 1985, т.21, №3, с.277-284.
45. Горелик А.Г., Стерлядкин В.В. Ветровое зондирование атмосферы с помощью непрерывных доплеровских систем. *Изв. АН СССР. ФАО*. 1986, т.22, №7 с. 720-727.
46. Горелик А.Г., Стерлядкин В.В. Доплеровская томография в радиолокационной метеорологии. *Изв. АН СССР. ФАО*. 1990, т.26, №1 с. 47-54.
47. Стерлядкин В.В. Кононов М.А., Быковский . Оценка погрешности измерения профиля ветра методом круговых диаграмм с применением метеорологической радиолокационной станции миллиметрового диапазона длин волн. *Научный вестник МГТУГА, сер. Радиотехника*, № 176, 25-30
48. Barth, M., Chadvik, R., Van de Kamp, D., Data processing algorithms, used by NOAA's wind profiler demonstration network, *Ann. Geophys.*, 12, 518-528, 1994.
49. Schlatter, T.V., and (Editors), F.S.Z., Wind profiler assessment report, Tech report NOAA, U.S. Dept. of Commerce, Silver Spring, MD, available from NOAA Forecast Systems Laboratory, 325 Broadway, Boulder, CO, 80303, 1994.
50. Nash, J. And Oakley, T.J., Development of COST -76 wind profiler network in Europe, *Phys. Chem. Earth (B)*, 26, 193-199, 2001.
51. Ishihara, M., and al. Characteristics and performance of the operational wind profiler network of the Japan Meteorological Agency, *J. Meteor. Soc. Japan*, 84, 1085-1096, 2006.
52. Park, S.-G. And Lee, D.-K., Retrieval of high-resolution wind field over the Southern Korean peninsula using the Doppler weather radar network, *Wea. Forecasting*, 24, 87-103, 2009.
53. Beran, D.W., 1997: Operational use of ground-based remote sensors: a review. *WMO/TD-No 860*.
54. Schwieson, R.L., 1986: A comparative Overview of Active Remote Sensing Techniques. In: *Probing the Atmospheric Boundary Layer*, D.H. Lenschow Ed.
55. Van Baelen, J.S., and A.D. Richmond, 1991: Radar Interferometry Technique: Three-Dimensional Wind Measurement Theory. *RadioSci.*, 26, 1209-1218.

56. 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, IOM Report N 89, WMO/TD N 1309, Geneva, Switzerland, 2006, pp. 39.
57. Lehmann V. Use of radar wind profilers in operational networks. 2011.
58. May, P. T. and Strauch, R. G., Reducing the effect of ground clutter on wind profiler velocity measurements, J. Atmos. Oceanic Technol., 15, 579–586, 1998.
59. Law, D., McLaughlin, S., Post, M., Weber, B., Welsh, D., Wolfe, D., and Merritt, D., An electronically stabilized phased array system for shipborn atmospheric wind profiling, J. Atmos. Oceanic Technol., 19, 924–933, 2002.
60. Chilson, P. B., Muschinski, A., and Schmidt, G., First observations of Kelvin-Helmholtz billows in an upper-level jet stream using VHF frequency domain interferometry, Radio Sci., 32, 1149–1160, 1997.
61. Стерлядкин В.В. Корреляционно доплеровская реконструкция поля скоростей // Известия АН СССР, сер. Физика атмосферы и океана. —1994. —Т.30, №5.—с.623-629.
62. Новые возможности для метеообеспечения. Арсенал. Военно-промышленное обозрение. 5, (23) 2010,124-126.