

Метод восстановления профиля ветра по оценкам ширины спектра радиолокационного сигнала

В.Ю. Жуков, Д.А. Денисенков, Г.Г. Щукин

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, 197198 г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13, e-mail: dimasden@yandex.ru

Обобщаются результаты исследования авторов по разработке метода обнаружения сдвига ветра и восстановления его вертикального профиля при помощи оценок ширины спектра радиальных скоростей частиц. Описываются наблюдаемые на практике различные пространственные распределения данного параметра с точки зрения единой теории. Предлагаются варианты практического применения метода.

The results of the authors studies on the development of the wind shear detection method and recoveries of vertical profile of wind using spectrum width estimates of radial velocities of the particles are summarized. The observed spatial distribution of the parameter are presented. The variants of practical application of the method are offered.

Введение

В предыдущих работах авторов были рассмотрены возможности определения величины сдвига ветра по оценкам ширины спектра принимаемых радиолокатором отражений метеообразований. Идея данных измерений состоит в использовании особенностей пространственного распределения указанного параметра [1-3]. В зависимости от характера сдвига – изменяется ли только сила ветра, только его направление или и то и другое одновременно – и толщины слоя, в котором имеют место данные изменения, на картах ширины спектра появляются различные характерные распределения рассматриваемой величины. В настоящей статье делается попытка обобщения результатов исследований в единую теорию.

Основная часть

Анализ всех наблюдаемых на картах ширины спектра радиальных скоростей частиц распределений параметра показывает, что все они могут быть разбиты на три вида:

- Концентрические дуги больших значений (рис. 1а);
- Центрально-симметричные спирали больших значений (рис. 1б);
- Центрально-симметричные спирали малых значений (рис. 1в).

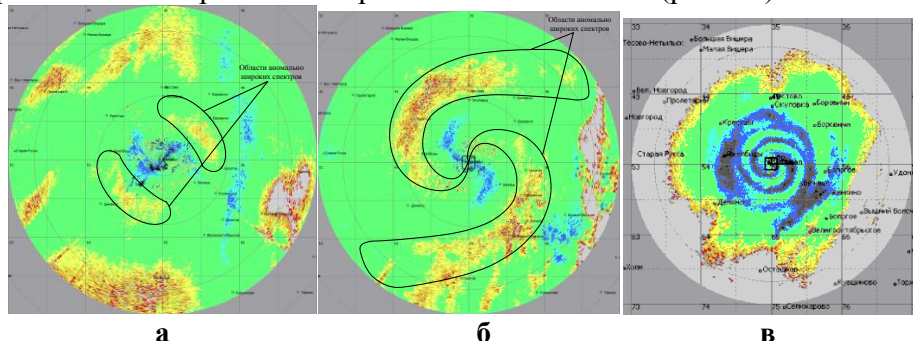


Рис. 1. Характерные распределения параметра на карте ширины спектра радиальных скоростей частиц: дуги (а); спирали больших значений параметра; спирали малых значений параметра.

Для объяснения того, как появляются подобные «картинки», было сделано предположение о том, что они являются результатом наблюдения радиолокатором слоя атмосферы со сдвигом ветра. Была создана модель формирования указанной карты в данных условиях [4,5]. Распределение параметров ветра принималось слоисто однородным, а окружающее пространство считалось состоящим из трех слоев – двух со стационарными параметрами и одного, расположенного между ними, со сдвигом ветра. Численное решение модели показало правильность выдвинутой гипотезы и дало возможность объяснить получаемые конфигурации тем, как соотносятся вертикальные размеры изучаемого слоя и элемента разрешения радиолокатора. Соответственно этому были выделены три варианта модели. В зависимости от количества слоев, одновременно попадающих в луч радиолокатора, они названы трех-, двух- и однослойным. Рассмотрим каждый из вариантов по отдельности.

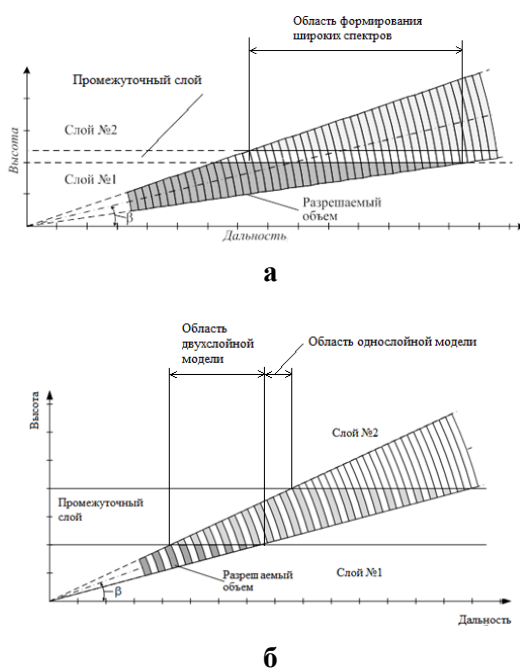


Рис.2. Схема наблюдения радиолокатором пространства, соответствующая трехслойной (а) двухслойной и однослойной (б) моделям.

Трехслойный вариант модели (рис. 2а) является основным, т.к. к нему может быть приведена любая сложившаяся ситуация путем изменения угла места антенны и дальности наблюдений. В данных условиях спектр отражений становится двухмодальным, из-за чего его ширина становится аномально большой. Независимо от того, насколько мощное отражение создает слой со сдвигом ветра, его вкладом в суммарный спектр можно пренебречь, т.к. она равномерно распределяется по оси частот в отличие от отражений двух других слоев.

Величина изменения радиальной составляющей скорости ветра в этом случае определяется формулой $\Delta V = \sqrt{4\sigma_{V_{\text{макс}}}^2 - 2\sigma_{V_1}^2 - 2\sigma_{V_2}^2}$, где $\sigma_{V_{\text{макс}}}$ - наибольшее из значений ширины спектра радиальных скоростей частиц, наблюдаемых в зоне их аномального расширения; σ_{V_1} , σ_{V_2} - ширина энергетического спектра радиальных скоростей частиц каждого из стационарных слоев. По полученной оценке и толщине слоя h определяется величина сдвига ветра $W = \Delta V/h$ [6].

При этом безразлично, вызван сдвиг изменением ветра по величине, по направлению или и тем и другим одновременно. Данная инвариантность делает рассматриваемый вариант универсальным с точки зрения обнаружения опасного

явления. Два других играют второстепенную роль и могут использоваться в случае, если надо не только обнаружить сдвиг, но и восстановить вертикальный профиль ветра.

Двухслойный вариант модели (рис. 2б) предполагает ситуацию, когда луч радиолокатора захватывает только два слоя – один стационарный и один с изменяющимися параметрами. Он представляет интерес лишь тогда, когда имеется поворот ветра с высотой, приводящий к появлению на карте ширины спектра спирали аномально больших значений. Одна часть спектра принимаемого сигнала постоянна и определяется отражениями от стационарного слоя, ширина второй изменяется по мере попадания в луч антенны более высоких участков слоя со сдвигом ветра. В результате суммарный спектр при определенном соотношении значений средней скорости частиц в каждом из слоев становится тоже двухмодальным, а его ширина аномально большой. Изменением ветра по величине можно пренебречь, за исключением случая, когда его начальное значение равно нулю (что является предметом особого рассмотрения). Скорость «завития» спирали, под которой понимается производная от азимута антенны φ как функции координаты дальности R , на котором наблюдается минимум ширины спектра, в этом случае находится по формуле $\frac{d\varphi}{dR} = \frac{\Omega}{4} \left(\beta + \frac{\sqrt{\pi}}{4} \Theta \right)$, где β – угол места антенны, R – дальность цели, Θ – ширина диаграммы направленности антенны на уровне 0,5 мощности [7]. Отсюда вытекает следующая формула нахождения скорости поворота ветра с высотой $\tilde{\Omega} = \frac{4}{\left(\beta + \frac{\sqrt{\pi}}{4} \Theta \right)} \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{R_2 - R_1}$, где φ_i, R_i – полярные координаты точки,

принадлежащей рассматриваемой спирали. Очевидно, что поворот спирали происходит почти в четыре раза медленнее поворота вектора скорости. Поэтому данный вариант следует использовать на практике только в случае, если невозможно прийти к третьему, последнему из них.

Однослойный вариант модели (рис. 2 б) возникает на достаточно малых дальностях, когда размер разрешаемого объема еще настолько мал по сравнению с толщиной слоя, что полностью в нем помещается. Тогда аномального расширения не происходит, зато формируется спираль малых значений рассматриваемого параметра. Механизм ее формирования иллюстрируется рисунком 3.

В зависимости от высоты расположения элемента разрешения радиолокатора в него попадают гидрометеоры с большим или меньшим разбросом радиальных скоростей. Очевидно, что минимум спектра достигается в точках максимума синусоиды, описывающей изменение радиальной скорости ветра с высотой. Это соответствует одинаковой и противоположенной направленности антенны и ветра. При повороте антенны синусоида смещается вверх или вниз в зависимости от направления вращения вектора скорости частиц. Теперь элемент разрешения, в котором достигается минимум ширины спектра, достигается в элементе разрешения, расположенном на новой высоте, что соответствует при постоянном угле места антенны его смещению по дальности. Так формируется спираль. Скорость вращения ветра оценивается в этом случае по формуле $\tilde{\Omega} = \frac{1}{\beta} \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{R_2 - R_1}$ [8]. В отличие от предыдущего случая здесь отсутствует множитель 4, что гарантирует большую точность оценивания.

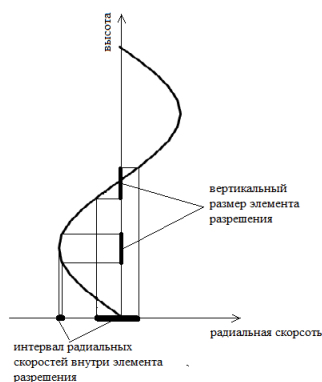


Рис. 3. Схема образования спирали малых значений ширины спектра отражений при однослойной модели окружающего пространства.

Заключение

Приведенные результаты исследований показывают, что восстановить вертикальный профиль ветра и обнаружить опасный сдвиг ветра можно не путем измерения среднего значения спектра радиальных скоростей частиц на разных высотах, а при помощи оценок ширины данного спектра. Предлагаемый метод не накладывает жестких требований к ширине луча антенны, что позволяет внедрить его в уже действующие радиолокаторы без каких-либо изменений в их конструкции или режиме работы.

Литература

1. Готюр И.А., Жуков В.Ю., Кулешов Ю.В., Чернышев С.В., Щукин Г.Г. Доплеровский радиолокационный метод определения характеристик поля ветра и некоторые результаты.// Ученые записки РГГМУ, 2011, № 21, с. 66–75.
2. Жуков В.Ю., Щукин Г.Г. Современные проблемы метеорологической радиолокации.// Радиотехника и электроника, 2016, т.61, № 10, с. 927–939.
3. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю. Исследование влияния профиля ветра в пограничном слое на пространственное распределение ширины спектра.// Труды III Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды», Санкт-Петербург, 2014, – с. 65–71.
4. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю. Оценивание характеристик высотного распределения скорости ветра в пограничном слое атмосферы с помощью карт ширины спектра сигнала, принимаемого метеорологическим радиолокатором.// Труды XXI симпозиума по радиолокационному зондированию природных сред, Санкт-Петербург, 2014, – с. 10–13.
5. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю. Обнаружение сдвига ветра на основе анализа карт ширины спектра сигнала, принимаемого метеорологическим радиолокатором.// Вестник РосНОУ, 2015, №10, с. 10–13.
6. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю. О влиянии сдвига ветра на пространственное распределение ширины спектра радиолокационного сигнала.// Радиотехнические и телекоммуникационные системы, 2016, №1, с. 5–14.
7. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Первушин Р.В., Щукин Г.Г. Метод обнаружения сдвига ветра при помощи доплеровского метеорологического радиолокатора.// Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2016. № 3 (23). с. 68–73.
8. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю. Исследование эффективности методов радиолокационного измерения профиля ветра // VI Всероссийские Армандовские чтения. Труды конференции «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред», Муром, 2016, с. 402–406.