

Радиолокационные и радионавигационные системы

УДК 621.396

О ВЛИЯНИИ СДВИГА ВЕТРА НА ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИНЫ СПЕКТРА РАДИОЛОКАЦИОННОГО СИГНАЛА

Денисенков Дмитрий Анатольевич

инженер кафедры технологий и средств геофизического обеспечения войск. Федеральное государственное казенное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского».
E-mail: vka@mil.ru.

Жуков Владимир Юрьевич

кандидат технических наук, старший научный сотрудник 32 отдела ВНИИ. Федеральное государственное казенное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского».
E-mail: vuzhukov2002@list.ru.

Адрес: 197082, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13.

Аннотация: Исследуется возможность измерения величины сдвига ветра в пограничном слое атмосферы метеорологическим радиолокатором. Анализируются существующие алгоритмы решения поставленной задачи. Делается вывод о необходимости разработки нового метода, основанного на анализе пространственного распределения ширины спектра принимаемого сигнала. Приводятся результаты численного моделирования процесса формирования карты ширины спектра радиальных скоростей гидрометеоров для характерных случаев изменения вектора скорости ветра с высотой. Рассчитываются спектры принимаемого радиолокатором сигнала в наиболее интересных точках пространства. Делается вывод о том, что существование сдвига ветра в пограничном слое вызывает характерные изменения параметров сигнала, принимаемого метеорологическим радиолокатором при малых углах возвышения антенны. Это позволяет предположить существование решения обратной задачи – по характеристикам получаемых карт восстановить интересующий вертикальный профиль ветра.

Ключевые слова: ширина спектра, метеорологический радиолокатор, сдвиг ветра.

Введение

Современные метеорологические радиолокаторы за малым исключением являются доплеровскими. Это делает их способными измерять распределение радиальных скоростей частиц, попавших внутрь элемента разрешения [1]. Данная зависимость представляется в виде энергетического спектра, являющегося оценкой плотности распределения вероятности для мощности эхо-сигнала как функции радиальной скорости гидрометеоров, создавших эти отражения [2]. Форма данного спектра, как правило, не анализируется, а по полученным оценкам рассчитывают его среднее значение и ширину, под которой обычно понимают сред-

нее квадратичное отклонение рассматриваемого распределения.

Ширина спектра служит показателем того, насколько изменчива скорость частиц внутри разрешаемого объема [3]. Причин, способных вызвать данную изменчивость, существует несколько:

- сдвиг ветра с высотой;
- турбулентность;
- изменения ветра в горизонтальной плоскости, вызванные шквалом или смерчем.

Таким образом, оценивание ширины спектра радиальных скоростей гидрометеоров не позволяет однозначно трактовать полученные данные [4], и в ряде случаев от его использо-

вания вообще отказываются, как это имеет место при измерении высотного сдвига ветра. Указанную величину ищут как разницу скоростей ветра на различных высотах, для чего предварительно восстанавливают его вертикальный профиль посредством измерения среднего значения спектра [5].

С учетом ряда допущений [6] полученную оценку среднего значения спектра можно считать равной среднему по разрешаемому объему значению скорости ветра. Тогда возникает задача восстановления полного вектора скорости ветра в некотором заранее заданном объеме пространства. Ее решение возможно двумя способами:

1. непосредственным измерением при помощи двух и более синхронно работающих радиолокаторов [7];

2. решением обратной задачи формирования среднего значения спектра при сканировании антенны в предположении постоянства искомого вектора [8].

Первый способ чреват большими трудностями, связанными с совмещением центров элементов разрешения каждого из радиолокаторов, и обладает малой эффективностью ввиду того, что площадь, на которой возможны совместные измерения, составляет малую часть от всей площади обзора каждого из них [9].

Поэтому повсеместно применяется второй способ. Стандартными продуктами данных измерений являются дисплей азимутальной скорости и восстановленный профиль ветра [10]. Как правило, ветер восстанавливается на высотах от 1 до 15 км с разрешением 0,5 – 1 км. Авиацию же больше всего интересует пограничный слой высотой до 500 м [11], остающийся неохваченным данными измерениями. Кроме того, разрешающая способность должна быть не менее той высоты, которая принята стандартной для измерения сдвига ветра, т.е. 30 м [7]. Для того, чтобы перенести измерения в указанную область и добиться требуемого разрешения, нужны значительные изменения в конструкции радиолокаторов. Так, при обычной ширине луча метеорологических радиоло-

каторов, устанавливаемых на национальных сетях штормооповещения, 1 градус, ширину менее 30 м разрешаемый объем сохраняет до дальности 1,7 км, что практически совпадает с величиной ближней зоны антенны диаметром 4,5 м при длине волны 5 см.

Противоречие устраняется, если уменьшить диаметр антенны, но это означает установку нового радара специально для измерения профиля ветра. Такие устройства – профилемеры – существуют и, как правило, отличаются высокой стоимостью. Поэтому интерес представляет нахождение способа оценивания сдвига ветра в интересующей области именно в уже установленных на сеть радиолокаторах без внесения изменений в их конструкцию. Поскольку невозможность решения данной задачи традиционными методами по оценкам средней частоты отражений была уже показана, ее надо искать в другом направлении, а именно в использовании информации о ширине спектра радиальных скоростей частиц.

Кроме того, процедуры оценивания среднего значения спектра радиальных скоростей элементарных отражателей, применяемые в современных метеорологических радиолокаторах, не обеспечивают получения несмещенных оценок при наблюдении областей со сдвигом ветра [12]. Как правило, они предполагают гауссову или близкую к ней форму спектра принимаемого сигнала. Это условие уже подвергалось сомнению [13, 14]. При наличии же сдвига ветра оно не выполняется в большинстве случаев [15]. Спектр такого сигнала имеет два или более максимумов [16]. Оперативное распознавание спектров такого рода представляет собой трудную математическую задачу. Более применимым на практике методом представляется возвращение к оцениванию ширины спектра принимаемого сигнала. При этом не самой ее величины, также подверженной искажениям из-за отличия формы спектра от гауссовой [17], ее распределения в пространстве, которое, как показывает уже имеющийся опыт наблюдений на когерентных метеороло-

гических радиолокаторах [18, 19], тесно связан с неоднородностями поля ветра [20].

Один из многих подобных примеров представлен на рис.1. На карте ширины спектра зоны малых значений расположены в виде спиралей. Одновременно карта средних значений радиальной скорости показывает наличие сдвига ветра на тех же дальностях, на которых расположены упомянутые спирали. Такая зависимость наблюдается во всех обнаруженных случаях.

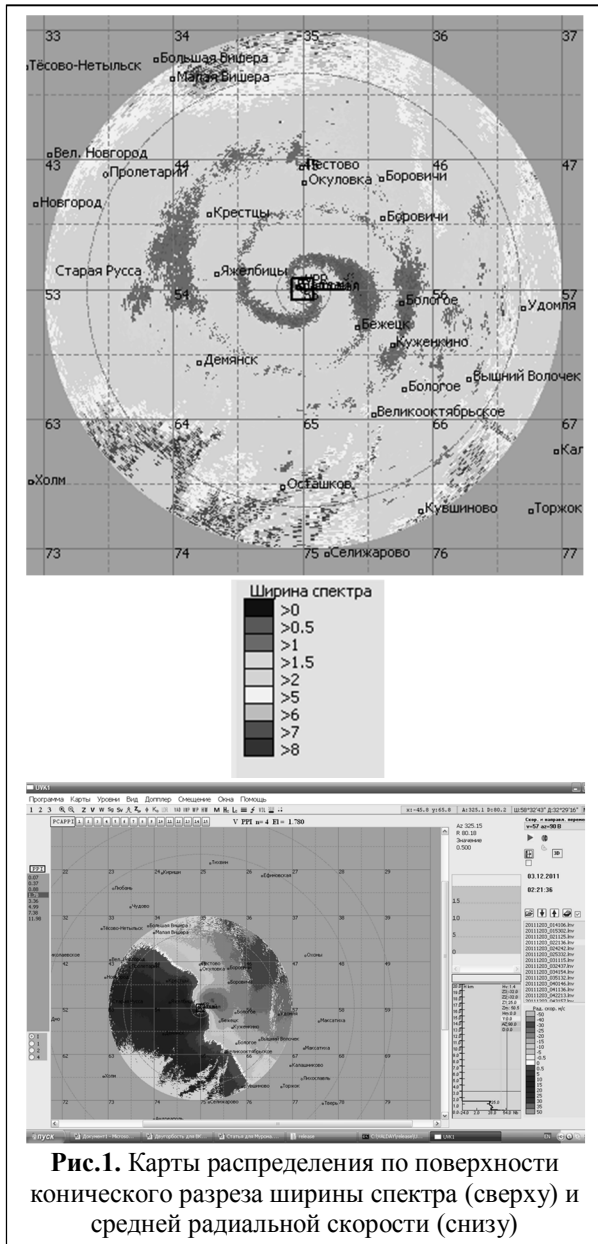


Рис.1. Карты распределения по поверхности конического разреза ширины спектра (сверху) и средней радиальной скорости (снизу)

Ввиду сказанного приобретает актуальность задача моделирования работы радиолокатора в

различной метеорологической обстановке с целью выявления функциональных зависимостей между структурой приземного ветра и особенностями пространственного расположения ширины спектра сигнала.

Численная модель пространственного распределения ширины спектра радиальных скоростей

В поставленной задаче были приняты следующие исходные данные:

1. Радиолокатор сканирует пространство при фиксированном угле места β на дальностях от R_{min} до R_{max} в диапазоне азимутов $\alpha=(0\div 359)^\circ$. Ширина диаграммы направленности антенны $\theta=1^\circ$.

2. В качестве модели среды была взята модель с двумя смежными слоями с разной отражаемостью, разным направлением ветра и разной скоростью ветра в каждом из них. В расчете среда описывается тремя векторами:

$K(h)$ – вектор, описывающий распределение отражаемости частиц по высоте;

$V(h)$ – вектор, описывающий распределение скорости движения частиц по высоте;

$\varphi(h)$ – вектор, описывающий распределение направления движения частиц по высоте.

На рис. 2 показана схема движения разрешаемого объема в пространстве при фиксированном азимуте и угле места антенны.

Если рассмотреть подробнее один разрешаемый объем (рис.3), становится очевидным, что при наличии градиента скорости или направления ветра по высоте в спектре сигнала от данного разрешаемого объема будут присутствовать составляющие, соответствующие частицам, имеющим различные радиальные скорости. В частности, частицам из нижнего элемента разрешаемого объема соответствует радиальная скорость $V_r(h_1)$, а частицам из второго элемента - $V_r(h_1+\Delta h)$.

Проекция радиальной скорости движения частиц в пространстве на вектор направления антенны рассчитывается по формуле:

$$V_r(h, \alpha) = V(R, h) \cos(\varphi(R, h) - \alpha) \cos(\beta),$$

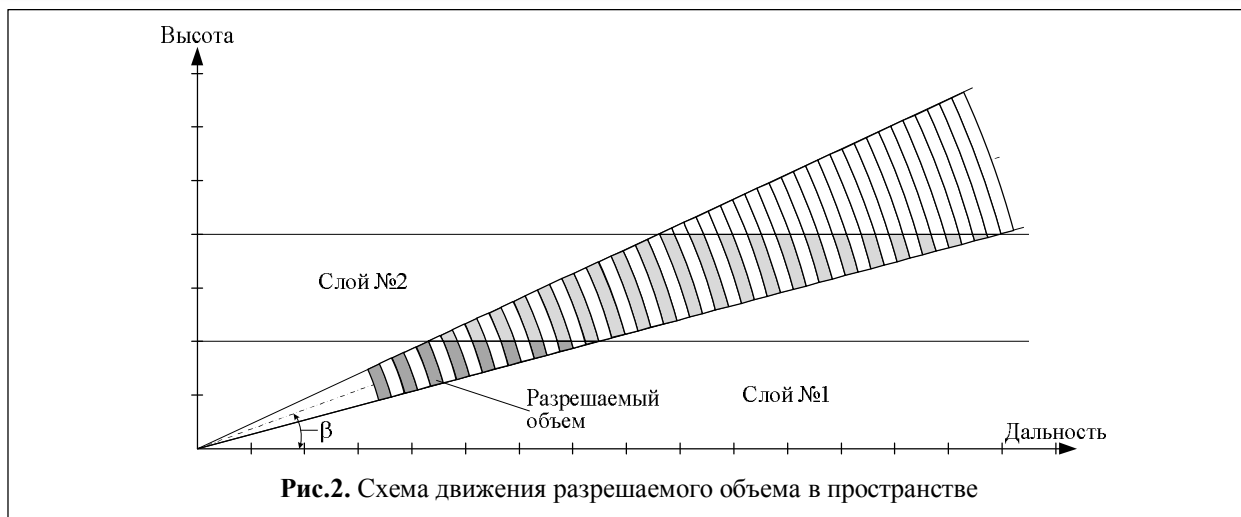


Рис.2. Схема движения разрешаемого объема в пространстве

где V – скорость движения частиц, φ – направление движения частиц, R – наклонная дальность, h – высота.

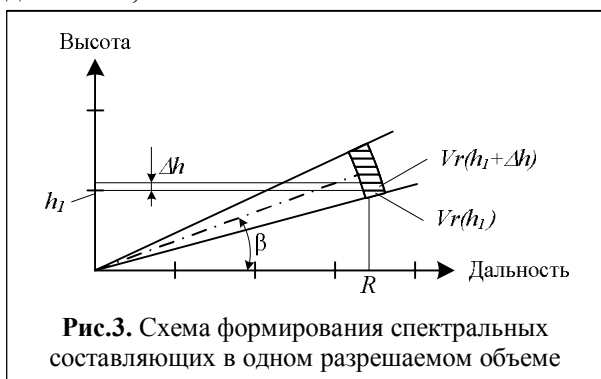


Рис.3. Схема формирования спектральных составляющих в одном разрешаемом объеме

Диаграмма направленности антенны описывается двумерной гауссовой плотностью распределения

$$A(R, h) = \frac{1}{\frac{\sqrt{2\pi}}{3} R \operatorname{tg}(\theta/2)} e^{-\frac{[h - R \operatorname{tg}(\beta)]^2}{2 \left[\frac{R}{3} \operatorname{tg}(\theta/2) \right]^2}}$$

Значения гармоник энергетического спектра и ширина последнего рассчитываются по следующим формулам:

$$S(R, h) = A(R, h)K(R, h),$$

$$\Delta V(R, \alpha) = \sqrt{\sum_h [(V_r(h, \alpha) - M(R, \alpha))^2 S(R, h)],}$$

где $M(R, \alpha) = \sum_h (V_r(h, \alpha) S(R, h))$.

Результаты моделирования

На основе созданной численной модели принимаемого радиолокатором сигнала исследовано пространственное распределение ширины

спектра для 3-х характерных вариантов структуры приземного ветра. Угол места антенны $\beta = 2,5^\circ$ и ширины диаграммы направленности $\theta = 1^\circ$ одинаковы во всех трех случаях. Параметры первого нижнего слоя атмосферы также во всех случаях одинаковы и составляют:

- расположение слоя – от 0 до 500 м;
- скорость ветра $V1 = 10$ м/с;
- направление ветра $\varphi1 = 0^\circ$;
- отражаемость $K1 = 1$.

1. Первый вариант метеообстановки – два слоя с разной отражаемостью и разным направлением ветра в каждом из них (рис. 4).

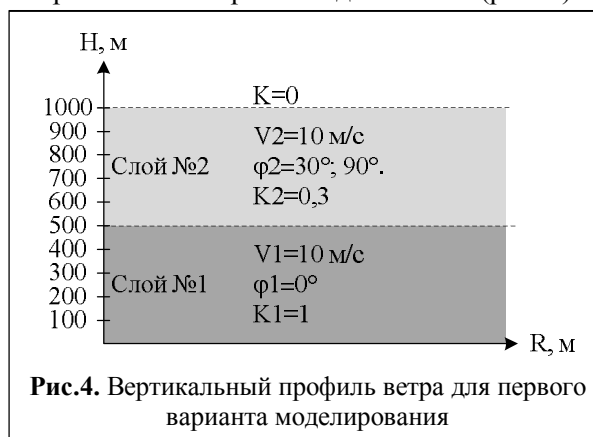


Рис.4. Вертикальный профиль ветра для первого варианта моделирования

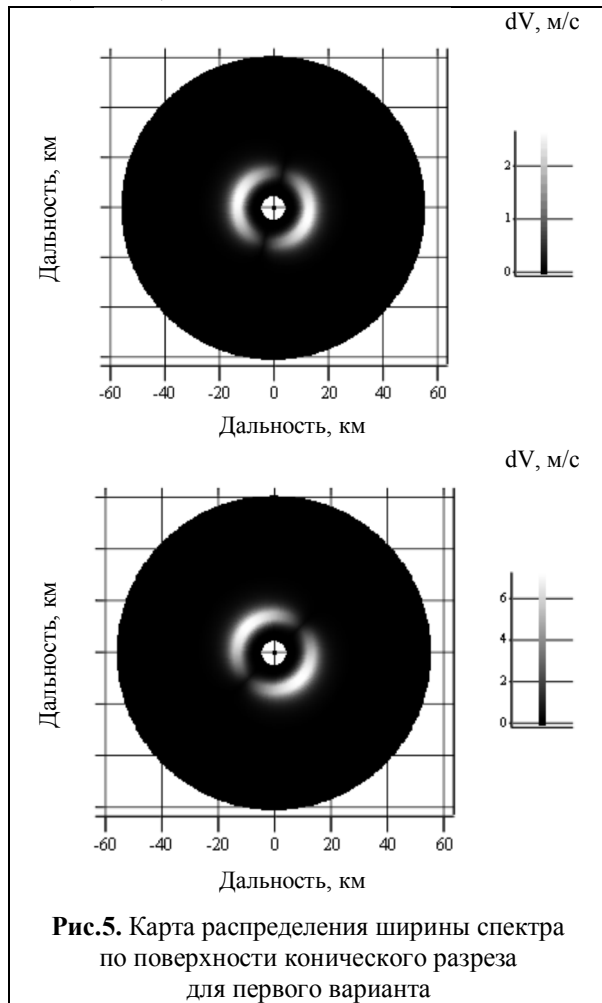
Второй слой (слой №2) находится на высотах от 500 до 1000 метров и имеет следующие параметры ветра:

- скорость ветра $V2 = 10$ м/с,
- направление ветра $\varphi2$ принималось равным 30° и 90° ,
- отражаемость $K2 = 0,3$.

В слое выше 1000 метров цели отсутствуют ($K3 = 0$).

Результаты моделирования представлены на рис.5.

На рисунках видны две зоны повышенного значения ширины спектра радиальных скоростей в виде двух полуокружностей. Данные полуокружности расположены симметрично относительно оси, направленной под углом $\psi = (\varphi_2 - \varphi_1)/2$.



Формирование данной картины можно объяснить с помощью спектров $S(V_r)$, приведенных на рис.6 и схемой расположения разрешаемых объемов в пространстве на рис. 7. Данные спектры соответствуют параметру $\varphi_2 = 90^\circ$ и азимуту антенны $\alpha = 120^\circ$.

Как видно из рис.6 и рис.7, на малых дальностях, когда в разрешаемый объем попадает только нижний слой, в спектре присутствует

лишь одна составляющая соответствующая ему. Ширина спектра при этом минимальна.

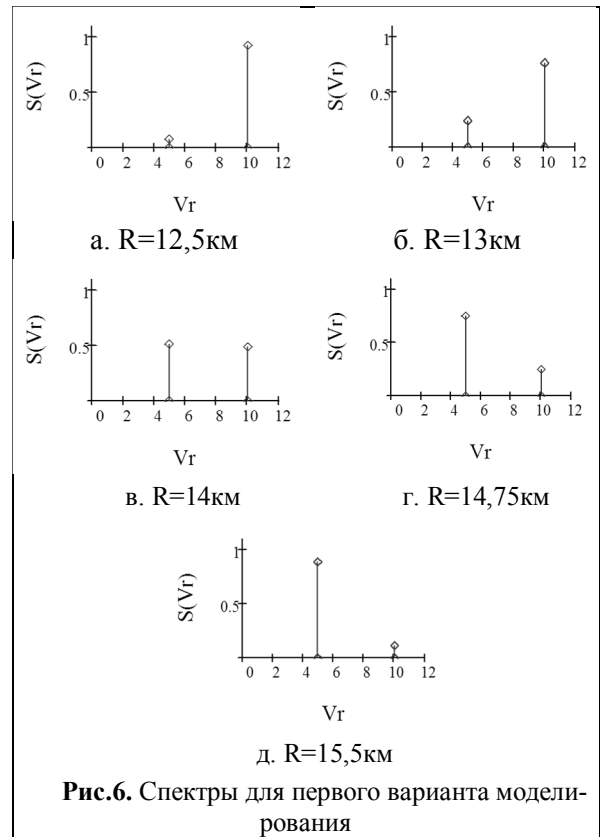


Рис.6. Спектры для первого варианта моделирования

По мере увеличения дальности, в луч радиолокатора начинает попадать второй слой (поз.а и поз.б на рис.7), что ведет к росту соответствующей ему спектральной составляющей и уменьшению мощности отражений от первого слоя. Ширина спектра увеличивается.

На некоторой дальности мощности обеих составляющих выравниваются, и ширина спектра становится максимальной (поз.в на рис.7).

С дальнейшим ростом расстояния увеличивается составляющая от второго слоя, а от первого постепенно сходит на нет (поз.г и поз.д на рис.7). Ширина спектра уменьшается и достигает минимума, когда разрешаемый объем полностью выходит за пределы нижнего слоя.

2. Второй вариант – два смежных слоя со сдвигом ветра по величине во втором (рис.8).

Верхний слой (№2) находится на высотах от 500 до 1000 метров и имеет следующие параметры ветра:

– скорость ветра изменяется с высотой по закону $V_2 = V_1 + \Delta V \times H$, м/с, где H – высота, ΔV –

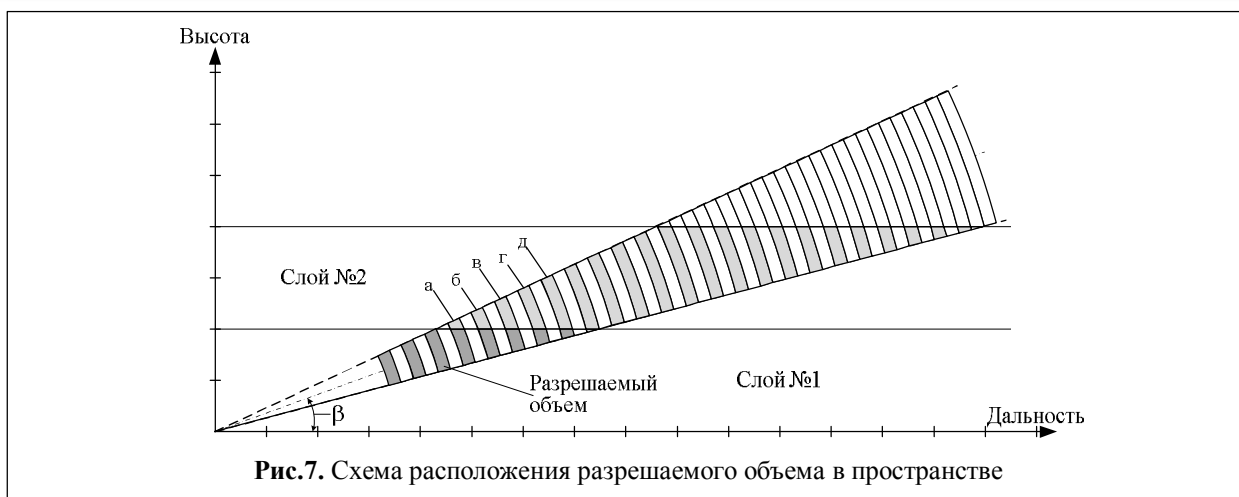


Рис.7. Схема расположения разрешаемого объема в пространстве

скорость изменения величины ветра с высотой, которая принималась равной 45 м/с на 500 м;

- направление ветра $\varphi_2 = 0^\circ$;
- отражаемость $K_2 = 0,3$.

Выше 1000 метров отражения отсутствуют ($K_3 = 0$).

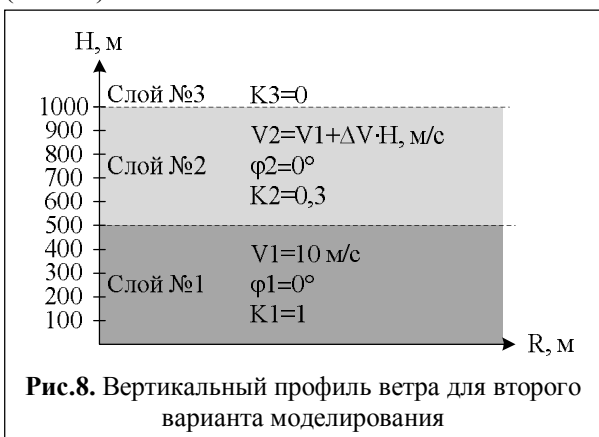


Рис.8. Вертикальный профиль ветра для второго варианта моделирования

Результаты моделирования представлены на рис.9.

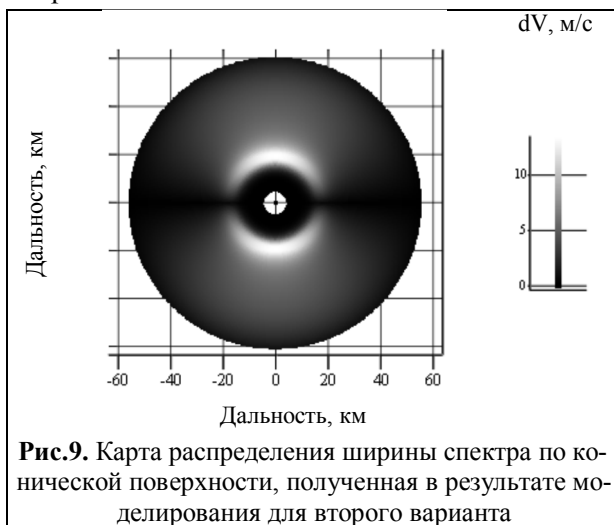


Рис.9. Карта распределения ширины спектра по конической поверхности, полученная в результате моделирования для второго варианта

На нем так же, как и в первом варианте, видны две зоны повышенного значения ширины спектра радиальных скоростей в виде двух полуокружностей. Данные полуокружности расположены симметрично относительно оси, направленной под углом 90° . При изменении параметра ΔV общий вид карты распределения ширины спектра не изменяется, меняется только количественное значение ширины спектра. Кроме этого, для данного варианта по сравнению с первым, характерным является увеличение области повышенных значений рассматриваемого параметра. Это происходит вследствие того, что второму слою соответствует не одна спектральная составляющая, а полоса радиальных скоростей.

Спектры, соответствующие азимуту антенны $\alpha=0^\circ$, приведены на рис.10.

3. Третий вариант – два смежных слоя со сдвигом ветра по направлению во втором (рис.11).

Верхний слой (№2) находится на высотах от 500 до 1000 метров и имеет следующие параметры ветра:

- скорость ветра $V_2 = 10\text{ м/с}$,
- направление ветра $\varphi_2 = \Delta\varphi \times H$, где H высота, $\Delta\varphi$ - скорость изменения направления ветра, значение которой принималось равным 90° на 500м;
- коэффициент отражаемости $K_2 = 0,3$.

Выше 1000 метров отражения отсутствуют ($K_3 = 0$).

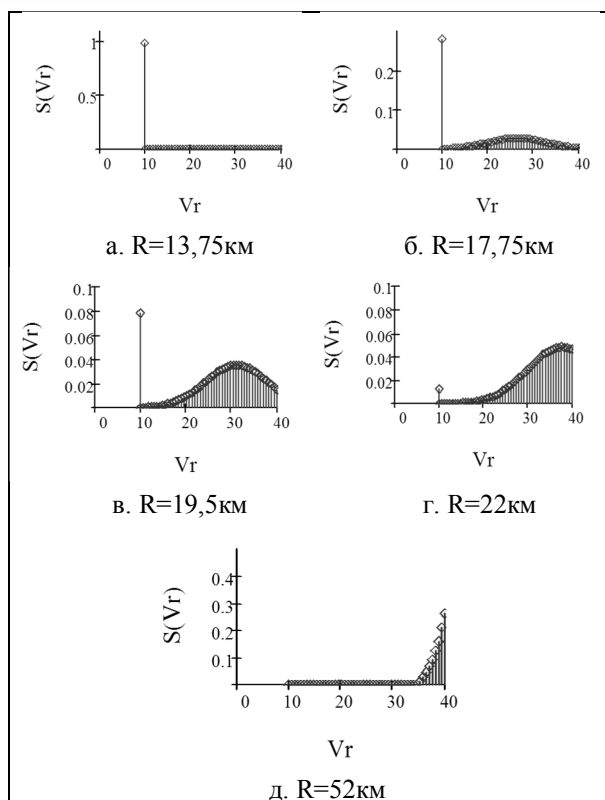


Рис.10. Спектры для второго варианта моделирования

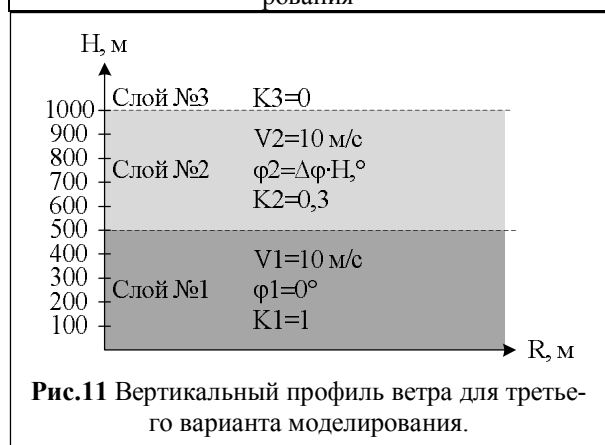


Рис.11 Вертикальный профиль ветра для третьего варианта моделирования.

Результаты моделирования представлены на рис.14.

На данных рисунках четко просматривается асимметрия зон повышенного значения ширины спектра радиальных скоростей, являющаяся следствием наличия сдвига ветра. На рис.13 представлены спектры, соответствующие азимуту антенны $\alpha=120^\circ$.

На представленных выше картах распределения ширины спектра по конической поверхности, полученных в результате моделирования, прослеживаются особенности, характер-

ные для каждого случая вертикального профиля ветра. Анализируя данные особенности, можно давать качественные оценки вертикального профиля ветра в приземном слое.

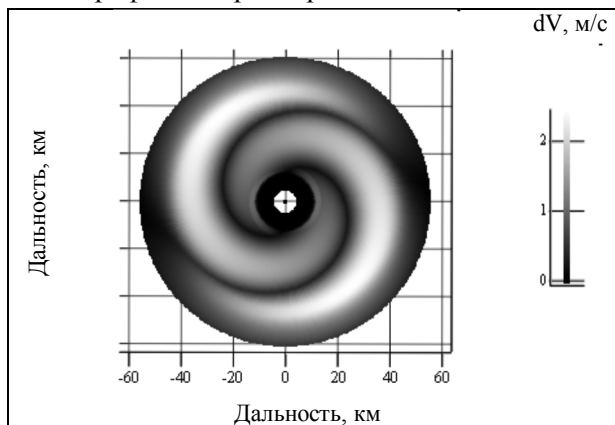


Рис.12. Карта распределения ширины спектра по конической поверхности, полученная в результате моделирования для третьего варианта

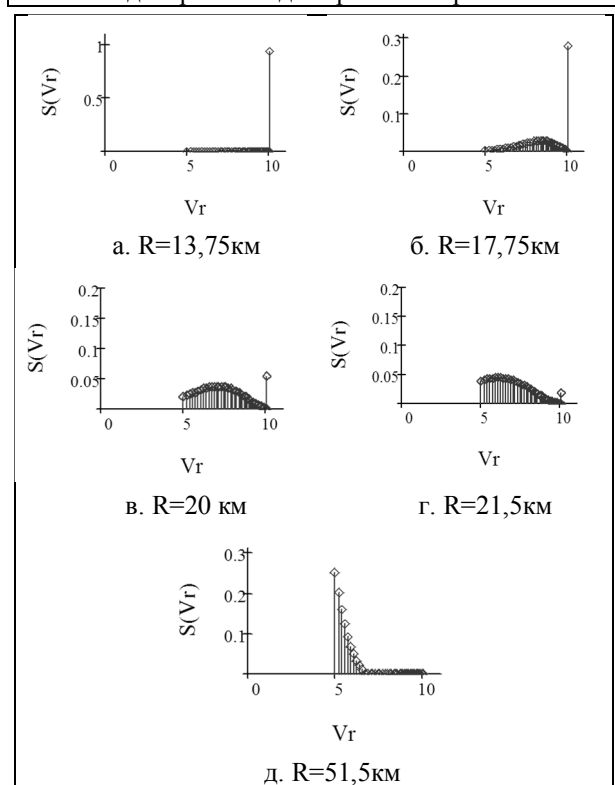


Рис.13. Спектры для третьего варианта моделирования

Заключение

Из представленных результатов исследований можно следующие выводы

1. Ширина спектра радиальных скоростей гидрометеоров совершенно незаслуженно считается малоинформативным параметром. Ха-

рактрные особенности его распределения в окружающем радиолокатор пространстве существенно зависят от того, как изменяется с высотой величина и направление ветра. При этом анализируется самый актуальный для авиации пограничный слой атмосферы.

2. Следует ожидать, что информация, поставленная шириной спектра, обладает гораздо большей точностью по сравнению с той, что дает средняя частота радиальных скоростей частиц ввиду гораздо меньшего влияния на нее размеров элемента разрешения и формы спектра принимаемого сигнала.

3. Уже сейчас мы можем по форме и месту расположения зон аномально широких спектров давать качественные оценки вертикального профиля ветра в приземном слое.

4. Дальнейшие исследования следует направить на определение количественных показателей пространственного распределения рассматриваемого параметра с целью решения обратной задачи – по получаемой карте восстанавливать вертикальный профиль ветра.

Литература

1. Довиак Р., Зрнич Д. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения. Л.: Гидрометеиздат, 1988, 512 с.
2. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Сов. радио, 1969, 752 с.
3. Мельников В.М. Обработка информации в доплеровских МРЛ. Зарубежная радиоэлектроника, 1993, №4. С.35 – 43
4. Руководство по сдвигу ветра на малых высотах. Международная организация гражданской авиации, 2005.
5. Блохина В.И. Авиационные прогнозы погоды. Учебное пособие по дисциплине «Авиационные прогнозы». <https://papa1an.ru>.
6. Степаненко В.Д. Радиолокация в метеорологии. - Л.: Гидрометеиздат, 1966.
7. Горелик А.Г. Пути развития зарубежной и отечественной доплеровской радиолокации. М.: Московская государственная академия приборостроения и информатики, 1995.
8. Готюр И.А., Девяткин А.М., Жуков В.Ю., Кулешов Ю.В., Щукин Г.Г. Информационные возможности доплеровских метеорологических радиолокаторов с двойной поляризацией. Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета № 32. Научно-теоретический журнал. – СПб.:РГГМУ, 2013. С.66-83.
9. Жуков В.Ю., Щукин Г.Г. Состояние и пер-

спективы сети метеорологических радиолокаторов. XXIV Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн», посвященная 100-летию со дня рождения профессора В.М.Полякова. Труды конференции. Иркутск, 2014. С.133-136.

10. Доплеровский метеорологический радиолокатор ДМРЛ-С. Руководство по эксплуатации.

11. Наставление по метеорологическому обеспечению гражданской авиации России (НМО ГА-95).

12. Жуков В.Ю., Щукин Г.Г. Об особенностях радиолокационных измерений радиальной скорости гидрометеоров при двухмодальном спектре отраженного ими сигнала. Труды XXIII Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред», Санкт-Петербург, 2013. С.337-344.

13. Louis H. Jansen, Gerard A. Van Der Spek. The Shape of Doppler Spectra from Precipitation. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems Vol. AES-21, No. 2 March 1985. Pp.208 – 219.

14. Valery M. Melnikov, Richard J. Doviak. Turbulence and Wind Shear in Layers of Large Doppler Spectrum Width in Stratiform Precipitation. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. Vol. 26, March 2009. Pp.430 – 443.

15. Lavrukevich U., Pushkov A., Sedletsky R., Vovshin B., Vylegzhanin I. «The Theory and Practice of Application Pseudo Random Signals in Doppler Meteoradars». Proceedings on International Radar Symposium (IRS-2011), Leipzig (Germany), 2011. Pp.256-261.

16. Жуков В.Ю., Щукин Г.Г. Состояние и перспективы сети доплеровских метеорологических радиолокаторов. Метеорология и гидрология, 2014, №2. С.92-100.

17. Valery M. Melnikov, Dusan S. Zrnich. Estimates of Large Spectrum Width from Autocovariances. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. Vol. 21, Jun 2004. Pp.969 – 974.

18. Ефремов В.С., Вылегжанин И.С., Вовшин Б.М., Лаврукевич В.В., Пушков А.А. Первые результаты оперативных доплеровских и поляризационных измерений характеристик метеообразований в ДМРЛ-С. Сборник трудов 2-й Всероссийской конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды», т.1, Санкт-Петербург, 2012. С.370-380.

19. Лаврукевич В. В., Пушков А. А. Оценивание спектральных характеристик метеообразований в перспективных ДМРЛ. Труды XXVII Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред», т.2, С-Пб, 2011, с.318-323.

20. Жуков В.Ю., Щукин Г.Г. Обоснование метода оценивания доплеровского сдвига частоты эхосигнала метеообразований при негауссовой форме их спектра. 3-и Всероссийские Армандовские чтения, 2013 г., Муром, 2013. С.174-180.

Поступила 12 февраля 2015 г.

On influence of wind shear on directional distribution of spectrum width of radar signal

Dmity Anatolyevich Denisenkov - Engineer Department of technologies and Army geophysical support. Military space academy named after A.F. Mozhaysky.

E-mail: vka@mil.ru.

Vladimir Yuryevich Zhukov – Candidate of Technical Sciences Senior research associate Department 32 VINI. Military space academy named after A.F. Mozhaysky.

E-mail: vuzhukov2002@list.ru.

Address: 197082, St. Petersburg, Zhdanovskaya st. 13.

Abstract: The set of options of coherent weather radar includes creation of wind vertical profile. It is restored in area from 1 to 15 km with resolving ability 0,5 - 1 km. Thus the boundary layer of 500 m thick, which is most vital for aviation, remains uninspected. Elimination of this shortcoming within accepted measurements practice requires introduction of considerable changes into radar design and that involves big expenses of costs and efforts, and sometimes encounters insuperable difficulties. At the same time information analysis obtained by Rosgidromet modern net of storm alert warning allows to assume that to solve given problem is possible already now by introduction of new algorithms of its processing. In particular, the attention of article's authors was drawn by features of parameter space distribution on maps of spectrum width of hydrometeors radial speeds. Ring-shaped "standard" pictures of increased values with two symmetrical gaps relative to map center are often observed, the same two rings displaced from each other or areas of small parameter value of in the shape of spirals curling round the radar. Preliminary analysis has shown possibility of close connection of wind vertical profile with features and parameters of these distributions. To confirm emerged hypothesis the numerical model of forming process of considered maps was developed which was applied to particular cases of change of wind vertical velocity vector. The conclusion was drawn on the basis of the conducted research that existence of wind shear in boundary layer causes specific changes of signal parameters which was received by weather radar at small antenna elevation angles. It enables to assume solution possibility of inverse problem - to restore targeted wind vertical profile through characteristics of received maps.

Key words: width spectrum, weather radar, wind shear.

References

1. Doviak R., Zrnich. Doppler radars and meteorological observations. L.: Gidrometeoizdat, 1988, 512p.
2. Levin B.R. Theoretical fundamentals of statistical radio engineering. M.: Sov. radio, 1969, 752p.
3. Melnikov V. M. Information processing Doppler WR. Zarubezhnaya radioelektronika, 1993, No. 4, pp. 35 - 43
4. Guide to wind shear at small altitudes. Mezhdunarodnaya organizatsiya grazhdanskoj aviatsii, 2005.
5. Blokhina V. I. Aviation weather forecasts. Manual on discipline "Aviation forecasts". <https://paraplan.ru>.
6. Stepanenko V.D. Radar-location in meteorology. - L.: Gidrometeoizdat, 1966.
7. Gorelik A.G. Development trends of foreign and domestic Doppler radar-location. M.: Moskovskaya gosudarstvennaya akademiya priborostroyeniya i informatiki, 1995.
8. Gotyur I.A., Devyatkin A.M., Zhukov V. Yu., Kuleshov Yu.V., Schukin G.G. Information opportunities of Doppler weather radars with double polarization. Scholarly notes of Russian State Hydrometeorological University No. 32. Nauchno-teoretichesky zhurnal. - SPb.: RGGMU, 2013, pp. 66-83.
9. V. Yu. Zhukov, Schukin G.G. Current state and trends of weather radars network. XXIV All-Russian scientific conference "Radio propagation" devoted to the 100 anniversary since the birth of professor V. M. Polyakov. Conference works. Irkutsk, 2014, pp. 133-136.
10. Doppler weather radar DMRL-S. Operation manual.
11. Manual on weather support for civil aviation of Russia (NMO GA-95).
12. Zhukov V. Yu., Schukin G.G. On radar measurements' features of hydrometeors radial speed with two-modal spectrum of signal reflected by them. Works of XXIII All-Russian symposium "Radar research of environments", St. Petersburg, 2013, pp. 337-344.
13. Louis H. Jansen, Gerard A. Van Der Spek. The Shape of Doppler Spectra from Precipitation. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems Vol. AES-21, No. 2 March 1985, pp.208 - 219.
14. Valery M. Melnikov, Richard J. Doviak. Turbulence and Wind Shear in Layers of Large Doppler Spectrum Width in Stratiform Precipitation. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. Vol. 26, March 2009, pp.430 - 443.

15. Lavrukevich U., Pushkov A., Sedletsky R., Vovshin B., Vylegzhanin I. "The Theory and Practice of Application Pseudo Random Signals in Doppler Meteoradars". Proceedings on International Radar Symposium (IRS-2011), Leipzig (Germany), 2011, pp.256-261.

16. Zhukov V. Yu., Schukin G.G. State and trends of Doppler weather radar network. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2014, No. 2, pp. 92-100.

17. Valery M. Melnikov, Dusan S. Zrnic. Estimates of Large Spectrum Width from Autocovariances. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. Vol. 21, Jun 2004, pp.969 - 974.

18. Efremov V. S., Vylegzhanin I.S., Vovshin B. M., Lavrukevich V. V., Pushkov A.A.

The first results of operational Doppler and polarization measurements of moisture target characteristics in DMRL-S. Collection of works of the 2nd All-Russian conference "Problems of Military and Applied Geophysics and Environmen Monitoring", v.1, St. Petersburg, 2012, pp. 370-380.

19. Lavrukevich V. V., Pushkov A. A. Estimation of spectral characteristics of moisture target in future DMRL. Works of XXVII All-Russian symposium "Radar research of environments", v.2, S-Pb, 2011, pp. 318-323.

20. Zhukov V. Yu., Schukin G.G. Justification of method of Doppler frequency shift's estimation of moisture target echo signal with non-Gaussian form of their spectrum. 3-i Vserossiyskiye Armandovskiye chteniya, 2013, Murom, 2013, pp.174-180.