

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

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА ОБНАРУЖЕНИЯ
СДВИГА ВЕТРА ПО ОЦЕНКАМ ШИРИНЫ СПЕКТРА
РАДИОЛОКАЦИОННОГО СИГНАЛА**

D.A. Denisenkov, V.Y. Zhukov, O.A. Sivak, G.G. Shchukin

**THE RESERCH OF EFFICIENCY OF SHEAR DETECTION METHOD
BY ESTIMATES OF THE SPECTRUM WINDTH OF THE RADAR SIGNAL**

Предлагаемый новый метод обнаружения сдвига ветра по оценкам ширины спектра сигнала сравнивается с данными аэрологического зондирования. Доказывается хорошее совпадение результатов, получаемых обоими методами, что говорит о высокой эффективности исследуемых алгоритмов обработки радиолокационного сигнала.

Ключевые слова: метеорологическая радиолокация, сдвиг ветра, ширина спектра сигнала, безопасность полетов.

This new method for detection of wind shear by estimates of the spectrum width of the radar signal is compared with the data of upper-air sounding. High agreement of the results obtained by both methods is proved, indicating the high efficiency of the studied radar signal processing algorithms.

Key words: Meteorological radiolocation, wind shear, width of the signal spectrum, safety of flights.

Введение

Сдвиг ветра — явление погоды, представляющее опасность для авиации на высотах до 500 м [8] и ракет космического назначения на начальном участке полета. Поэтому его своевременное обнаружение в пограничном слое атмосферы является актуальной задачей обеспечения безопасности полетов. Для ее решения разработано большое количество технических средств. Однако ни одно из них не способно полностью удовлетворить предъявляемым требованиям, вследствие чего исследования в данном направлении продолжают. Одно из них — разработка нового метода, основанного на использовании оценок ширины спектра радиальной скорости гидрометеоров, получаемых метеорологическим радиолокатором [1].

Методы обнаружения и измерения сдвига ветра

Существует два возможных подхода к решению задачи обнаружения и измерения величины сдвига ветра. Первый из них — восстановление вертикального профиля ветра посредством контактных методов измерения. К ним относятся мачты с анемометрами и радиозонды. Но высота мачт не превышает 150 м, а радиозонды запускаются не чаще двух раз в сутки. Ни то, ни другое неприемлемо для оперативной работы. Поэтому на

практике применяют второй: те же измерения, но с помощью средств дистанционного зондирования атмосферы. Он избавлен от недостатков первого, но обладает другим — ни один из относящихся к нему способов измерения (оптический, акустический, радиоакустический и радиолокационный) не всепогоден. Из-за этого в аэропортах приходится ставить, как минимум, два технических средства, взаимно дополняющие друг друга. Наиболее распространено сочетание оптического (лидарного) и радиолокационного (радарного) измерителей, как это сделано, например, в аэропорту Гонконга (рис. 1) [8].

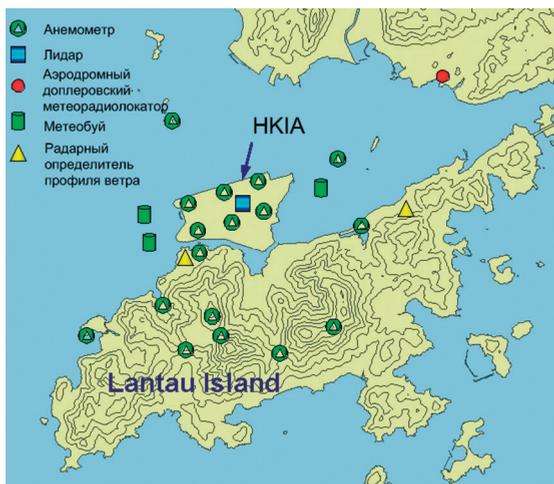


Рис. 1. Карта Гонконгского международного аэропорта (HKIA) и его окрестностей

В результате и так немалые финансовые расходы на покупку и эксплуатацию оборудования умножаются на два. Поэтому естественно желание передать рассматриваемые функции другим техническим средствам, уже имеющимся в распоряжении служб метеорологического обеспечения. В частности, радиолокационный измеритель мог бы быть создан на базе метеорологического радиолокатора. Однако реализация такого намерения наталкивается на непреодолимые трудности. Дело в том, что сама единица измерения сдвига ветра (м/с на 100 футов) [8] предполагает наличие разрешающей способности не хуже 30 м (100 футов). Следовательно, именно таким должен быть поперечный размер элемента разрешения радиолокатора. В ДМРЛ-С (ширина диаграммы направленности 1 градус при длине волны 5,3 см и диаметре антенны 4,5 м) [5] это условие выполняется на дальностях до 1,7 км, то есть практически в границах ближней зоны, где луч антенны еще не сформировался. В малогабаритных радиолокаторах, имеющих ширину луча, в лучшем случае, 3 градуса («Контур МЕТЕО-01») [7], требуемый поперечный размер разрешаемого объема имеет место на дальностях не более 550 м, то есть в «мертвой зоне», где приемник еще не восстановился после воздействия излучаемого импульса.

Выход состоит в применении метода обнаружения сдвига ветра при помощи анализа пространственного распределения ширины спектра принимаемого сигнала (далее — метод измерения по оценкам ширины спектра) [4, 6], который не требует

восстановления вертикального профиля ветра. Он основан на эффекте появления anomalно широкого спектра сигнала, отраженного от метеоцели, имеющей сложную внутреннюю структуру, а именно, неравномерное распределение по высоте скоростей составляющих ее частиц. Схема наблюдения радиолокатором такой цели, состоящей из двух слоев, представлена на рис. 2 [2]. При определенных условиях (угол места и дальность) образуется ситуация, когда в зоне обзора радиолокатора присутствуют одновременно два горизонтальных отражающих слоя.

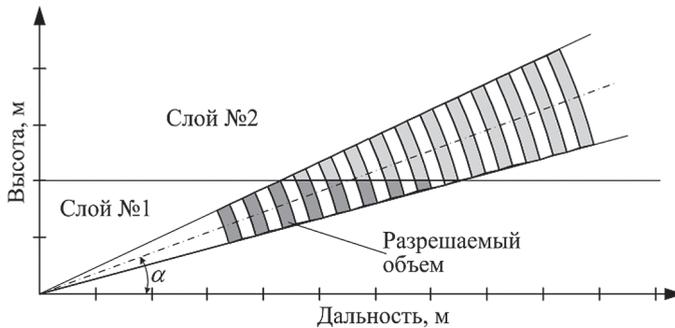


Рис. 2. Схема наблюдения радиолокатором метеоцели, состоящей из двух слоев

Если радиальные составляющие скоростей частиц каждого из слоев различны, спектр создаваемых ими отражений становится двухмодальным, как показано на рис. 3. Соотношение мощностей составляющих сигнала изменяется с изменением расстояния до элемента разрешения, от которого этот сигнал получен. На какой-то дальности наступает их примерное равенство, и ширина спектра принимаемых отражений становится anomalно большой. Разность средних значений радиальных скоростей частиц, помимо прочих параметров, зависит от азимута антенны. Таким образом, при сканировании радиолокатора формируется характерное пространственное распределение ширины спектра. Пример получаемой при этом карты конического разреза приведен на рис. 4 [10]. На рис. 5 представлена схема формирования данной карты.

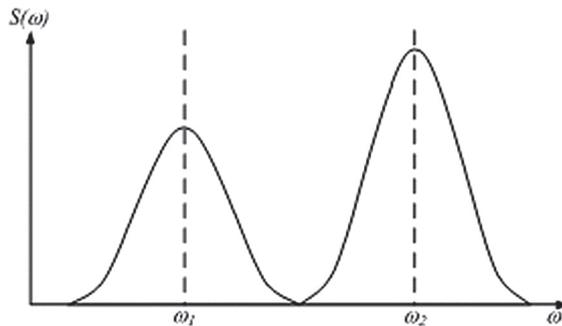


Рис. 3. Пример спектра сигнала, отраженного от участка со сдвигом ветра

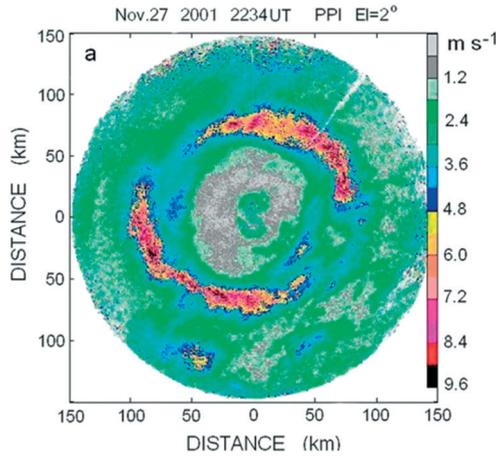


Рис. 4. Карта ширины спектра радиальных скоростей гидрометеоров (конический разрез)

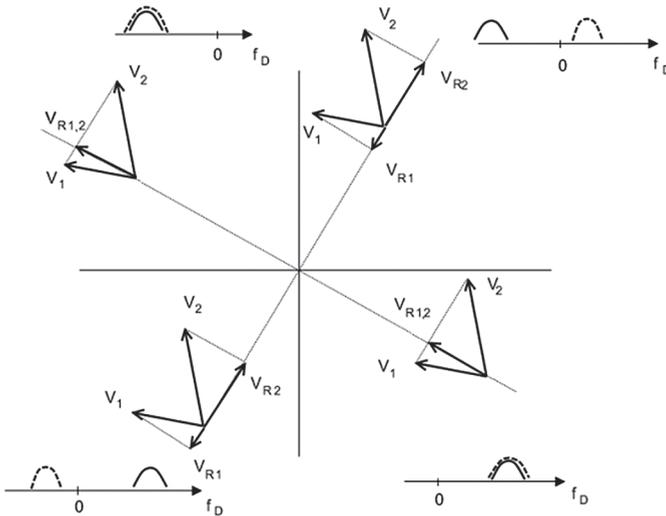


Рис. 5. Схема формирования карты, приведенной на рис. 4: сплошной линией обозначен спектр радиальных скоростей гидрометеоров во втором слое; пунктиром — в первом

Ширина спектра σ^2 суммарного сигнала $S(t)$, состоящего из двух составляющих $S_1(t)$ и $S_2(t)$, определяется формулой [7]

$$\sigma^2 = \frac{1}{P_1 + P_2} \left[P_1 \sigma_1 + P_2 \sigma_2 + \frac{P_1 P_2}{P_1 + P_2} (F_1 - F_2)^2 \right], \quad (1)$$

где F_1 и F_2 — средние частоты составляющих сигнала; P_1 и P_2 — мощности отражений от первого и второго слоев; σ_1 и σ_2 — ширина спектра этих отражений.

Своего наибольшего значения ширина спектра достигает при равенстве мощностей отражений от обоих слоев и при азимуте антенны, на котором значение разности $F_1 - F_2$ максимально и соответствует вектору разности скоростей $V_1 - V_2$ [3].

Величины σ_1 и σ_2 можно оценить по отражениям от соседних элементов разрешения, в которых присутствует только один из слоев. Тогда из (1) следует, что разность скоростей ветра в одновременно наблюдаемых слоях равна

$$\Delta V = V_1 - V_2 = \frac{\lambda}{2} \sqrt{4\tilde{\sigma}^2 - 2\tilde{\sigma}_1^2 - 2\tilde{\sigma}_2^2}, \quad (2)$$

где V_1 и V_2 — скорость ветра в нижнем и верхнем слоях; $\tilde{\sigma}$, $\tilde{\sigma}_1$, $\tilde{\sigma}_2$ — оценки величин σ , σ_1 , σ_2 ; λ — длина волны.

Для оценивания величины сдвига ветра найденную разность скоростей надо разделить на интервал высот, внутри которого происходит данное явление. За таковое принимался поперечный размер ближайшего к радиолокатору элемента разрешения, в котором наблюдался аномально широкий спектр сигнала.

Методика эксперимента

Цель эксперимента — оценить эффективность метода обнаружения измерения величины сдвига ветра по оценкам ширины спектра сигнала. За эталон, с которым сравнивались результаты исследуемого метода, были выбраны данные аэрологического зондирования атмосферы.

Радиозонды выпускаются ежедневно два раза в сутки — в 00:00 и 12:00 UTC. В связи с этим из всего количества информации, поставляемой метеорологическим радиолокатором, выбирались данные обзоров, наиболее близкие по времени к указанным значениям. Поскольку анализировались данные радиолокатора, установленного в г. Валдай Новгородской области, в качестве эталонной использовалась информация ближайшей к нему аэрологической станции «Бологое» (26298). Исследовались результаты наблюдений с декабря 2011 по февраль 2012 г.

Прежде всего просматривались все карты радиолокационной отражаемости, полученные радиолокатором в упомянутые моменты времени на выбранном интервале, общим числом 180. Отсеивались результаты, к которым исследуемый метод не применим — с малым количеством целей, площадь которых не превышала 60 % всего просматриваемого радиолокатором пространства и/или с малой средней отражаемостью (≤ 5 дБZ). Кроме того, в ряде случаев радиолокатор в интересующий момент времени не работал или информировал об ошибках в информации. В результате было оставлено 67 обзоров.

В выбранных обзорах просматривались карты ширины спектра радиальных скоростей гидрометеоров с целью выявить на них характерные для сдвига ветра пространственные распределения данного параметра. Таковых оказалось 11. Для каждого из них оценивалась величина сдвига ветра по следующей методике:

1. Делался вертикальный разрез в направлении от центра карты к области максимальных значений отражаемости (рис. 6).

2. В наблюдаемом на сделанном вертикальном разрезе горизонтальном слое больших значений параметра выбиралось его наибольшее значение ($\tilde{\sigma}$).
3. Вычислялись средние значения параметра для слоев, лежащих выше и ниже данного горизонтального слоя ($\tilde{\sigma}_1$ и $\tilde{\sigma}_2$).
4. Рассчитывалась разница скоростей гидрометеоров ΔV в наблюдаемых слоях по формуле (2).
5. Устанавливалось минимальное расстояние до элемента разрешения, в котором еще наблюдалось аномально большое значение ширины спектра, и рассчитывался поперечный размер данного элемента.
6. Определялась величина сдвига ветра как отношение величины ΔV к полученному поперечному размеру разрешаемого объема.

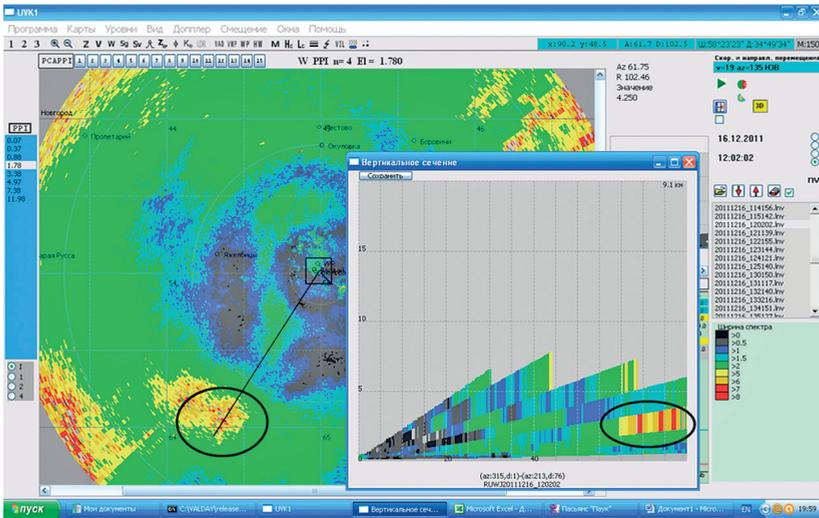


Рис. 6. Пример карты ширины спектра радиальных скоростей гидрометеоров (конический и вертикальный разрезы) с отмеченной зоной аномально широкого спектра

Если получаемая таким образом оценка превышала порог 1 м/с на 100 футов, сдвиг ветра считался обнаруженным. Результаты проведенных расчетов сведены в табл. 1.

Далее для моментов времени, соответствующих выбранным 67 обзорам, анализировалась аэрологическая информация из архива Вайомингского университета [9]. Максимальная высота, отсчеты на которой принимались во внимание, принималась равной 1 500 м. Для каждой пары смежных по высоте из указанного интервала отсчетов скорости и направления ветра рассчитывался сдвиг ветра:

$$W_i = \frac{V_i - V_{i+1} \cos(\Theta_{i+1} - \Theta_i)}{h_{i+1} - h_i}, \quad (3)$$

где h_i и h_{i+1} — высоты, на которых сделаны измерения; V_i и V_{i+1} — скорость ветра на этих высотах; Θ_i и Θ_{i+1} — направление ветра на этих высотах.

Таблица 1

Данные о величинах сдвига ветра, зафиксированных при помощи исследуемого метода

Месяц, год	Число	Время, ч	Высота, км	$\tilde{\sigma}$	$\tilde{\sigma}_1$	$\tilde{\sigma}_2$	Дальность, км	ΔV	Сдвиг, м/с на 100 футов
Декабрь 2011	5	00	0,7	7	3,25	1,75	55	12,99	0,42
	10	00	0,8	6	0,75	3,25	35	11,03	0,57
	16	12	0,5	6	1	1,75	13	11,66	1,61
	18	12	1	6,25	1,75	2,5	30	11,73	0,70
Январь 2012	3	12	1,4	7,75	3,5	2,25	50	14,34	0,52
	4	12	0,6	7,25	3,25	3	17	13,08	1,38
	5	00	0,7	7,25	1,25	1	10	14,32	2,58
	15	12	0,6	6	4,25	1,5	45	10,17	0,41
	22	00	0,7	7	3,75	2	25	12,64	0,91
Февраль 2012	22	00	0,5	7,25	6	3,5	35	10,66	0,55
	23	00	0,8	6,5	3,5	2,25	38	11,59	0,55

Фиксировались случаи превышения сдвигом ветра величины 1 м/с на 100 футов. Всего их было выявлено 4. При этом 3 обнаружены обоими методами (отмечены в таблице светло-серым цветом), а один (22.01.2012) только аэрологическим (отмечен темно-серым).

В качестве основного критерия оценки эффективности метода был взят коэффициент корреляции между рядами сдвигов ветра, полученных при аэрологическом зондировании и методом оценок ширины спектра принимаемого сигнала.

Коэффициент корреляции двух случайных величин вычисляется по формуле

$$r = \frac{\sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{(\sum X^2 - (\sum X)^2)(\sum Y^2 - (\sum Y)^2)}} \quad (4)$$

где X, Y – два ряда случайных величин.

Кроме этого, были рассчитаны следующие критерии:

- оправдываемость

$$P_{\text{опр}} = \frac{N_{\text{сп}}}{N_{\text{аэро}}}, \quad (5)$$

где $N_{\text{сп}}$ – количество зафиксированных случаев сдвига ветра методом по оценкам ширины спектра, совпавших со сдвигами ветра, зафиксированных аэрологическим методом; $N_{\text{аэро}}$ – общее количество случаев сдвига ветра, зафиксированных аэрологическим методом;

- достоверность

$$P_{\text{дост}} = \frac{N_{\text{сп}}}{N}, \quad (6)$$

где N – общее количество зафиксированных случаев сдвига ветра методом по оценкам ширины спектра.

Результаты

В итоге были получены следующие значения искомым оценок эффективности метода: коэффициент корреляции $r = 0,86$; оправдываемость $P_{\text{опр}} = 0,75$; достоверность обнаружения сдвига ветра $P_{\text{дост}} = 1$. Фактически получено полное совпадение моментов превышения измеряемой величиной установленного порога для обоих рассматриваемых методов. Исключение составляет лишь один случай (22.01.2012), пропущенный исследуемым методом, но если учесть значения полученных в нем оценок (0,91 и 1,02 м/с на 100 футов), станет ясно, что и в этом случае получено их хорошее совпадение.

В связи с этим, несмотря на ограниченное число обнаруженных случаев превышения сдвигом ветра величины 1 м/с на 100 футов, можно рекомендовать проведение дальнейших исследований по внедрению рассматриваемого метода в практику метеобеспечения полетов.

Литература

1. *Готтор И.А., Девяткин А.М., Жуков В.Ю., Кулешов Ю.В., Шукин Г.Г.* Информационные возможности доплеровских метеорологических радиолокаторов с двойной поляризацией // Учёные записки РГГМУ, 2013, № 32, с. 66–83.
2. *Денисенков Д.А., Жуков В.Ю.* Исследование влияния профиля ветра в пограничном слое на пространственное распределение ширины спектра // Труды III Всеросс. научн. конф. «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». — СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014, с. 65–71.
3. *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 // XIX Симпозиум по радиолокац. зондир-ю прир. сред. — СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2015, с. 10–13.
4. *Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Шукин Г.Г.* Исследование возможности применения метеорологических радиолокаторов для обнаружения сдвига ветра в пограничном слое атмосферы // Материалы XIV Санкт-Петербургской междунар. конф. «Региональная информатика «РИ-214». — СПб., 2014, с. 63–68.
5. *Доплеровский метеорологический радиолокатор ДМРЛ-С: Руководство по эксплуатации.* — М.: ОАО «НПО «Лианоз. электромех. з-д», 2010.
6. *Жуков В.Ю., Шукин Г.Г.* Об особенностях радиолокационных измерений радиальной скорости гидрометеоров при двухмодальном спектре отраженного ими сигнала // Труды XXIII Всеросс. симп. «Радиолокационное исследование природных сред». — СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013, с. 337–344.
7. *Мобильный метеорологический радиолокатор «Контукр МЕТЕО-01»: Техническое описание.* — СПб.: ООО «Контур-НИИРС», 2010.
8. *Руководство по сдвигам ветра на малых высотах: Руководящий документ РД.* — Монреаль: Междунар. орг. гражд. авиации, 2005.
9. *Электронный ресурс:* [<http://www.weather.uwoyo.edu>].
10. *Melnikov V.M., Doviak R.J.* Turbulence and wind shear in layers of large doppler spectrum width in stratiform precipitation // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2009, vol. 26, pp. 430–443.