

Гидрометеорология и экология. 2023. №72. С. 407—419.

Hydrometeorology and Ecology. 2023;(72): 407—419.

МЕТЕОРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 551.554:551.508.85

doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-407-419

Влияние погрешностей радиолокационной пеленгации аэрологических радиозондов на точность ветрового зондирования

***Анатолий Дмитриевич Кузнецов, Татьяна Евгеньевна Симакина,
Светлана Викторовна Крюкова, Андрей Геннадьевич Саенко***

Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург,
Россия, tatiana.simakina@gmail.com

Аннотация. Методом замкнутых численных экспериментов с использованием архива реальной первичной радиолокационной информации проведено исследование влияния погрешностей в измерении наклонной дальности и угловых координат радиозонда существующими аэрологическими радиолокационными комплексами («Вектор», АВК-1, МАРЛ-А) на точность определения вертикальных профилей скорости и направления ветра. Моделирование, выполненное с использованием метода Монте-Карло, показало, что погрешность измерения наклонной дальности в большей степени влияет на точность восстановления скорости ветра, погрешность измерения угловых координат определяет точность направления ветра.

Ключевые слова: аэрологическое зондирование, вертикальные профили скорости и направления ветра, погрешности радиолокационных измерений, точность восстановления, метод Монте-Карло.

Для цитирования: Кузнецов А. Д., Симакина Т. Е., Крюкова С. В., Саенко А. Г. Влияние погрешностей радиолокационной пеленгации аэрологических радиозондов на точность ветрового зондирования // Гидрометеорология и экология. 2023. №72. С. 407—419. doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-407-419.

Original article

Influence of radar direction finding errors of aerological radiosonds on the accuracy of wind sounding

***Anatoly D. Kuznetsov, Tatyana E. Simakina,
Svetlana V. Kryukova, Andrey G. Saenko***

Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russian,
tatiana.simakina@gmail.com

Summary. The method of closed numerical experiments using the archive of real primary radar information was used to study the influence of errors in measuring the slant range and angular coordinates of the radiosonde by the existing aerological radar systems — «Vector», AVK-1, MARL-A on the accuracy of determining the vertical profiles of wind speed and direction. Modeling of errors in the direction finding of the radiosonde was carried out using the Monte Carlo method — an ensemble of 2250 time series of random errors in the measurements of the slant range and angular coordinates of the radiosonde was modeled. With such modeling it was assumed that the errors contained in the time series have a normal distribution law with zero mean and standard deviation from the mean corresponding to the passport data on the direction finding accuracy of the considered aerological information-measuring complexes.

The reliability of the results obtained is due to the choice of a “typical” wind speed profile for the warm season at the Voeykovo station near St. Petersburg. This profile when setting zero values of errors was taken as a reference one. The proposed method for finding a “typical” profile in a given season and in a given location is based on a correlation analysis of radio sounding results. By subtracting from 2250 profiles obtained in the presence of errors in the direction finding data, reference profiles, errors in determining the wind speed and direction by various aerological radars were found and their statistical analysis was performed.

It is shown that when using aerological radar AVK-1, the accuracy of restoring the wind profile in the warm season at Voeykovo station will average 1.6 m/s in speed and 5.3° in direction. For the MARL-A radar, the corresponding values will be 1 m/s and 3.3°, for the Vector radar - 0.9 m/s in speed and 2.6° in direction.

Numerical modeling has shown that the error in measuring the slant range to a greater extent affects the accuracy of restoring the wind speed, and the error in measuring the angular coordinates determines the accuracy of the wind direction.

Keywords: aerological sounding, vertical profiles of wind speed and direction, errors of radar measurements, recovery accuracy, Monte Carlo method.

For citation: Kuznetsov A. D., Simakina T. E., Kryukova S. V., Saenko A. G. Influence of radar direction finding errors of aerological radiosonds on the accuracy of wind sounding. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(72): 407—419 (In Russ). doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-407-419.

Введение

Аэрологическое зондирование атмосферы с помощью радиозондов, датой рождения которого является 30 января 1930 года, а родиной — Россия, продолжает оставаться одним из важнейших способов получения метеорологической информации.

Вертикальные профили метеорологических параметров атмосферы, измеряемые с помощью зондов, используются в качестве эталонных при калибровке

создаваемых приборов, лидарных профилометров, для верификации дистанционных систем определения профиля температуры и влажности, метеорологических радиолокаторов. Несмотря на то, что радиозондовые установки выступают как образцовые средства измерений [1—3], характеристики точности самих данных радиозондирования определены недостаточно и малоизвестны потребителям [4] в силу невозможности проведения метрологических процедур поверки таких установок в свободной атмосфере. Производители приемных устройств станций слежения за радиозондом гарантируют только стандартные погрешности измерения координат (дальности, угла места и азимута), а значения скорости и направления ветра не проверяются при испытаниях систем зондирования в реальной атмосфере и их погрешности не сертифицированы. Наиболее перспективным методом изучения качества получаемых данных о ветре становится вычислительный эксперимент.

Целью данной работы явилась количественная оценка влияния точности телеметрической радиолокационной информации на результаты ветрового аэрологического зондирования в свободной атмосфере.

Актуальность настоящей работы определяется тем, что от качества расчета термодинамических параметров атмосферы (в том числе параметров ветра) по измерениям системы аэрологического зондирования зависят: точность оперативного прогнозирования погоды, надежность измерения вертикального сдвига ветра в пограничном слое, существенного для прогнозирования загрязнения окружающей среды, правильность локализации различных атмосферных образований (облаков, фронтов, струйных течений) и высоты пограничного слоя атмосферы. Точные измерения ветра на высотах, а также измерения вертикального сдвига ветра критически важны при запуске космических аппаратов и других типов ракет для обеспечения безопасной посадки воздушных судов. Погрешности данных о ветре на высотах ограничивают точность современной артиллерии, поэтому с точки зрения безопасности эти данные важны при проведении военных операций [2].

Методика исследования

Радиолокационная информация по слежению за радиозондом используется для расчета высоты, к которой привязываются измерения характеристик ветра. Параметры ветра определяются косвенным методом, путем последовательных измерений положения радиозонда [5].

Исходная телеметрическая информация, использованная в данной работе, содержит время полета радиозонда (мин), вертикальный и горизонтальный углы (деления угломера), наклонную дальность (м). Пример представления первичных данных аэрологического радиозондирования атмосферы иллюстрирует рис. 1. Строка «Ветер» расшифровывается как направление ветра у поверхности земли 220 градусов, скорость ветра 3 м/с.

Наличие исходной телеметрической информации позволяет произвести расчет высотных профилей скорости и направления ветра по методике, представленной ниже на рис. 2 [6].

012_q.txt Данные радиолокационного зондирования за 08-06-1987					
Зонд №: 2 широта: 60°		Станция №: 26063 Долгота: -30°		Высота станции: 70 м	
Р = 999.3 гПа Ветер: 22003		Т = 19.6 °С Высота Солнца: 46°		U = 51 %	
* Сертификат *		R01 = 30.480 A = 0.14477 K = 120.2	R02 = 30.480 B = 4222.13 N = -6.7	Qоп = 1600 C = 92.060 M = -0.09	
T[мин]	У.М. [ДУ]	АЗМ. [ДУ]	Дальн[м]	T[мин]	Q[мкс]
0.5	5.89	8.36	190	0.2	2024
1	5.32	7.94	390	0.7	2062
1.5	5.01	8.27	590	1.2	1583
2	4.79	8.05	690	2.2	2106
2.5	4.93	8.22	890	3.5	2033
3	4.99	8.29	1110	3.9	2160
4	5.40	8.32	1540	4.2	1581
5	5.92	8.58	2030	5.3	2253
6	5.94	9.23	2590	5.5	1580
7	5.51	9.45	3140	6.3	1844
8	5.05	9.66	3840	6.4	2327
9	4.71	9.78	4600	7.1	1909
10	4.45	9.78	5370	8.2	2391
12	4.01	10.06	6990	8.4	1580
14	3.79	10.28	8910	9.6	2465
16	3.42	10.52	11030	9.8	1582
18	3.23	10.65	13270	10.4	2398
20	2.99	11.01	16090	11.3	1583
22	2.76	11.27	19510	11.5	2493
24	2.64	11.34	22830	11.8	2487
26	2.55	11.46	25790	12.2	2179
28	2.46	11.76	29030	13.3	2586
30	2.35	12.21	33130	14	2610
32	2.23	12.66	37560	15.3	2723
34	2.16	13.08	42060	15.7	1583
36	2.06	13.46	46670	16.3	2131
38	1.99	13.59	51410	16.9	2832
40	1.97	13.66	54990	17	1585
42	2.09	13.67	57940	17.5	2864
44	1.99	13.62	62960	17.9	2182
46	2.01	13.54	65070	19.1	2985
48	2.05	13.61	67070	20	1586
50	2.09	13.63	68010	21.2	3110
				21.4	1587
				22	2204
				22.7	3263
				24	3503
				24.3	1587

Рис. 1. Исходная телеметрическая информация в текстовом формате.

Fig. 1. Initial telemetry information in text format.

В декартовой системе координат определяются проекции положения радиозонда на горизонтальную поверхность в различные моменты времени (обозначены как x_i и y_i ; $i = 1, 2, \dots$), t_i — время, прошедшее с момента запуска радиозонда [мин], α_i и β_i — соответственно вертикальный и горизонтальный углы [градусы], измеренные радиолокатором в моменты времени t_i , D_i — наклонная дальность [м], H_i — высота радиозонда над поверхностью земли [м], $V_{i,i-1}$ и $d_{i,i-1}$ — средние скорость [м/с] и направление ветра [градусы] в слое высот H_i и H_{i-1} и приписываемые высоте середины этого слоя, $t_0 = 0$ (мин); $x_0 = 0$ (м); $y_0 = 0$ (м).

Методом моделирования случайных погрешностей в определении наклонной дальности и угловых координат радиозонда различными аэрологическими

$$\begin{aligned}
 H_i &= D_i \sin \alpha_i \\
 x_i &= H_i \cos \alpha_i \cos \beta_i \\
 y_i &= H_i \cos \alpha_i \sin \beta_i \\
 \Delta t_{i,i-1} &= t_i - t_{i-1} \\
 \Delta x_{i,i-1} &= x_i - x_{i-1} \\
 \Delta y_{i,i-1} &= y_i - y_{i-1} \\
 V_{i,i-1} &= \frac{\sqrt{\Delta x_{i,i-1}^2 + \Delta y_{i,i-1}^2}}{60 \Delta t_{i,i-1}} \\
 \gamma_{i,i-1} &= \operatorname{arctg} \left| \frac{\Delta y_{i,i-1}}{\Delta x_{i,i-1}} \right| \\
 d_{i,i-1} &= \begin{cases} 180^\circ + \gamma_{i,i-1} & \text{если } \Delta x_{i,i-1} > 0 \quad \Delta y_{i,i-1} > 0 \\ \gamma_{i,i-1} & \text{если } \Delta x_{i,i-1} < 0 \quad \Delta y_{i,i-1} < 0 \\ 360^\circ - \gamma_{i,i-1} & \text{если } \Delta x_{i,i-1} < 0 \quad \Delta y_{i,i-1} > 0 \\ 180^\circ - \gamma_{i,i-1} & \text{если } \Delta x_{i,i-1} > 0 \quad \Delta y_{i,i-1} < 0 \end{cases}
 \end{aligned}$$

Рис. 2. Методика расчета высотных профилей скорости и направления ветра по пеленгационным данным.

Fig. 2. Method for calculating altitude profiles of wind speed and direction from direction finding data.

радиолокационными станциями (РЛС) являлся метод статистических испытаний или метод Монте-Карло [7], который состоит в том, что задаются статистические характеристики погрешностей измерения и с использованием генератора случайных чисел рассчитываются случайные погрешности с нужными статистическими свойствами. В нашем случае предполагалось, что погрешности подчиняются нормальному закону распределения с нулевым средним значением и заданным среднеквадратическом отклонением.

Как известно, плотность вероятности нормальной случайной величины ζ с заданным средним значением a и среднеквадратичным отклонением σ имеет следующий вид:

$$p(\zeta) = \frac{1}{\sigma_\zeta \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\zeta - a)^2}{2\sigma_\zeta^2} \right]$$

Для нормальной случайной величины ζ с параметрами $a = 0$ и $\sigma = 1$ может быть получен следующий алгоритм расчета по двум псевдослучайным числам γ , имеющим равномерный закон распределения на промежутке $[0, 1]$ (метод Бокса-Мюллера) [8]:

$$\zeta_1 = \cos(2\pi\gamma_2)\sqrt{-2\ln\gamma_1}$$

$$\zeta_2 = \sin(2\pi\gamma_2)\sqrt{-2\ln\gamma_1}$$

На основе этих соотношений генерация псевдослучайной величины τ , имеющей нормальное распределение со средним значением a и СКО σ , может быть произведена на основе следующего соотношения:

$$\tau_i = a + \sigma\zeta_i, \quad i = 1, 2, \dots$$

Исследование влияния случайных погрешностей в пеленгационных данных на точность ветрового зондирования выполнено на основе так называемых замкнутых численных экспериментов. При таком подходе для каждого из рассмотренных случаев зондирования сначала использовались фактические данные пеленгации радиозонда аэрологической РЛС (см. рис. 1), причем в данном случае тип РЛС не имеет значения. Такие данные содержали временные ряды вертикальных и горизонтальных углов и наклонной дальности для каждого отдельного запуска радиозонда. Эти данные пеленгации считались реперными (не содержащими погрешностей измерений) и по ним рассчитывались вертикальные профили скорости и направления ветра, которые так же считались реперными.

Затем в радиолокационные измерения вносились случайные погрешности по следующей методике. Для каждого временного отсчета были рассчитаны три погрешности в измерении вертикального и горизонтального углов и наклонной дальности. При задании среднеквадратических отклонений для расчета этих погрешностей использовались паспортные данные реальных аэрологических радиолокаторов РЛС АВК-1, МАРЛ-А и «Вектор» (табл. 1). В результате были получены три независимых временных ряда погрешностей, которые добавлялись к исходным данным пеленгации (см. рис. 1). По этим данным рассчитывались вертикальные профили скорости и направления ветра.

Таблица 1

СКО пеленгации аэрологических РЛС

Mean square errors of direction finding of upper-air radar stations

Радиолокационные станции	АВК-1	МАРЛ-А	«Вектор»
$\Delta\alpha$, градусы	0.2	0.12	0.05
$\Delta\beta$, градусы	0.2	0.12	0.05
ΔD , м	30	45	15

Для каждого зондирования процедура моделирования временных рядов погрешностей радиолокационных измерений производилась многократно (в данной работе — 2250 раз).

Затем производилась статистическая обработка 2250 вертикальных профилей, содержащих погрешности в определении скорости и направления ветра: определялся средний вертикальный профиль, профиль СКО. Профили ошибок в определении скорости и направления ветра различными аэрологическими РЛС

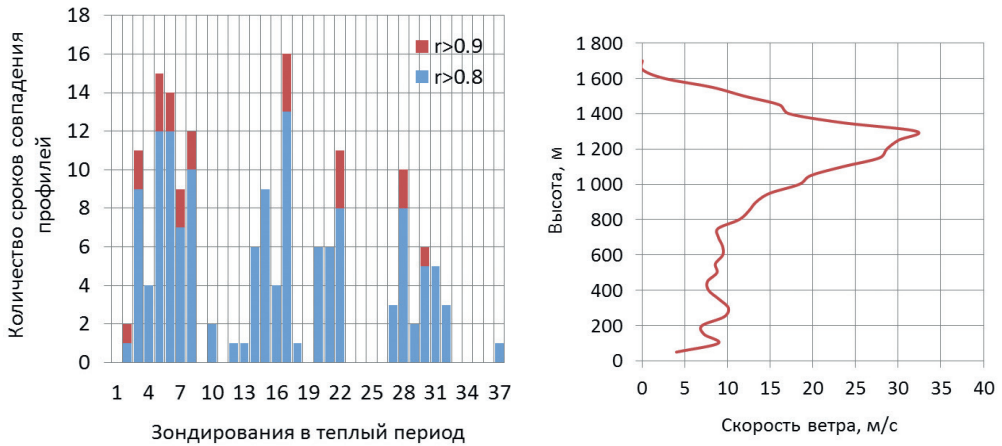


Рис. 3. Выбор «типичного» профиля скорости ветра на станции Воейково в теплый период года.

Fig. 3. Selection of a “typical” wind speed profile at the Voeikovo station during the warm season.

находились путем вычитания из 2250 профилей, полученных при наличии погрешностей в пеленгационных данных, реперных профилей.

Моделирование выполнялось на основе реальных данных, полученных на аэрологической станции Воейково в теплый период 2020 г. Для иллюстрации влияния погрешности пеленгации на точность восстановления профилей ветра выбран «типичный» профиль скорости ветра. «Типичным» считался профиль, наиболее характерный для данного сезона и данного района. Выбор такого профиля выполнялся на основе наибольшего количества коэффициентов корреляции со значением более 0,8. По данным тридцати семи зондирований в теплый период года, профиль, представленный на рис. 3, «похож» на 16 других (коэффициент корреляции более 0,8), из них максимально «похож» на три (коэффициент корреляции более 0,9).

Результаты исследований

Для оценки влияния погрешностей в измерении угловых координат радиозонда и наклонной дальности до него на точность параметров ветра были проведены расчеты, при которых одна погрешность менялась, а другая — принималась нулевой. Так, на рис. 4 а представлены зависимости точности определения вертикального профиля скорости и направления ветра (задаваемых СКО от реперных значений) по 2250 статистическим испытаниям при различных случайных ошибках только в угловых координатах, на рис. 4 б — только в наклонной дальности. Анализ результатов расчетов показал, что погрешность в измерении угловых координат радиозонда обусловила СКО скорости ветра до 0,5 м/с, направления до 3,2°, ошибки в наклонной дальности до 11 м/с и 1,9° соответственно.

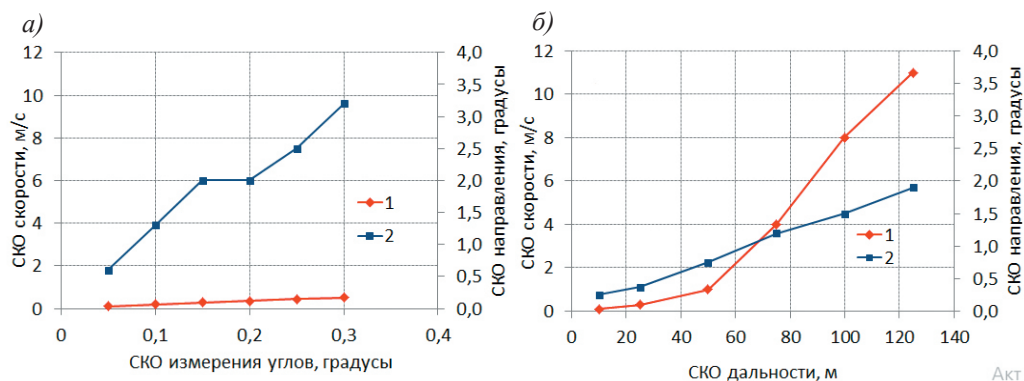


Рис. 4. Погрешности определения вертикального профиля скорости (1) и направления ветра (2) при различных случайных ошибках:

a — только в угловых координатах; *б* — только в наклонной дальности.

Fig. 4. Errors in determining the vertical profile of wind speed (1) and direction (2) for various random errors:

a — only in angular coordinates; *б* — only in slant range.

Таким образом, точность восстановления скорости ветра в большей степени определяется точностью измерения наклонной дальности, а направления ветра — точностью угловых координат.

В целом по результатам 2250 испытаний для реальных погрешностей РЛС (табл. 1) средние случайные погрешности профилей параметров ветра, осредненные по высоте, составили:

АВК-1:	$\Delta v_{\max} = 1,6 \text{ м/с};$	$\Delta d_{\max} = 5,3^\circ$
МАРЛ-А:	$\Delta v_{\max} = 1,0 \text{ м/с};$	$\Delta d_{\max} = 3,3^\circ$
«Вектор»:	$\Delta v_{\max} = 0,9 \text{ м/с};$	$\Delta d_{\max} = 2,6^\circ$

Пример сопоставления восстановленных профилей при разном уровне случайных погрешностей в измерении угловых координат и наклонной дальности представлен на рис. 5 и рис. 6 для скорости и направления ветра соответственно.

Пример вертикального распределения профилей средних значений ошибок определения скорости и направления ветра для РЛС АВК-1, МАРЛ-А и «Вектор» представлен на рис. 7 и рис. 8.

Как следует из анализа представленных графиков, максимальная ошибка между реперными профилями направления и скорости ветра и профилями, вычисленными с учетом ошибок пеленгации, находится в пограничном слое атмосферы и составляет $\pm 11,5^\circ$ и $\pm 1,9 \text{ м/с}$. Значения СКО профиля ошибок скорости ветра для РЛС АВК-1, МАРЛ-А и «Вектор» составляют соответственно 0,29, 0,57 и 0,86 м/с. Для направления ветра значения СКО профиля ошибок для РЛС АВК-1, МАРЛ-А и «Вектор» составляют соответственно 1,0; 2,1 и 3,2 градуса.

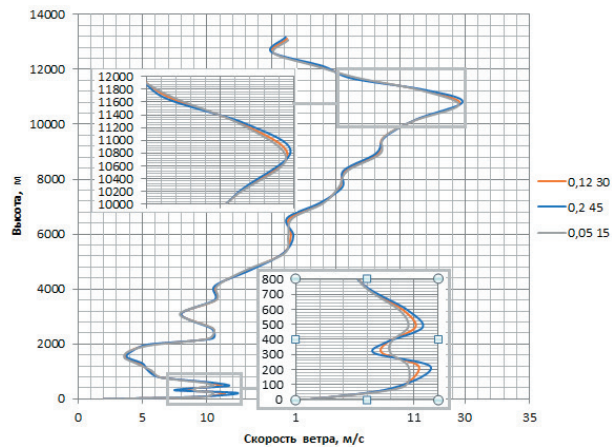


Рис. 5. Сопоставление восстановленных профилей скорости ветра по данным РЛС АВК-1 (погрешности $0,2^\circ$; $0,2^\circ$; 45 м), МАРЛ-А (погрешности $0,12^\circ$; $0,12^\circ$; 30 м) и «Вектор» (погрешности $0,05^\circ$; $0,05^\circ$; 15 м).

Fig. 5. Comparison of the reconstructed wind speed profiles according to AVK-1 radar data (errors 0.2° ; 0.2° ; 45 m), MARL-A (errors 0.12° ; 0.12° ; 30 m) and «Vector» (errors 0.05° ; 0.05° ; 15 m).

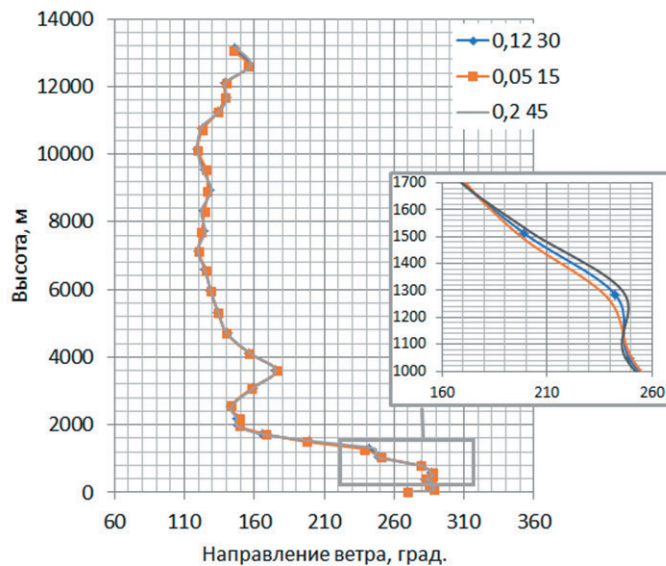


Рис. 6. Сопоставление восстановленных профилей направления ветра по данным РЛС АВК-1 (погрешности $0,2^\circ$; $0,2^\circ$; 45 м), МАРЛ-А (погрешности $0,12^\circ$; $0,12^\circ$; 30 м) и «Вектор» (погрешности $0,05^\circ$; $0,05^\circ$; 15 м).

Fig. 6. The reconstructed wind direction profile according to AVK-1 radar data (errors 0.2° ; 0.2° ; 45 m), MARL-A (errors 0.12° ; 0.12° ; 30 m) and «Vector» (errors 0.05° ; 0.05° ; 15 m).

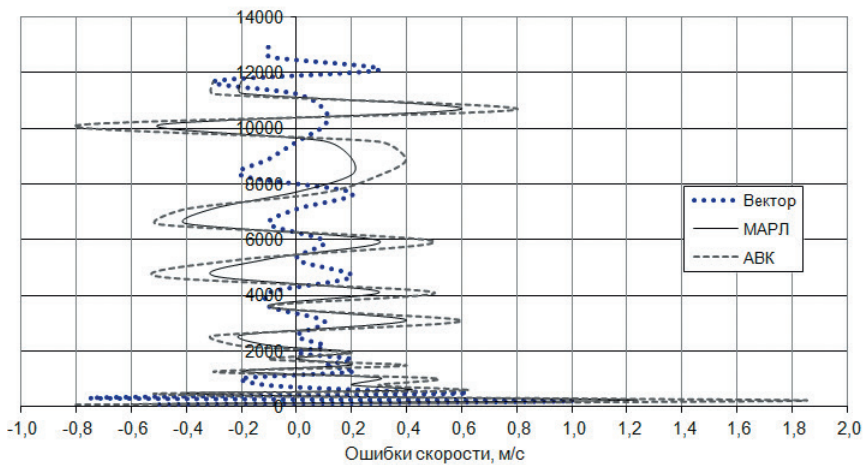


Рис. 7. Профиль средних значений ошибок определения скорости ветра для РЛС АВК-1, МАРЛ-А и «Вектор».

Fig. 7. Profile of average wind speed errors for AVK-1, MARL-A and «Vector» radars.

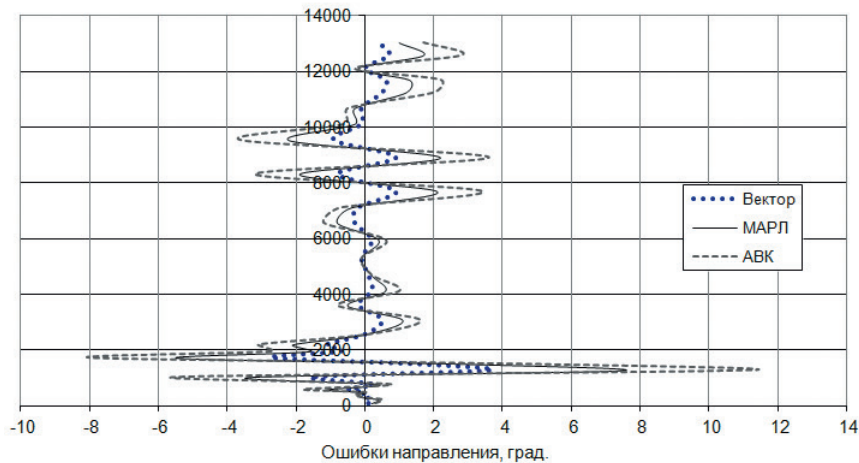


Рис. 8. Профиль средних значений ошибок определения направления ветра для РЛС АВК-1, МАРЛ-А и «Вектор».

Fig. 8. Profile of average values of wind direction errors for AVK-1, MARL-A and «Vector» radars.

Заключение

Проведенные расчеты СКО скорости и направления ветра на реальных аэрологических данных зондирования атмосферы с заданными погрешностями определения пространственных координат радиозонда позволили определить потенциальные возможности систем зондирования атмосферы по точности измерений. Достоверность полученных результатов обусловлена выбором «типичного» профиля скорости ветра для теплого сезона на станции Воейково. Предложенная методика нахождения «типичного» профиля в данный конкретный сезон и в данном месте основана на корреляционном анализе результатов радиозондирования.

Численное моделирование показало, что погрешность измерения наклонной дальности в большей степени влияет на точность восстановления скорости ветра, а погрешность измерения угловых координат определяет точность направления ветра.

Наибольшие абсолютные погрешности скорости и направления ветра наблюдаются в нижнем слое атмосферы, т.е. при небольших углах подъема антенны РЛС. Это может быть вызвано сильным боковым ветром в момент запуска, что, вследствие узкой диаграммы направленности антенны РЛС, может приводить к срывам автосопровождения зонда по угловым координатам. Так, в летнее время при использовании РЛС «Вектор» ошибка по скорости ветра может составить до 9 %, по направлению — $3,8^\circ$. С увеличением высоты при той же точности восстановления относительная погрешность нахождения скорости ветра будет увеличиваться, поскольку растет скорость ветра. При значительных удалениях до радиозонда увеличение погрешности определения высоты подъема зонда обусловлено ограниченной точностью измерения угловых координат.

Среди рассматриваемых в настоящей работе типов аэрологических радиолокаторов система «Вектор» заметно превзошла РЛС АВК-1 и МАРЛ-А по точности определения вертикальных профилей скорости и направления ветра. АВК-1, МАРЛ-А считаются устаревшими, хотя по-прежнему используются на сети. В настоящее время происходит внедрение современной системы аэрологического зондирования ПОЛЮС, основанной на навигационном способе сопровождения радиозонда. Комплексирование радиолокационной и радионавигационной информации и усовершенствование методики обработки данных радиозондирования должно повысить точность определения пространственных координат радиозонда, сократить время поиска его сигналов, тем самым повысив достоверность получаемой метеорологической информации.

Список литературы

1. Калмыков В. М., Ермилов Д. В., Соловьев С. И., Белов Д. Б. Методика оценки точности измерений параметров ветра беззондовым метеоконфлексом // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. Вып. 11. Ч. 2. С. 396—401.
2. Самородский М. В., Искоркин, Д. В., Быстрицкий, Ю. К. Метод определения профиля вертикального ветра. Модель движения шара-пилота // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. Вып. 6. С. 249—265.

3. Болелов Э. А. Метеорологическое обеспечение полетов гражданской авиации: проблемы и пути их решения // Научный Вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21. № 5. С. 117—129. doi.org/10.26467/2079-0619-2018-21-5-117—129.
4. Иванов В. Э., Фридзон М. Б., Ессяк С. П. Радиозондирование атмосферы. Технические и метрологические аспекты разработки и применения радиозондовых измерительных средств / под ред. В. Э. Иванова. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 596 с.
5. Болелов Э. А., Ермошенко Ю. М., Фридзон М. Б. Повышение надежности системы радиозондирования атмосферы за счет комплексирования методов сопровождения радиозонда в полете // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 222. С. 114—119.
6. Киселёв В. Н., Кузнецов А. Д. Методы зондирования окружающей среды (атмосферы). СПб.: РГГМУ, 2004. 428 с.
7. Раменская, А. В. Метод Монте-Карло и инструментальные средства его реализации: методические указания / А. В. Раменская, К. В. Пивоварова; Оренбургский гос. ун-т. Оренбург: ОГУ, 2018. 58 с.
8. Box G. E. P., Muller Mervin E. A Note on the generation of random normal deviates // Annals of Mathematical Statistics. 1958. Vol. 29. P. 610—611. doi:10.1214 / aoms / 1177706645, JSTOR: 2237361.

References

1. Kalmykov V. M., Ermilov D. V., Soloviev S. I., Belov D. B. Method for estimating the accuracy of measurements of wind parameters by a probeless meteorological complex. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskkiye nauki* = *News of TulGU. Technical science*. 2016; 11(2): (396—401). (In Russ.).
2. Samorodsky M. V., Iskorkin D. V., Bystritsky Yu. K. Method for determining the vertical wind profile. The model of the motion of the pilot ball. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskkiye nauki* = *News of TulGU. Technical science*. 2018; (6): (249—265). (In Russ.).
3. Bolelov E. A. Meteorological support of civil aviation flights: problems and ways to solve them. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA* = *Scientific Bulletin of MSTU GA*. 2018; 21(5):(117—129). (In Russ.). <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2018-21-5-117-129>.
4. Ivanov V. E., Fridzon M. B., Essyak S. P. *Radiozondirovaniye atmosfery. Tekhnicheskkiye i metrologicheskiye aspekty razrabotki i primeneniya radiozondovykh izmeritel'nykh sredstv* = *Radio sounding of the atmosphere. Technical and metrological aspects of the development and application of radiosonde measuring instruments*. Yekaterinburg, 2004: 596 p. (In Russ.).
5. Bolelov E. A., Ermoshenko Yu. M., Fridzon M. B. Improving the reliability of the atmospheric radio sounding system by combining the methods of tracking the radiosonde in flight. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA* = *Scientific Bulletin of MSTU GA*. 2015;2:(114—119). (In Russ.).
6. Kiselev V. N., Kuznetsov A. D., Kiselev V. N., Kuznetsov A.D. *Metody zondirovaniya okruzhayushchey sredy (atmosfera)* = *Methods for sounding the environment (atmosphere)*. St. Petersburg: RGGMU, 2004: 428 p. (In Russ.).
7. Ramenskaya A. V. *Metod Monte-Karlo i instrumental'nyye sredstva yego realizatsii : metodicheskiye ukazaniya* = *Monte Carlo method and tools for its implementation: guidelines*. Orenburg: OGU, 2018: 8 p. (In Russ.).
8. Box G. E. P., Muller Mervin E. A Note on the generation of random normal deviates. *Annals of Mathematical Statistics*. 1958; 29(2):610—611. doi: 10.1214/aoms/ 1177706645, JSTOR: 2237361.

Информация об авторах

Анатолий Дмитриевич Кузнецов, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры экспериментальной физики атмосферы метеорологического факультета РГГМУ, kuznetsov1946@inbox.ru.

Татьяна Евгеньевна Симакина, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры экспериментальной физики атмосферы метеорологического факультета РГГМУ, tatiana.simakina@gmail.com.

Светлана Викторовна Крюкова, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры экспериментальной физики атмосферы метеорологического факультета РГГМУ, krukos@rambler.ru.

Андрей Геннадьевич Саенко, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры экспериментальной физики атмосферы метеорологического факультета РГГМУ, amkamc@mail.ru.

Information about authors

Anatoly Dmitrievich Kuznetsov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, professor of Department of Experimental Atmospheric Physics of the Meteorological Faculty, The Russian State Hydrometeorological University, kuznetsov1946@inbox.ru.

Tatyana Evgenievna Simakina, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Experimental Atmospheric Physics of the Meteorological Faculty, The Russian State Hydrometeorological University, tatiana.simakina@gmail.com.

Svetlana Viktorovna Kryukova, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Experimental Atmospheric Physics of the Meteorological Faculty, The Russian State Hydrometeorological University, krukos@rambler.ru.

Andrey Gennadievich Saenko, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Experimental Atmospheric Physics of the Meteorological Faculty, The Russian State Hydrometeorological University, amkamc@mail.ru.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 23.04.2023

Принята к печати после доработки 22.07.2023

The article was received on 23.04.2023

The article was accepted after revision on 22.07.2023