

Определение полного вектора скорости ветра в заданной области. Сравнение полученных результатов с измерениями ДМРЛ-С и данными аэрологических наблюдений

Д.В. Козлов, Д.А. Рыбак

Акционерное общество Центральное конструкторское бюро аппаратостроения
300034, г. Тула, ул. Демонстрации, 36
E-mail: gp@cdbae.ru

Предложен метод восстановления параметров поля ветра в нижнем слое тропосферы, основанный на информации о радиальной составляющей доплеровской скорости отражателей. Работоспособность метода подтверждается проведенным сопоставлением усредненной скорости горизонтального ветра с данными аэрологического зондирования атмосферы как в режиме кругового радиолокационного обзора, так и в условиях секторного сканирования, что особенно важно при разработке аэродромного оборудования, функционирующего в режиме непрерывного контроля глиссады.

Ключевые слова: опасные явления погоды, динамические характеристики атмосферы, доплеровский метеорологический радиолокатор, аэрологическое зондирование атмосферы, восстановление поля ветра, сдвиг ветра, аэродромная зона.

Determination of the full vector of wind speed in a given area. Comparison of the obtained results with the measurements of DMRL-C and the data of aerological observations

D.V. Kozlov, D.A. Rybak

Join Stock Company Apparatus Development.

A method for reconstructing the parameters of the wind field in the lower troposphere based on information on the radial component of the Doppler velocity of reflectors is proposed. The operability of the method is confirmed by the comparison of the average horizontal wind speed with the data of aerological sounding of the atmosphere both in the all-round radar survey mode and in sectoral scanning conditions, which is especially important when developing aerodrome equipment operating in the mode of continuous control glide path.

Keywords: dangerous weather phenomena, dynamic characteristics of the atmosphere, Doppler weather radar, upper-air sounding of the atmosphere, wind field reconstruction, wind shear, airfield zone.

Введение

В связи с авиационными происшествиями, вызванными сдвигом ветра в районе взлетно-посадочной полосы (ВПП), Приложение 3 ИКАО [1] предписывает органам управления воздушного движения (УВД) предупреждать экипаж воздушных судов о локальных динамических возмущениях в атмосфере с периодичностью обновления не менее 1 раза в минуту [2]. В настоящий момент информация о наблюдаемом сдвиге может быть получена с борта воздушных судов (ВС) в виде сообщений PIREP и AMDAR, либо с наземных средств дистанционного мониторинга. Практика бортового оповещения недостаточно надежна ввиду того, что может быть получена в случае, когда хотя бы одно воздушное судно уже прошло опасную зону и стало объектом повышенного риска для пассажиров и экипажа. Поэтому в настоящее время, в соответствии с Глобальным

аэронавигационным планом ИКАО, во всем мире, и в нашей стране в частности, взят курс на разработку наземных дистанционных средств зондирования нижнего слоя атмосферы.

В нашей стране, с началом программы модернизации радиолокационной метеорологической сети Росгидромета, к задачам авиационного метеообеспечения привлекаются доплеровские метеорологические радиолокаторы С-диапазона (ДМРЛ-С) сети штормового оповещения Росгидромета. Важным преимуществом ДМРЛ-С в сравнении с некогерентными МРЛ, образующими основу сети в конце прошлого столетия, является работа в круглосуточном автоматизированном режиме измерений отражаемости и скорости метеообразований с 10-минутным темпом обновления получаемой информации. Однако, информация ДМРЛ-С, являясь существенным дополнением к данным наземных наблюдений как при анализе и прогнозе атмосферных процессов, так при уточнении местоположения явлений погоды, влияющих на взлёт и посадку ВС, не в полной мере удовлетворяет запросам авиационных потребителей. Особенно это касается обнаружения локальных динамических возмущений, связанных с маловысотным сдвигом ветра и атмосферной турбулентностью в районе ВПП. Повышенные требования к разрешающей способности радиолокационных продуктов и их достоверности в каждом дискрете представления оказываются недостижимыми для «сетевых» ДМРЛ. Это связано как с конструктивно-эксплуатационными особенностями размещения радиолокационного оборудования относительно аэродрома [3], так с ограничениями методов сбора и обработки информации ДМРЛ.

В работе обсуждаются особенности одного из методов восстановления поля горизонтального ветра VAD (Velocity Azimuth Display) [4], реализованного в программном обеспечении вторичной обработки ДМРЛ-С. На основании сопоставления радиолокационных данных о скорости и направлении воздушного потока с данными температурно-ветрового зондирования подтверждена работоспособность метода в условиях однородного воздушного потока при наличии гидрометеоров в элементах разрешения, расположенных на одной высоте и наблюдаемых под разными азимутами.

Для проверки работоспособности метода VAD в условиях частичной облачности была смоделирована ситуация, когда в расчёт брались элементы разрешения ограниченного сектора, включающего траекторию полёта аэрологического зонда. Как и следовало ожидать, качество результатов восстановленного поля ветра находится на низком уровне.

Предложен метод оценки полного вектора скорости ветра, показавший приемлемые (в сравнении с VAD) результаты восстановления параметров горизонтального ветра в вышеописанных ситуациях. Данное обстоятельство позволяет рассматривать предложенный метод как альтернативу существующему VAD в радиолокационном оборудовании секторного сканирования, когда задача измерения параметров ветра с приемлемым для авиации пространственно-временным разрешением является приоритетной.

Описание общего подхода

Базовым продуктом ДМРЛ-С является поле горизонтального ветра и вертикальный профиль его параметров (скорость, направление), восстановленные на основании информации о радиальной составляющей скорости V_r совокупности отражателей. В этом заключается основной недостаток дистанционных средств измерения динамических характеристик атмосферы: оценивается не истинный вектор скорости метеоцелей, а его проекция на ось антенного луча ДМРЛ, определяемая выражением:

$$V_r = \vec{V} \times \vec{r}, \quad (1)$$

где \vec{V} – вектор скорости ветра, $\vec{r} = \vec{i} \cos \alpha \cos \beta + \vec{j} \sin \alpha \cos \beta + \vec{k} \sin \beta$ – вектор, в направлении которого определяется скорость, $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ – орты осей X, Y, Z связанной системы координат, α, β – направления измерения ДМРЛ-С по азимуту и углу места соответственно.

Поскольку $\vec{V} = \vec{i}V_x + \vec{j}V_y + \vec{k}V_z$, то из (1), в предположении однородности поля ветра на заданной высоте, следует:

$$V_r = V_x \cos \alpha \cos \beta + V_y \sin \alpha \cos \beta + V_z \sin \beta \quad (2)$$

Таким образом, задача сводится к оценке трёхмерного векторного поля (V_x, V_y, V_z) средней скорости ветра на основе измеренного значения V_r .

Алгоритм оценки горизонтального поля ветра. Постановка задачи

Поле горизонтального ветра (V_x, V_y) в ДМРЛ-С, оснащенного программой обработки и отображения данных «ГИМЕТ-2010», рассчитывается на основе метода VAD [4]. Основными его допущениями являются постоянство ветра на заданной высоте и пренебрежение вертикальными компонентами скорости V_z . Хорошим объектом для этого метода являются слоистообразная облачность и обложные осадки, характеризующиеся интенсивными отражениями и достаточно гладкими полями ветра. Если ветер пространственно однороден, то в координатах «азимут-скорость» V_r изменяется по синусоидальному закону, фаза и амплитуда синусоидальной кривой определяются направлением и модулем скорости ветра соответственно (рис. 1).

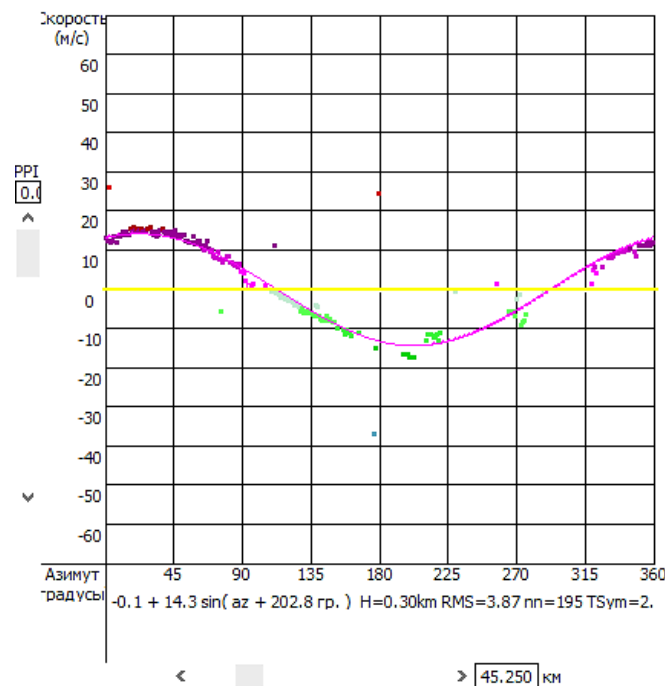


Рис. 1. Пример отображения $V_r(\alpha)$ (окно VAD)

В действительности же:

- ветер изменяется во времени и в пространстве, особенно, в сложной орографии приземного слоя;
- в условиях конвективной облачности при наличии мощных восходящих потоков вертикальная компонента скорости V_z вносит существенный вклад в поле локальной (связанной с каждым облаком) циркуляции и может быть недооценена в процессе восстановления полного вектора скорости и связанного с ним дальнейшего расчета сдвигов ветра;

• в случае частичной (разрозненной) облачности, в особенности внутримассового происхождения, результат конического азимутального сканирования может давать некорректные результаты ввиду имеющихся пробелов в данных $V_r(\alpha)$.

Алгоритм оценки полного вектора скорости ветра

Целью настоящей работы была проверка работоспособности метода, основанного на оценке значений трёх проекций полного вектора скорости. В основе метода идея, реализованная в работе [5], с той лишь разницей, что по известным (измеренным ДМРЛ-С) оценкам V_r оценивается ветер не на плоскости, а в объеме пространства.

Таким образом, входными данными является двумерный массив M_{nm} , состоящий из векторов $[V_{rij}, \alpha_{ij}, \beta_{ij}]$, где V_{rij} – значение измеренной ДМРЛ радиальной скорости ветра, α_{ij} и β_{ij} – направления измерений по азимуту и углу места соответственно, $i = 1 \dots n$, n – количество измерений, $j = 1 \dots m$, m – количество элементов дальностей. Структура массива M_{nm} представлена в таблице 1.

Таблица 1. Структура массива данных M_{nm}

	1	...	n
1	$[V_{r11}, \alpha_{11}, \beta_{11}]$...	$[V_{r1n}, \alpha_{1n}, \beta_{1n}]$
...	...	$[V_{rij}, \alpha_{ij}, \beta_{ij}]$...
m	$[V_{rm1}, \alpha_{m1}, \beta_{m1}]$...	$[V_{rmn}, \alpha_{mn}, \beta_{mn}]$

Значения составляющих скорости ветра (V_x, V_y, V_z) в каждом элементе дальности j определяются из (2) методом наименьших квадратов (МНК) из следующих соотношений:

$$\begin{pmatrix} V_{xj} \\ V_{yj} \\ V_{zj} \end{pmatrix} = M_j^{-1} B_j,$$

где

$$B_j = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n V_{rij} k_{1ij} \\ \sum_{i=1}^n V_{rij} k_{2ij} \\ \sum_{i=1}^n V_{rij} k_{3ij} \end{pmatrix}, \quad M_j = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n k_{1ij}^2 & \sum_{i=1}^n k_{1ij} k_{2ij} & \sum_{i=1}^n k_{1ij} k_{3ij} \\ \sum_{i=1}^n k_{1ij} k_{2ij} & \sum_{i=1}^n k_{2ij}^2 & \sum_{i=1}^n k_{2ij} k_{3ij} \\ \sum_{i=1}^n k_{1ij} k_{3ij} & \sum_{i=1}^n k_{2ij} k_{3ij} & \sum_{i=1}^n k_{3ij}^2 \end{pmatrix},$$

$$k_{1ij} = \sin(\alpha_{ij}) \cos(\beta_{ij}), \quad k_{2ij} = \cos(\alpha_{ij}) \cos(\beta_{ij}), \quad k_{3ij} = \sin(\beta_{ij}).$$

В качестве минимизируемой функции рассматривается сумма квадратов ошибок между оценкой радиальной скорости ветра, выраженной через ее неизвестные проекции, и измеренным радиолокатором значением радиальной скорости гидрометеоров в этой же точке.

Полученные значения проекций являются одинаковыми во всем объеме пространства исходных данных. Из этого следует ограничение применения предлагаемого алгоритма: малая изменчивость скорости ветра в рассматриваемой области. Чем больше количество измерений в рассматриваемой области, тем более достоверными являются оценки значений проекций (V_x, V_y, V_z), полученные с помощью МНК.

Вычисление элементов вектора $(V_{ГОР.j}, V_{ВЕРТ.j})$ для каждой дальности j :

$$V_{ГОР.j} = \sqrt{V_{xj}^2 + V_{yj}^2}, \quad V_{ВЕРТ.j} = V_{zj} \quad (3)$$

Проверка метода производилась с использованием данных, полученных в результате обзора ДМРЛ-С путём сопоставления вычисленных (с использованием предложенного алгоритма) значений $V_{ГОР}$ с данными температурно-ветрового (аэрологического) зондирования атмосферы. Несмотря на то обстоятельство, что и радиолокационный способ (с использованием ДМРЛ-С), и аэрологический метод шаропилотного слежения (с использованием малогабаритного аэрологического радиолокатора МАРЛ-А) являются дистанционными методами определения параметров ветра, последний принято считать более достоверным [6].

Сопоставление данных о горизонтальном ветре ДМРЛ-С с данными температурно-ветрового зондирования атмосферы

1 Общие положения

Так как целью была проверка работоспособности предлагаемого метода в заданной (ограниченной) области пространства, то для сравнения из архивов измерений ДМРЛ-С и аэрологических (АЭ) зондирований выбирались данные, удовлетворяющие ряду условий:

1) ДМРЛ-С и станция АЭ зондирования должны быть расположены на максимально близком расстоянии друг от друга, не более 1 км.

2) Срок наблюдений ДМРЛ-С должен быть синхронизирован со сроком выпуска шара-зонда, производимого два раза в сутки в 11.30 и в 23.30 всемирного скоординированного времени (ВСВ). Поскольку технический цикл формирования комплекта наблюдений ДМРЛ построен таким образом, что эти комплекты отнесены к следующим срокам: $H + 00$, $H + 10$, $H + 20$, $H + 30$, $H + 40$, $H + 50$, где H - час ВСВ; 00, 10, 20 и т.д. - минуты часа, а время получения данных определяется по моменту завершения обзора [7], то наиболее приемлемым для сопоставления будет срок 11.40 или 23.40 ВСВ наблюдений ДМРЛ.

3) Синоптическая ситуация характеризуется следующими условиями:

а) наличие облаков нижнего, среднего и верхнего ярусов для устойчивого получения ДМРЛ отраженных радиосигналов с высот от 1,0 до 10 км;

б) ветер послойно однороден в интервале времени $[t_1 - \Delta t; t_2 + \Delta t]$, начиная с высоты 700-800 м от уровня земли до верхней границы радиолокационного обнаружения эхо-сигнала, где t_1 – время начала наблюдений за шар-зондом (время пуска), t_2 – время окончания наблюдений, $\Delta t = 0,5$ ч;

в) стратификация (нижних) слоев атмосферы нейтральная (градиент температуры в среднем равен $1^\circ\text{C}/100$ м), при этом, чем больше положительное значение градиента температуры, тем устойчивее атмосфера и тем сильнее в ней подавляются турбулентные колебания;

г) атмосферные осадки отсутствуют.

Секторный режим сканирования интересен как с точки зрения самостоятельной реализации (режим работы в ограниченном объеме пространства обеспечивает большее пространственно-временное разрешение получаемых данных, чем режим кругового обзора), так и в рамках научно-методического подхода при апробации новых методов диагностики поля ветра (непрерывное синхронное измерение параметров ветра в секторе нахождения шар-зонда, имитация отсутствия данных с других направлений).

2 Выбор исходных данных. Синхронизация режимов наблюдения

В приведенном эксперименте значения радиальной скорости ветра V_r были взяты из объемного файла ДМРЛ-С Воейково, расположенного в точке с координатами (59.947 с.ш., 30.705 в.д.) вблизи (на одной наблюдательной площадке) с АЭ станцией (рис. 2).

Выбор срока определялся условиями, описанными выше. В результате из архива наблюдений были выбраны данные наблюдений:

1) ДМРЛ-С Воейково (позывной RAVO) из объемного файла с результатами обзора 14 марта 2023 г. 23.40 ВСВ «RAVO20230314_234000_o.lnv».

2) АЭ Воейково из таблицы результатов аэрологического зондирования (ТАЭ) 14 марта 23.30 ВСВ «14.3.2023-23.30.ТАЭ03».



Рис. 2. Схема расположения ДМРЛ и АЭ Воейково

В соответствии с циклограммой работы ДМРЛ-С [8] сканирование в режиме измерения «Скорость» проводится со 150-й по 480 с от начала наблюдений, при этом в течение первого интервала длительностью 75 с сканирование ведется на углах места $8,987^\circ$, $11,184^\circ$, $13,997^\circ$ и $17,380^\circ$ (вращение по азимуту с постоянной угловой скоростью $19,2^\circ/\text{с}$), в течение второго интервала длительностью 75 с – на углах места $21,885^\circ$, $27,993^\circ$, $35,486^\circ$, $45,681^\circ$, $58,096^\circ$, $71,982^\circ$ и $85,979^\circ$ (вращение по азимуту с постоянной угловой скоростью $33,6^\circ/\text{с}$), в течение третьего интервала длительностью 180 с сканирование ведется по 11 углам места, начиная от $7,493^\circ$ до $0,088^\circ$ (вращение по азимуту с постоянной угловой скоростью $22,0^\circ/\text{с}$). В расчет целесообразно брать данные со 150-й по 300 с от начала наблюдения, так как области сканирования на последних 11 углах места располагаются вдали от траектории полета шар-зонда. В данном сопоставлении радиолокационные данные берутся с двух углов места – $17,380^\circ$, $21,885^\circ$.

По данным аэрологического зондирования из таблицы ТАЭ определяются высоты, на которых находился шар-зонд в период времени со 150-й по 300 с каждого цикла измерения ДМРЛ-С.

3 Результаты оценки средней скорости горизонтального потока

Результаты оценок усредненной горизонтальной скорости, рассчитанных по алгоритму метода VAD и по формуле (3), предложенного в статье алгоритма, сведены в таблицу (рис. 3). Таким образом, сравнению подлежат:

1) данные скорости и направления воздушного потока, рассчитанные в программе «ГИМЕТ-2010» по алгоритму метода VAD по полному коническому сечению (360 направлений зондирования) в условиях однородного воздушного потока при наличии отражателей во всех элементах разрешения для двух углов места $E = 17,380^\circ$ и $21,885^\circ$.

Полученные значения подлежат сравнению с данными АЭ зондирования в секторе одновременного нахождения шара-зонда и зондирующего импульса ДМРЛ-С ($t = 174...201$ с от момента выпуска зонда – именно в это время ДМРЛ-С зондировал под углами места $17,380^\circ$ и $21,885^\circ$).

2) данные АЭ наблюдений, приведенные в целях валидации данных ДМРЛ. Выбор данных АЭ производился с учётом синхронизации во времени и пространстве с зондирующим импульсом ДМРЛ-С, усреднены в интересующем секторе наблюдения.

3) результаты применения к данным объемного файла ДМРЛ алгоритма предложенного метода:

– при использовании данных с 360 направлений зондирования (для сравнения с результатами работы метода VAD),

– в ограниченном секторе по азимуту [25°; 37°] и по углу места [17°; 22°].

ДМРЛ-С ПО «ГИМЕТ-2010»	Аэрологические наблюдения ПО «Аэрологический процессор МАРЛ-А»	Данные из объемных файлов ДМРЛ-С Предлагаемый АЛГОРИТМ осреднения данных
<p>Результаты работы алгоритма VAD с 360 направлений зондирования:</p> <p>Угол места E = 17,380° V₂₂₆₉ = 16,99 м/с, α₂₂₆₉ = 229,16° V₂₅₀₅ = 15,99 м/с, α₂₅₀₅ = 231,50° V₂₇₄₄ = 15,91 м/с, α₂₇₄₄ = 228,49° V₂₉₈₂ = 15,81 м/с, α₂₉₈₂ = 227,61° V₃₂₂₁ = 15,68 м/с, α₃₂₂₁ = 227,80° V₃₄₆₀ = 15,90 м/с, α₃₄₆₀ = 228,85° V₃₆₉₈ = 15,99 м/с, α₃₆₉₈ = 230,03° V_{CP1} = 16,04 м/с, α_{CP1} = 229,06°</p> <p>Угол места E = 21,885° V₂₂₀₄ = 15,66 м/с, α₂₂₀₄ = 228,41° V₂₄₃₆ = 15,62 м/с, α₂₄₃₆ = 226,19° V₂₆₆₈ = 15,62 м/с, α₂₆₆₈ = 226,19° V₂₉₀₀ = 15,49 м/с, α₂₉₀₀ = 227,91° V₃₁₃₂ = 15,52 м/с, α₃₁₃₂ = 228,77° V₃₃₆₄ = 15,05 м/с, α₃₃₆₄ = 232,93° V₃₅₉₆ = 14,90 м/с, α₃₅₉₆ = 235,92° V₃₈₂₈ = 14,42 м/с, α₃₈₂₈ = 236,94° V_{CP2} = 15,29 м/с, α_{CP2} = 230,41°</p> <p>Осреднение результатов 15-и VAD в объеме (всего 15x360 = 5400 значений радиальных скоростей ветра): V_{CP} = 15,67 м/с, α_{CP} = 229,74°</p>	<p>Скорость и направление ветра:</p> <p>V₂₂₂₈ = 15,74 м/с, α₂₂₂₈ = 229,70°; t = 174 с; H = 1000 м V₂₄₂₉ = 15,22 м/с, α₂₄₂₉ = 223,83°; t = 191 с; H = 1056 м</p> <p>V₂₅₄₄ = 15,50 м/с, α₂₅₄₄ = 226,38°; t = 201 с; H = 1115 м V₂₇₉₂ = 16,32 м/с, α₂₇₉₂ = 233,77°; t = 234 с; H = 1225 м V₂₉₂₉ = 16,78 м/с, α₂₉₂₉ = 237,86°; t = 246 с; H = 1286 м</p> <p>V₃₃₁₆ = 16,49 м/с, α₃₃₁₆ = 249,23°; t = 285 с; H = 1494 м V₃₆₆₀ = 14,89 м/с, α₃₆₆₀ = 229,01°; t = 327 с; H = 1712 м</p> <p>Осреднение скорости и направления ветра вдоль траектории полета шар-зонда по 7 высотам: V_{CP} = 15,85 м/с, α_{CP} = 232,83°</p>	<p>1) Результаты работы алгоритма при E = 17,380°, R = 2505 м и использовании данных с 360 направлений зондирования (сравнение с результатами VAD из ПО «ГИМЕТ-2010»): V_x = 12,51390395 м/с; V_y = 9,95400866 м/с; V_z = 0 м/с V₂₅₀₅ = 15,98999939 м/с, α₂₅₀₅ = 231,50000000°</p> <p>Примечание: Значения радиальных скоростей ветра, используемые для расчета, были получены проецированием значения скорости, полученной методом VAD в ПО «ГИМЕТ-2010», на каждое из 360 направлений зондирования, при этом на удаленности R = 2505 м в направлении визирования 17,380° проецировался вектор горизонтальной скорости ветра 15,99 м/с с направлением 231,50° и нулевым значением вертикальной составляющей.</p> <p>Вывод: полученные результаты в точности скрываются с результатами по методу VAD в ПО «ГИМЕТ-2010».</p> <p>2) Результаты работы алгоритма в ограниченном объеме: A = 25°...37°, E = 17,380°...21,885°, R = 2204...3828 м. Кол-во используемых для расчета значений измеренной радиальной скорости ветра: - угол места E = 17,380° N₁ = 91; - угол места E = 21,885° N₂ = 104.</p> <p>Осреднение скорости и направления ветра (всего 195 значений радиальных скоростей ветра, что в 27,7 раза меньше, чем используется в ПО «ГИМЕТ-2010»): V_{x,CP} = 11,541 м/с; V_{y,CP} = 8,664 м/с; V_{z,CP} = -0,376 м/с V_{CP} = 14,43 м/с, α_{CP} = 233,10°</p>

ДМРЛ-С ПО «ГИМЕТ-2010»	ДМРЛ-С ПО «ГИМЕТ-2010» (результаты работы алгоритма VAD в секторе 12°)	Аэрологические наблюдения ПО «Аэрологический процессор МАРЛ-А»	Данные из объемных файлов ДМРЛ-С АЛГОРИТМ осреднения данных в ограниченном объеме 12° x 5° x 0,4 км
<p>Результаты работы алгоритма VAD с 360 направлений зондирования:</p> <p>Угол места E = 17,380° V₂₅₀₅ = 15,99 м/с, α₂₅₀₅ = 231,50° V₂₇₄₄ = 15,91 м/с, α₂₇₄₄ = 228,49°</p> <p>Угол места E = 21,885° V₂₂₀₄ = 15,66 м/с, α₂₂₀₄ = 228,41° V₂₄₃₆ = 15,62 м/с, α₂₄₃₆ = 226,19°</p> <p>Осреднение результатов VAD по 4 точкам (всего 4x360 = 1440 значений радиальных скоростей ветра): V_{CP} = 16,07 м/с, α_{CP} = 228,82°</p>	<p>Имитация отсутствия данных с других направлений: Сектор по азимуту A = 25°...37°</p> <p>Угол места E = 17,380° V₂₅₀₅ = 25,17 м/с, α₂₅₀₅ = 194,22° V₂₇₄₄ = 48,48 м/с, α₂₇₄₄ = 204,35°</p> <p>Угол места E = 21,885° V₂₅₀₅ = 42,40 м/с, α₂₅₀₅ = 215,71° V₂₇₄₄ = 29,62 м/с, α₂₇₄₄ = 217,68° (линейная интерполяция радиальных скоростей)</p> <p>Вывод: применять алгоритм VAD в секторе нельзя.</p>	<p>Скорость и направление ветра:</p> <p>V₂₂₂₈ = 15,74 м/с, α₂₂₂₈ = 229,70°; t = 174 с; H = 1000 м V₂₄₂₉ = 15,22 м/с, α₂₄₂₉ = 223,83°; t = 191 с; H = 1056 м V₂₅₄₄ = 15,50 м/с, α₂₅₄₄ = 226,38°; t = 201 с; H = 1115 м</p> <p>Осреднение скорости и направления ветра вдоль траектории полета шар-зонда по 3 высотам при синхронизации по времени с измерениями ДМРЛ-С: V_{CP} = 15,49 м/с, α_{CP} = 226,64°</p>	<p>Диапазон удаленности R = 2267...2668 м</p> <p>Количество используемых точек с измеренной радиальной скоростью ветра: - угол места E = 17,380° N₁ = 26 (2267 м и 2505 м); - угол места E = 21,885° N₂ = 26 (2436 м и 2668 м).</p> <p>Осреднение скорости и направления ветра в ограниченном объеме (всего 52 значения радиальной скорости ветра, что в 27,7 раза меньше, чем используется в ПО «ГИМЕТ-2010»): V_{x,CP} = 12,843 м/с; V_{y,CP} = 11,078 м/с; V_{z,CP} = -8,292 м/с V_{CP} = 16,96 м/с, α_{CP} = 229,22°</p>

Рис. 3. Сравнение результатов вычисления скорости и направления ветра с помощью программы «ГИМЕТ-2010», ПО «АП МАРЛ-А» и предлагаемого метода

Выводы

Анализ предложенного в статье метода определения параметров ветра на основе доплеровских измерений ДМРЛ-С, позволяет сделать вывод о том, что описанный метод работоспособен как в режиме использования данных со всех направлений азимутального сканирования (полностью повторяя результаты применения метода VAD), так и в режиме секторного обзора – как самостоятельного режима зондирования, так и в условиях, например, отсутствия данных с других направлений.

Сканирование в секторе позволяет уменьшить время измерения в секторе до 30 с и, как следствие, сократить объем обрабатываемых данных почти в 28 раз, при этом метод сохраняет свою устойчивость, а получаемые в расчётах значения средней

горизонтальной скорости и направления ветра близки к действительным. Метод VAD в аналогичных условиях даёт недостоверные результаты.

Кроме того, описанный метод позволяет оценить вертикальную компоненту скорости потока (V_z), которой пренебрегают в первом приближении метода VAD. Однако верификация рассчитанного значения вертикальной составляющей скорости потока не проводилась и требует дальнейших исследований.

Применение описанного метода диагностики поля ветра на основе измерений, производимыми ДМРЛ, открывает широкие возможности как в практической, так и в научно-исследовательских областях метеорологии. Научно-исследовательское направление связано с разработкой и испытанием новых малогабаритных ДМРЛ, позволяющих получать данные ветрового зондирования с требуемой точностью и оперативностью. Апробация алгоритмов обработки данных должна производиться в различных метеоусловиях, в режиме синхронных АЭ наблюдений с выбором сектора сканирования, соответствующего траектории полета шар-зонда. Практическое направление предполагает внедрение и дальнейшее совершенствование новых технологий в части авиационного метеобеспечения, что, в конечном итоге, способно повысить качество метеорологической поддержки авиации на всех этапах планирования и выполнения полетов.

Литература

1. Приложение 3 к Конвенции о международной гражданской авиации. Метеорологическое обеспечение международной аэронавигации. ИКАО. 2018. 230 с.
2. Руководство по сдвигу ветра на малых высотах. Doc 9817 AN/449. ИКАО. 2005. 264 с.
3. Д.В. Ермилов, Д.В. Козлов, М.В. Львова, Д.А. Рыбак, И.А. Тарабукин, В.П. Ткач. Определение параметров метеорологических радиолокаторов для обнаружения опасных явлений погоды в ближней зоне. Сборник статей I научно-технической конференции. Том 1. Анапа, 2022. Изд-во: Федеральное государственное автономное учреждение «Военный инновационный технополис «ЭРА» (Анапа).
4. Р. Довиак, Д. Зрнич. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения. Пер. с англ. под ред. А. А. Черникова. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1988. 511 с.
5. И.А. Готюр, В.Ю. Жуков, Ю.В. Кулешов, С.В. Чернышев, Г.Г. Щукин. Доплеровский радиолокационный метод определения характеристик поля ветра и некоторые результаты. Ученые записки РГГМУ, 2011, № 21. С. 66-75.
6. Методика валидаций наблюдений доплеровских метеорологических радиолокаторов, установленных на наземной наблюдательной сети. ФГБУ «ЦАО», 2018. 49 с.
7. Приказ № 95 о внедрении на радиолокационной сети Росгидромета «Основных технических требований к системе обнаружения опасных атмосферных явлений и штормового оповещения на базе метеорологических радиолокаторов». Москва. 21.06.2004 г.
8. Методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике. Третья редакция. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Росгидромет. 2019. 129 с.