

А.Д. Кузнецов, О.С. Сероухова

ВАЛИДАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕТРА В СВОБОДНОЙ АТМОСФЕРЕ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ ДОПЛЕРОВСКОЙ МРЛ

A.D. Kuznetsov, O.S. Serouhova

VALIDATION OF WIND CHARACTERISTICS OBTAINED IN THE FREE ATMOSPHERE BY DOPPLER MRS

Рассматривается валидация данных измерений характеристик ветра в свободной атмосфере, полученных с помощью доплеровских метеорологических радиолокаторов (ДМРЛ). В качестве эталонных использовались данные, полученные с помощью аэрологического радиозондирования атмосферы.

Ключевые слова: доплеровский метеорологический радиолокатор, аэрологическое радиозондирование атмосферы, валидация.

This paper considers the validation of the wind measurement data in the free atmosphere, obtained by Doppler meteorological radar (DMRL). Data obtained from aerology radiosondes sounding are used as reference.

Key words: doppler meteorological radar, aerology soundings of the atmosphere, validation.

Введение

Доплеровские метеорологические радиолокаторы (ДМРЛ) завоевали прочные позиции во многих областях метеорологии. При этом есть основания полагать, что большое количество приоритетных задач современной радиолокационной метеорологии может быть эффективно решено только с использованием современных технологий, охватывающих как получение, так и обработку радиолокационной информации от ДМРЛ [1, с. 223–225; 2, с. 63–67]. Однако, как показывает практика, развитие этих технологий требует разработки адекватных математических моделей, которые были бы применимы при интерпретации радиолокационных данных для получения конкретных метеорологических величин. Поскольку таких моделей может существовать несколько, то возникает задача оценки качества той продукции, которую позволит получить каждая такого рода модель. Настоящая работа как раз и посвящена рассмотрению перспектив использования одной из моделей, реализующей обработку данных ДМРЛ для ветрового зондирования атмосферы — валидацию аэрологических данных, полученных на основе использования эффекта Доплера.

Трудности разработки методов ветрового зондирования связаны с тем, что ветер является величиной, быстроизменяющейся во времени и пространстве. Его скорость и направление могут варьироваться в широких пределах, причем резкие изменения могут возникать в «тонких» слоях, составляющих всего несколько десятков метров. Вместе с тем, такого рода данные — подробные и надёжные данные о ветре в нижних

слоях атмосферы необходимы для различных отраслей хозяйственной деятельности. ДМРЛ позволяют получать информацию о ветровом режиме как в облаке, так и вне его, а также информировать о возможном появлении шквала, смерча, града, об интенсивности и форме атмосферных осадков. Возможность наблюдать за появлением опасных явлений погоды, рассчитывать их скорость и направление перемещения позволили МРЛ, а теперь и ДМРЛ, занять лидирующие позиции в штормовом оповещении [3, с. 114–118]. Использованные в данной работе измерения характеристик ветра в свободной атмосфере были выполнены в 2011 г. с помощью поляризационного доплеровского метеолокатора *C*-диапазона, установленного на Валдае [3, с. 1, 9]. Для валидации данных измерений характеристик ветра в свободной атмосфере, полученных с помощью этого доплеровского радиолокатора, в качестве эталонных данных использовались результаты аэрологического радиозондирования на аэрологической станции в г. Бологое. Поскольку эти результаты были получены независимо от данных доплеровского зондирования и являются традиционным методом ветрового зондирования, то их можно рассматривать в качестве эталонных.

Корректный подход к оценке точности измерения профилей ветра с помощью ДМРЛ должен заключаться в осуществлении специальной серии экспериментов, реализующих одновременное синхронное ветровое зондирование свободной атмосферы с помощью ДМРЛ и радиозондового радиолокационного комплекса. Полученные таким образом ряды измерений позволили бы определить различные количественные характеристики, описывающие степень совпадения данных, полученных с использованием разных методов зондирования. Однако надо отдавать себе отчет в том, что даже в случае проведения синхронных наблюдений необходимо было бы разработать методику, корректно учитывающую различия в «природе» получаемых данных. В частности, нужно учесть тот факт, что данные аэрологического зондирования являются усредненными характеристиками ветра в соответствующих слоях, а также, что толщина этих слоев меняется с высотой. Кроме того, нужно учесть смещение радиозонда в горизонтальной плоскости от точки выпуска, конечное время измерения профиля скорости и направления ветра, погрешности измерений и др. Имеются свои особенности и у данных ДМРЛ — переменная величина зондирующего объема, специфика применяемой методики перехода от радиального профиля ветра к горизонтальному профилю и др. [5, с. 46–49, с. 277–282]. Аналогичные проблемы возникают при валидации спутниковых данных о вертикальных профилях температуры и влажности на основе информации с наземных аэрологических станций.

Поскольку в данной работе у нас отсутствовала возможность организации наблюдений подобным образом, то сопоставление результатов ветрового зондирования было проведено на качественном уровне путем графического сравнения вертикальных профилей скорости и направления ветра. Также заметим, что обычно валидацию данных, получаемых с помощью тестируемой измерительной системы, производят ее разработчики и изготовители в процессе проведения заводских испытаний и опытной эксплуатации. Однако, учитывая создаваемую в настоящее время широкую национальную радиолокационную сеть, базирующуюся именно на рассматриваемом поляризационном доплеровском метеорологическом радиолокаторе *C*-диапазона, представляется целесообразным провести сопоставление радиолокационных и радиозондовых данных на основе той информации, которая имела в распоряжении авторов.

Подготовка данных о характеристиках вертикальных профилей ветре к валидации

Как уже отмечалось, для валидации данных о ветре (скорости и направлении ветра) использовались данные доплеровского радиолокатора, расположенного на Валдае, за следующие сроки: с 03.12.2011 по 25.12.2011. В качестве эталонных были использованы данные, полученные при аэрологическом зондировании ветра в свободной атмосфере, которое проводилось в г. Бологое. Сроки обрабатываемых данных те же: 03.12.2011–25.12.2011.

Данные, полученные при помощи доплеровского радиолокатора, первоначально были получены в графической форме. Пример такого представления данных ветрового зондирования, выполненного с помощью ДМРЛ, представлен на рис. 1. Здесь левая часть график представляет зависимости скорости ветра (нижняя шкала, $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$) от высоты (ось ординат, км), а правая часть графика — зависимости направления ветра (шкала: 0–360 град) от высоты (ось ординат, км). Последующая оцифровка этих данных производилась в несколько этапов.

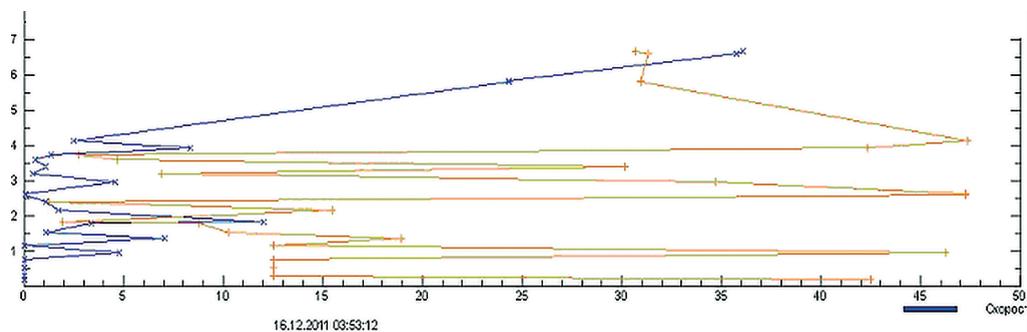


Рис. 1. Данные о скорости и направлении ветра, полученные при помощи доплеровского радиолокатора

Первоначально данные копировались в «*Microsoft Paint*» — простой растровый графический редактор, входящий в состав всех операционных систем «*Windows*». В «*Microsoft Paint*» каждый рисунок с графиками скорости и направления ветра по данным ДМРЛ обрезался в верхней части для исключения пустого пространства и сохранялся в формате «*JPEG*» в виде рисунка.

Далее использовалась программа «*Surfer 9*». С ее помощью производилась оцифровка данных, содержащихся на каждом графическом файле. Для этого использовалась имеющаяся в этом пакете опции «*Map*». Определить координаты позволяет опция «*Digitize*». Выбрав эту опцию, курсор наводился на контрольные точки и таким образом были получены соответствующие координаты. Координаты сохранялись изначально в блокноте (скорость и направление ветра по высоте). Затем с помощью «*Excel*» относительные координаты точек на графике были преобразованы в истинные значения высоты, скорости и направления ветра. Представление этих данных показано в табл. 1. Таким образом, были оцифрованы все имеющиеся данные о скорости и направлении ветра по данным ДМРЛ — с 03.12 2011 по 25.12 2011.

Таблица 1

Фрагмент одной из таблиц со значениями скорости ветра, направления ветра и высоты

Высота, км	Скорость, м/с	Высота, км	Направление, град
0,21	0,07	0,17	305,8
0,26	0,07	0,26	90,5
0,48	0,14	0,52	90,5
0,74	0,07	0,78	90,5
1,01	4,85	0,96	332,6
1,18	0,14	1,18	90,5
1,35	7,16	1,35	136,5

Следующей задачей было получение эталонных данных о ветровом зондировании, выполненным на аэрологической станции г. Бологое.

Первоначально эталонные данные с помощью пакета «OSKAR» были получены в графическом (аэрологическая диаграмма) и табличном вариантах. В табличном варианте были представлены данные о высоте, скорости и направлении ветра, температуре, дефиците точки росы (рис. 2). В таблице имеющихся данных были пропуски (см. рис. 2). Для их заполнения использовались возможности пакета «OSKAR»: для получения данных, отсутствующих в таблице, курсором достаточно было навести на аэрологическую диаграмму, выбрать давление и в верхнем правом углу в цифровом форме выдавались сведения о высоте на данном уровне. Сведения о скорости и направлении ветра снимались аналогичным способом. Все эти данные вводились в «Excel», что позволило создать электронные таблицы — вторую часть архива данных.

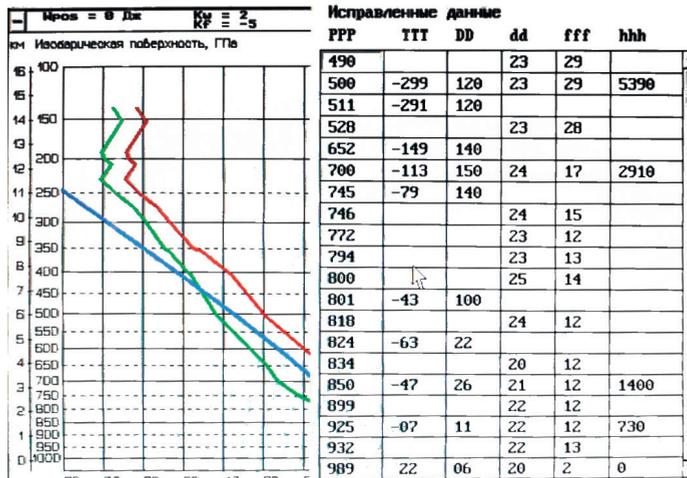


Рис. 2. Графическая и табличная формы представления данных зондирования на фоне аэрологической диаграммы (Бологое, 16.12.2011, 00.00 UTC)

Созданная таким образом квазисинхронный архив данных доплеровского и аэрологического зондирования содержал 18 электронных таблиц. При этом все данные ДМРЛ относились к сроку 04 ч 01 мин и сроку 16 ч 01 мин, а данные аэрологического зондирования — к срокам 00 ч 01 мин и 12 ч 01 мин (за те же сутки).

Сравнительный анализ аэрологических и доплеровских данных

Способ формирования баз данных, используемый в данной работе, не позволил синхронизировать информацию о скорости и направлении ветра по высоте — в каждом конкретном случае сетка высот была своя. Это не является принципиальным недостатком, поскольку можно произвести интерполяцию данных на единую сетку высот. Однако, в связи с использованной технологией оцифровки имеющихся данных, это представляется нецелесообразным. Поэтому сопоставления данных в данной работе производилось на качественном уровне путем построения совместных графиков — на одном графике строились данные и аэрологические, и доплеровские. Примеры такого рода графиков для скорости ветра и направления ветра представлен на рис. 3–7.

Визуальный контроль графического представления данных ДМРЛ показал, что в целом ряде случаев данные ветрового радиолокационного зондирования содержат грубые ошибки, которые не были отбракованы системой автоматической обработки (в качестве примера см. рис. 3). Поэтому не все из имеющихся данных, а только те из них, которые по нашему мнению, не содержали грубых ошибок, в дальнейшем участвовали в процессе валидации.

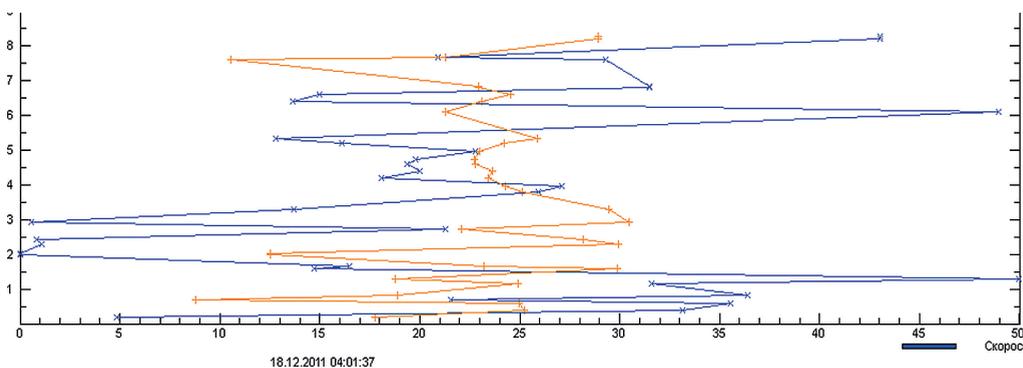


Рис. 3. Профили скорости и направления ветра с «выбросами» (ошибками), срок 18.12.2011

Исключив из рассмотрения данные ДМРЛ с выбросами, рассмотрим результаты сопоставления доплеровских и аэрологических данных на основе полученных ранее 18 сроков зондирования. Типичные результаты такого сопоставления иллюстрируют графики, представленные на рис. 4–7.

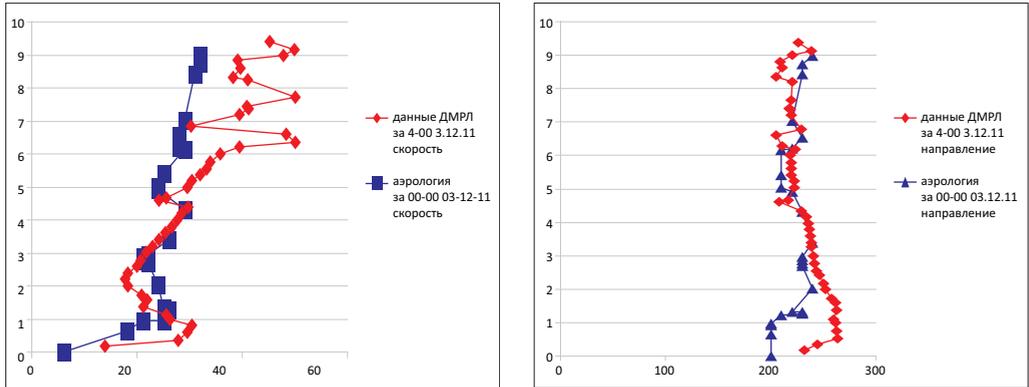


Рис. 4. Сопоставление профилей скорости и направления ветра, срок 03.12.2011

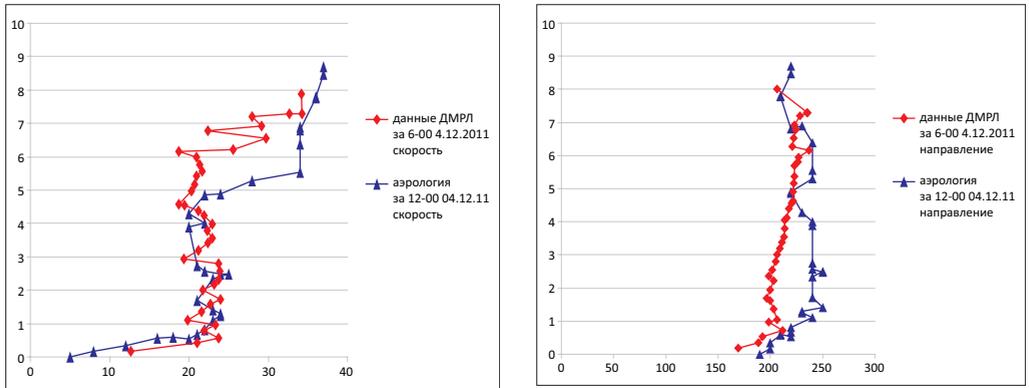


Рис. 5. Сопоставление профилей скорости и направления ветра, срок 04.12.2011

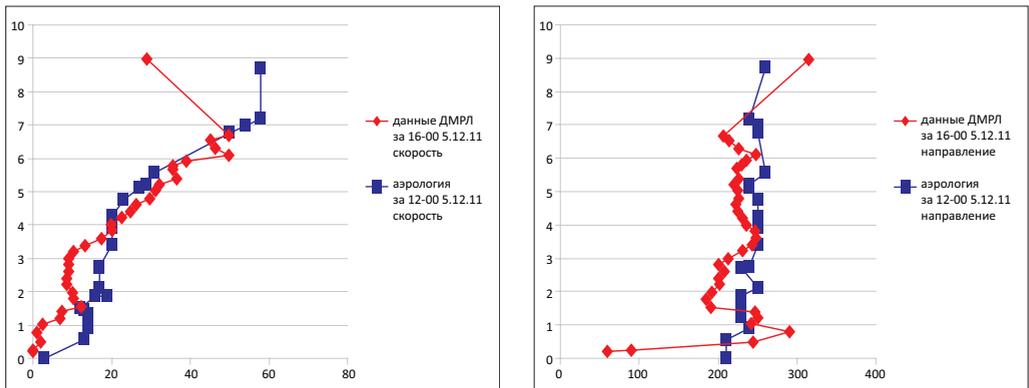


Рис. 6. Сопоставление профилей скорости и направления ветра, срок 05.12.2011

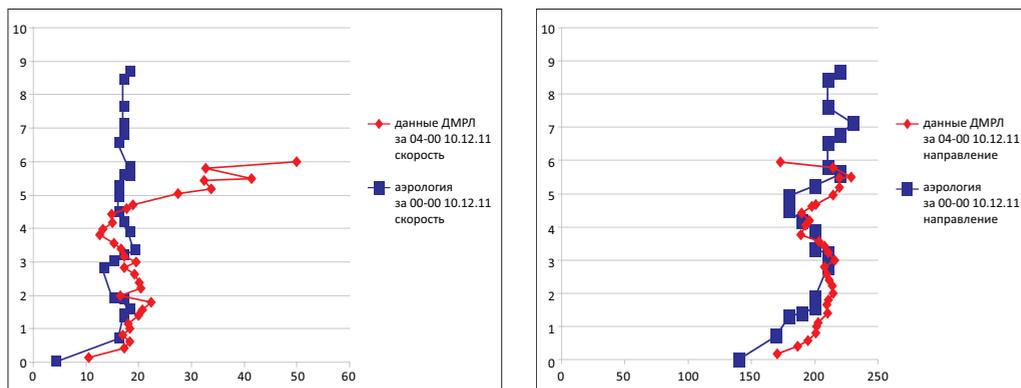


Рис. 7. Сопоставление профилей скорости и направления ветра, срок 10.12.2011

Комплексный анализ всех имеющихся данных показал следующее:

1. В данных аэрологического зондирования отсутствуют «выбросы» — грубые ошибки. Это, по всей видимости, определяется тем, что перед вводом этих данных в базу «OSKAR» они были на аэрологической станции подвержены предварительному контролю на предмет выявления и устранения такого рода ошибок.
2. В данных доплеровского зондирования присутствуют, по нашему мнению, «выбросы» — грубые ошибки. Пример данных с наличием такого рода «выбросов» представлен на рис. 3. В дальнейшем доплеровские профили с такого рода выбросами из анализа исключались и в используемый для валидации архив данных не вошли. Таким образом, данный этап анализа показал необходимость разработки методов и средств предварительного контроля доплеровских данных до представления последних потребителю.
3. При визуализации профиля направления ветра по данным ДМРЛ не предусмотрен учет так называемого «перехода через ноль» направления ветра. При изменении направления ветра с 10° на 350° фактическое изменение направления ветра составляет 20° , а по используемой на ДМРЛ для графического представления профиля направления ветра методике такое изменение направления ветра представлялось бы как изменение направления на $350^\circ - 10^\circ = 340^\circ$.
4. В нижней и средней тропосфере наблюдается достаточно хорошее согласование данных ДМРЛ и радиозонда как по скорости, так и по направлению ветра.
5. Выше 5–6 км становятся заметными различия в скоростях ветра по данным ДМРЛ и радиозонда, причем чаще всего скорости по данным ДМРЛ отклоняется в сторону больших значений.

Заключение

В результате проведенного исследования в целом можно констатировать, что при определенной доработке программного обеспечения поляризационного доплеровского метеорологического радиолокатора С-диапазона получаемые с его помощью данные

ветрового зондирования атмосферы могут служить важным источником информации о ветровом режиме тропосферы, особенно в период между стандартными сроками зондирования на аэрологических станциях. В то же время проведенное сопоставление показало необходимость определенной доработки используемых методик обработки данных о характеристиках ветра, получаемых с помощью ДМРЛ. Такая доработка, в частности, могла бы содержать следующие элементы:

- создание блока контроля качества вертикальных профилей скорости и направления ветра (в частности, учитывающего временные ряды скорости и направления ветра, полученные ДМРС за предыдущие сроки, данные ближайшей аэрологической станций за предыдущие сроки, прогностические данные);
- изменение формы графическом представлении вертикального профиля направления ветра путем учета перехода направления через 0° .

Понятно, что проведенное исследование носит качественный характер, основано на относительно небольшой выборке и в полной мере не может претендовать на статистически значимую оценку. Тем не менее, оно представляется весьма полезным, поскольку дает представление о некоторых особенностях результатов ветрового зондирования свободной атмосферы, выполняемых с помощью ДМРЛ.

Литература

1. Автоматизированные метеорологические радиолокационные комплексы «Метеочейка». Под ред. Н.В. Бочарникова, А.С. Солонина. — СПб.: Гидрометеиздат, 2007. — 236 с.
2. Восканян К.Л., Сероухова О.С., Солонин А.С. К вопросу о методике радиолокационного измерения интенсивности атмосферных осадков. // Учёные записки РГГМУ, 2013, № 27, с. 63–70.
3. Готюр И.А., Девяткин А.М., Жуков В.Ю., Кулешов Ю.В., Шукин Г.Г. Информационные возможности доплеровских метеорологических радиолокаторов. // Учёные записки РГГМУ, 2013, № 21, с. 66–75.
4. Ефремов В.С., Вовшин Б.М., Вылегжанин И.С., Лаврукевич В.В., Седлецкий Р.М. Поляризационный доплеровский метеорологический радиолокатор с-диапазона со сжатием импульсов. — Электронный ресурс: [<http://jre.cplire.ru/jre/oct09/6/text.html>].
5. Киселев В.Н., Кузнецов А.Д. Методы зондирования окружающей среды (атмосферы). — СПб.: РГГМУ, 2004. — 429 с.
6. Шукин Г.Г., Степаненко В.Д., Снегуров А.В. Перспективные направления радиолокационных наблюдений за атмосферой. // Труды ГГО, 2010, вып. 561, с. 223–241.