

## РАЗРАБОТКА МЕТОДА И АЛГОРИТМОВ ОЦЕНКИ СДВИГОВ ВЕТРА И ТУРБУЛЕНТНОСТИ В МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОМ РАДИОЛОКАЦИОННОМ КОМПЛЕКСЕ АЭРОДРОМНОЙ ЗОНЫ

*Синицын И.А., к.т.н., старший научный сотрудник, доцент АО «Научно-производственное предприятие «Исток» им. А.И. Шокина», e-mail: isinitsyn@yandex.ru.*

*Галаева К.И., к.т.н., преподаватель кафедры технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта ФГБОУ ВО МГТУ ГА, e-mail: ks.galaeva@mail.ru*

### DEVELOPMENT OF A METHOD AND ALGORITHMS FOR ESTIMATING WIND SHEAR AND TURBULENCE IN THE METEOROLOGICAL RADAR COMPLEX OF THE AERODROME ZONE

*Sinitsyn I.A., Galaeva K.I.*

*This article presents the developed method and algorithms for estimating wind shear and turbulence used in the ground-based meteorological radar complex of the aerodrome zone MRLC AZ. Wind shear refers to horizontal wind shear by 600 m and vertical wind shear by 30 m, turbulence refers to the parameter of the eddy dissipation rate of turbulent energy EDR, these terms comply with modern requirements of ICAO, WMO, RF Roshydromet. The method for estimating wind shear and turbulence consists of 3 stages, during which the measured values of the radial velocity, the width of the radial velocity spectrum become the initial data for calculating wind shear and turbulence, followed by classification by hazard degree. Based on the method for estimating wind characteristics, algorithms have been developed for estimating horizontal and vertical wind shear, parameters of the specific eddy dissipation rate of turbulent energy, which is a more correct representation of atmospheric turbulence. The article presents an assessment of the efficiency of the obtained algorithms by the method of statistical tests, it is shown that the obtained values of the standard deviation of estimates of EDR, wind shears meet modern existing requirements.*

**Key words:** meteorological radar, airfield zone, method and algorithms, specific velocity of turbulent energy dissipation, horizontal wind shear, vertical wind shear, hazard gradation, standard deviation of estimates of wind shear and turbulence.

**Ключевые слова:** метеорологический радиолокатор, аэродромная зона, метод и алгоритмы, удельная скорость диссипации турбулентной энергии, горизонтальный сдвиг ветра, вертикальный сдвиг ветра, градация по степени опасности, среднеквадратичное отклонение оценок сдвигов ветра и турбулентности.

#### Введение

Актуальной проблемой авиации является влияние метеоусловий на безопасность полётов. Более 20 % случаев авиационных событий были связаны с неблагоприятными метеорологическими условиями [1]. При этом 34,4 % авиационных событий происходили без метеообеспечения полётов гражданской авиации при сложных метеоусловиях [2-6]. Следовательно, причинами авиационных событий является недостаточный уровень метеообеспечения, особенно при обнаружении опасных сдвигов ветра и турбулентности. При этом наземный метеорологический радиолокатор является уникальным источником метео данных с высокой дискретностью в пространстве и времени для анализа метеорологических явлений и характеристик в аэродромной зоне (далее – АЗ).

*В настоящей статье приведены разработанные метод и алгоритмы оценки сдвигов ветра и турбулентности, используемые в наземном метеорологическом радиолокаторе аэродромной зоны. Под сдвигами ветра понимаются горизонтальный сдвиг ветра на 600 м и вертикальный сдвиг ветра на 30 м, под турбулентностью понимается параметр удельной скорости диссипации турбулентной энергии EDR, указанные термины соответствуют современным требованиям ИКАО, ВМО, Росгидромета РФ. Метод оценки сдвигов ветра и турбулентности состоит из 3 этапов, в ходе которых измеренные значения радиальной скорости, ширины спектра радиальных скоростей становятся начальными данными для расчёта сдвигов ветра и турбулентности с последующей классификацией по степени опасности. На основе метода оценки ветровых характеристик разработаны алгоритмы оценки горизонтального и вертикального сдвигов ветра, параметров удельной скорости диссипации турбулентной энергии, являющейся более корректным представлением турбулентности атмосферы. В статье приведена оценка эффективности полученных алгоритмов методом статистических испытаний, показано, что полученные значения среднеквадратичного отклонения оценок EDR, сдвигов ветра удовлетворяют современным существующим требованиям.*

## Метод оценки ветровых характеристик для секторного режима в МРЛК АЗ

Предназначением метеорологического радиолокационного комплекса аэродромной зоны (МРЛК АЗ) является оценка опасных метеоявлений, в том числе опасных ветровых характеристик в аэродромной зоне в секторах взлета и посадки воздушных судов. В МРЛК АЗ помимо основного кругового режима обзора пространства внедрён секторный режим работы, обладающий азимутальной шириной сектора в диапазоне  $0...70^\circ$  и меньшим шагом выдачи информации в пространстве и времени, что актуально для таких сильно флуктуирующих ветровых характеристик как турбулентность и сдвиг ветра. Для оценки атмосферной облачной турбулентности используется параметр  $EDR$  – единица кубического корня из скорости затухания вихря или скорость диссипации турбулентной энергии [7-8], вертикальный сдвиг ветра (далее –  $BCB$ ) оценивается на 30 или на 100 м, горизонтальный сдвиг ветра (далее –  $GCB$ ) на 600 м согласно требованиям ИКАО, Росгидромета РФ, ВМО [7-11].

Начальными данными для оценки сдвигов ветра и турбулентности являются радиальная скорость отражённого сигнала  $V$  и ширина спектра радиальных скоростей  $W$ . Далее по входным сигналам  $V$  и  $W$  для конических сечений в каждом канале дальности формируются оценки  $GCB$ ,  $BCB$ ,  $EDR$  с заданными диапазоном и дискретностью в ячейках выбранного размера в декартовых координатах. После осуществляется градация  $GCB$ ,  $BCB$  и  $EDR$  по степени опасности согласно классификации ИКАО [8-11]. Выходная информация отображается на индикаторе кругового обзора МРЛК АЗ в виде опасных контуров  $GCB$ ,  $BCB$  и  $EDR$ . На рис. 1 продемонстрирована схема метода оценки опасных ветровых метеорологических явлений:  $GCB$ ,  $BCB$ ,  $EDR$ , разделённая на три этапа.

На основе разработанного метода оценки турбулентности и сдвигов ветра были разработаны алгоритмы оценки удельной скорости диссипации турбулентной энергии, оценки вертикального и горизонтального сдвигов ветра, описанные ниже.

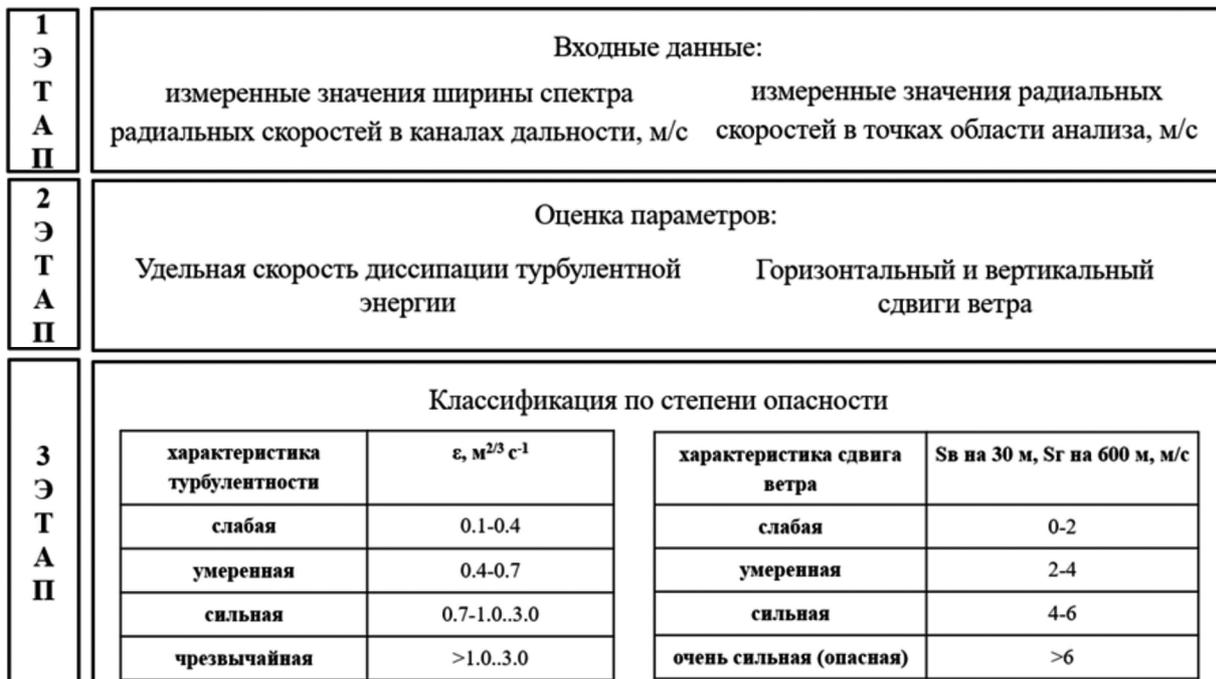


Рис. 1. Схема метода оценки опасных ветровых метеорологических явлений ( $GCB$ ,  $BCB$ ,  $EDR$ ) в МРЛК АЗ

### Алгоритм оценки турбулентности для секторного режима в МРЛК АЗ

Начальными данными для алгоритма  $EDR$  являются: оценки радиальной скорости  $V$  в каналах дальности  $V_m; m = 0; M-1$ , оценки ширины спектра скоростей  $W$  в каналах дальности  $(\sigma_v)_m; m = 0; M-1$ .

Выходными данными алгоритма являются оценки  $EDR$  в каналах дальности  $\varepsilon_m; m = 0; M-1$ .

Условиями функционирования алгоритма являются полученные оценки  $V$  и  $W$  в каналах дальности, заданные общие параметры секторного режима и параметры рассматриваемого алгоритма, представленные в табл. 1. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 2.

Определение ошибки оценки турбулентности  $EDR$ .

Определение ошибки оценки турбулентности  $EDR$  методом статистических испытаний «Монте-Карло» реализовано в виде следующих этапов, представленных на рис. 3.

В рамках третьего этапа (цикл по независимым испытаниям) выполняются следующие действия, представленные на рис. 4.

Относительная ошибка оценки турбулентности  $EDR$   $\delta_{EDR} \%$  рассчитывается по выражению:

$$\delta_{EDR} \% = \sigma_{EDR} \cdot 100\% / EDR, \quad (1)$$

Исходные данные для проведения расчетных испытаний удельной скорости диссипации турбулентной энергии  $EDR$  методом «Монте Карло» представлены в табл. 2.

Результаты испытаний удельной скорости диссипации турбулентной энергии представлены в табл. 3.

Таблица 1. Параметры алгоритма «Измерение параметров турбулентности»

Обозначение	Название, размерность	Значение
$K_\sigma$	параметр, определяющий среднее квадратичное отклонение $\sigma$ оценки радиальной скорости	12
$L^{(0)}$	ожидаемое среднее значение интегрального масштаба турбулентности, м	760
	интервал дискретизации коэффициента продольной корреляции скорости	$10^{-2}$
$f_k, k = \overline{0; K-1}$	значения коэффициента продольной корреляции скорости	хранятся в заранее подготовленном массиве
$\delta M$	минимальная длина серии ненулевых оценок радиальной скорости	10
$\delta D$	дискрет дальности, м	
$\Delta D$	разрешающая способность по дальности, м	$\Delta D = \frac{c\Delta\tau_0}{2}$
$\Delta$	нормированное разрешение по дальности	$\frac{\Delta D}{\delta D}$
$I$	коэффициент перекрытия стробов дальности	$truc(\Delta)$
$\rho_m; m = \overline{0; 2M-1}$	коэффициенты корреляции ошибок определения радиальной скорости	$\left(1 - \frac{m}{\Delta}\right)^2$ при $m < I$ ; 0 при $m \geq I$

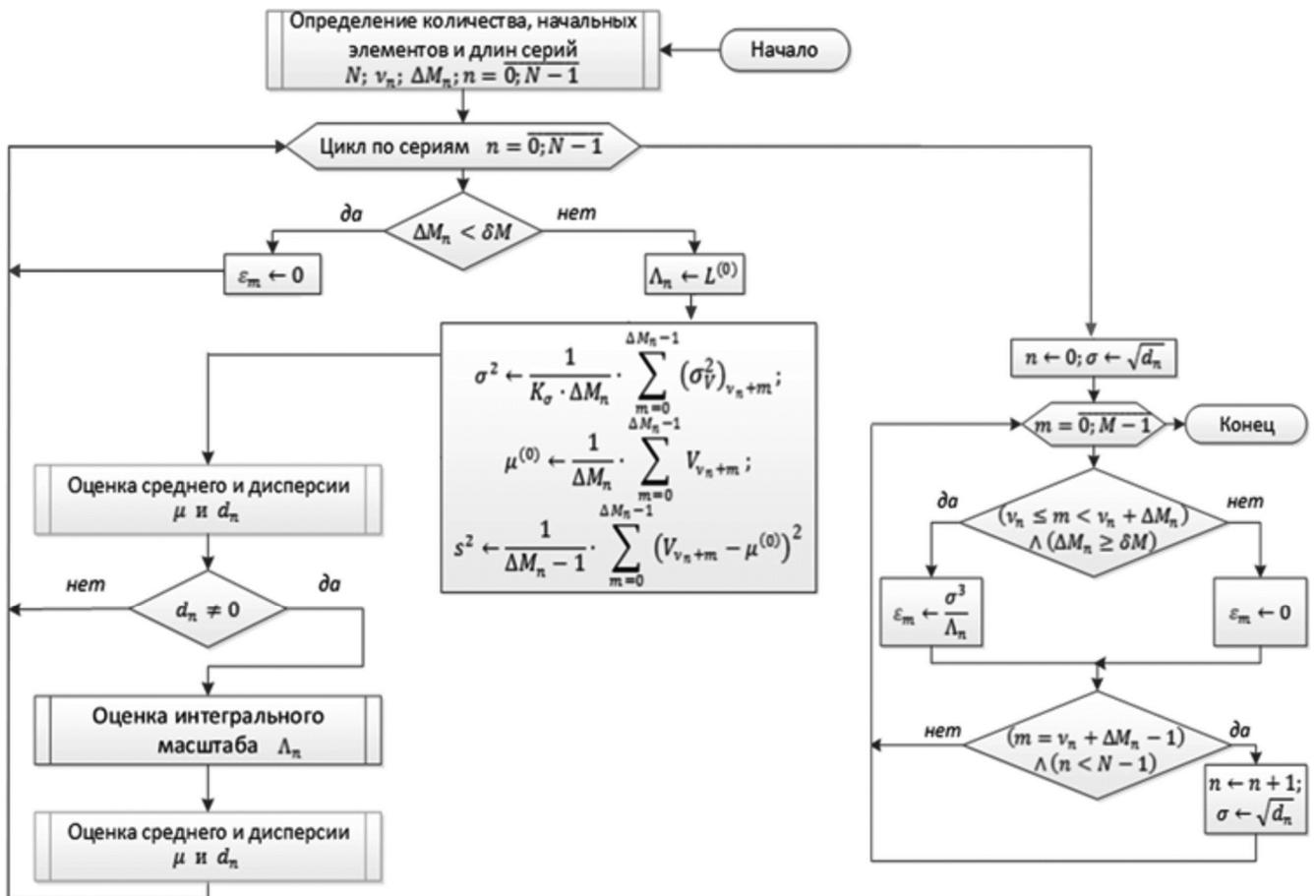


Рис. 2. Блок-схема алгоритма оценки турбулентности в МРЛК АЗ



Рис. 3. Этапы реализации определения характеристик точности оценки параметров турбулентности EDR методом статистических испытаний «Монте-Карло»



Рис. 4. Этапы цикла по независимым испытаниям

Таблица 2. Исходные данные для проведения расчетных испытаний EDR методом «Монте-Карло»

параметр	Значение
$\sigma$ ошибок измерений радиальных скоростей $\sigma_V$ для горизонтальной дальности 100 км	0,432 м/с
Значение дискретности данных по дальности (до 50 км)	101,25 м
Значение дискретности данных по дальности (до 100 км)	202,5

Таблица 3. Результаты расчетов  $\sigma$  оценки EDR

Требуемое значение EDR, $m^{2/3}/c$	$\delta_{EDR}$ для дальности до 50 км и дискретности 101.25 м, $m^{2/3}/c$	Относительная ошибка EDR $\delta_{EDR} \%$ для дальности до 50 км и дискретности 101.25 м, %	$\sigma_{EDR}$ для дальности до 100 км и дискретности 202.5 м, $m^{2/3}/c$	Относительная ошибка EDR $\delta_{EDR} \%$ для дальности до 100 км и дискретности 202.5 м, %
0,1	0,0304	30,4	0,0242	24,2
0,2	0,0589	29,5	0,0499	25,0
0,3	0,0588	19,6	0,06	20,0
0,4	0,0714	17,9	0,0775	19,4
0,5	0,0873	17,5	0,0939	18,8
0,6	0,1038	17,3	0,1119	18,7
0,7	0,1202	17,2	0,1313	18,8
0,8	0,1360	17,0	0,1486	18,6
0,9	0,1552	17,2	0,1672	18,6
1	0,1707	17,1	0,1861	18,6
1,1	0,1886	17,1	0,2083	18,9

Таким образом, дискретность оценки турбулентности по удельной скорости диссипации турбулентной энергии (EDR) соответствует требованиям, указанным в источниках [7-8,12-20] при следующих условиях: до 50 км горизонтальной дальности дискретность оценки EDR не более  $0,05 \text{ м}^{2/3}/\text{с}$  при значении требуемой EDR менее  $0,2 \text{ м}^{2/3}/\text{с}$ ; до 100 км горизонтальной дальности дискретность оценки EDR не более  $0,1 \text{ м}^{2/3}/\text{с}$  при значении требуемой EDR менее  $0,2 \text{ м}^{2/3}/\text{с}$ .

### Алгоритмы оценки горизонтального и вертикального сдвигов ветра для секторного режима в МРЛК АЗ

Далее приведены алгоритмы оценки сдвигов ветра: в табл. 4 указаны входные данные для функционирования алгоритмов сдвигов ветра, на рис. 5 представлена блок-схема алгоритмов сдвигов ветра.

Таблица 4. Входные данные для функционирования алгоритмов горизонтального и вертикального сдвигов ветра при секторном сканировании (режим «Сектор»)

Обозначение	Название, размерность
$M$	количество каналов дальности
$D[m]; m = \overline{0; M-1}$	расположение каналов дальности, м
$N$	количество угловых положений главного луча (ГЛ) диаграммы направленности антенны (ДНА) при сканировании по азимуту
$\alpha[n]; n = \overline{0; N-1}$	углы по азимуту ГЛ ДНА при сканировании, рад
$K$	количество положений углов ГЛ ДНА при сканировании по углу места
$\beta[k]; k = \overline{0; K-1}$	углы по месту положений ГЛ ДНА при сканировании, рад
$\begin{cases} x[m, n, k] = D[m] \cos \beta[k] \cdot \cos \alpha[n]; \\ y[m, n, k] = D[m] \sin \beta[k]; \\ z[m, n, k] = D[m] \cos \beta[k] \cdot \sin \alpha[n] \end{cases}$	декартовы координаты точек области анализа, м
$V[m, n, k]$	измеренные значения $V$ в точках области анализа, м/с
$\sigma_v[m, n, k]$	измеренные значения ширины спектра скоростей в точках области анализа, м/с

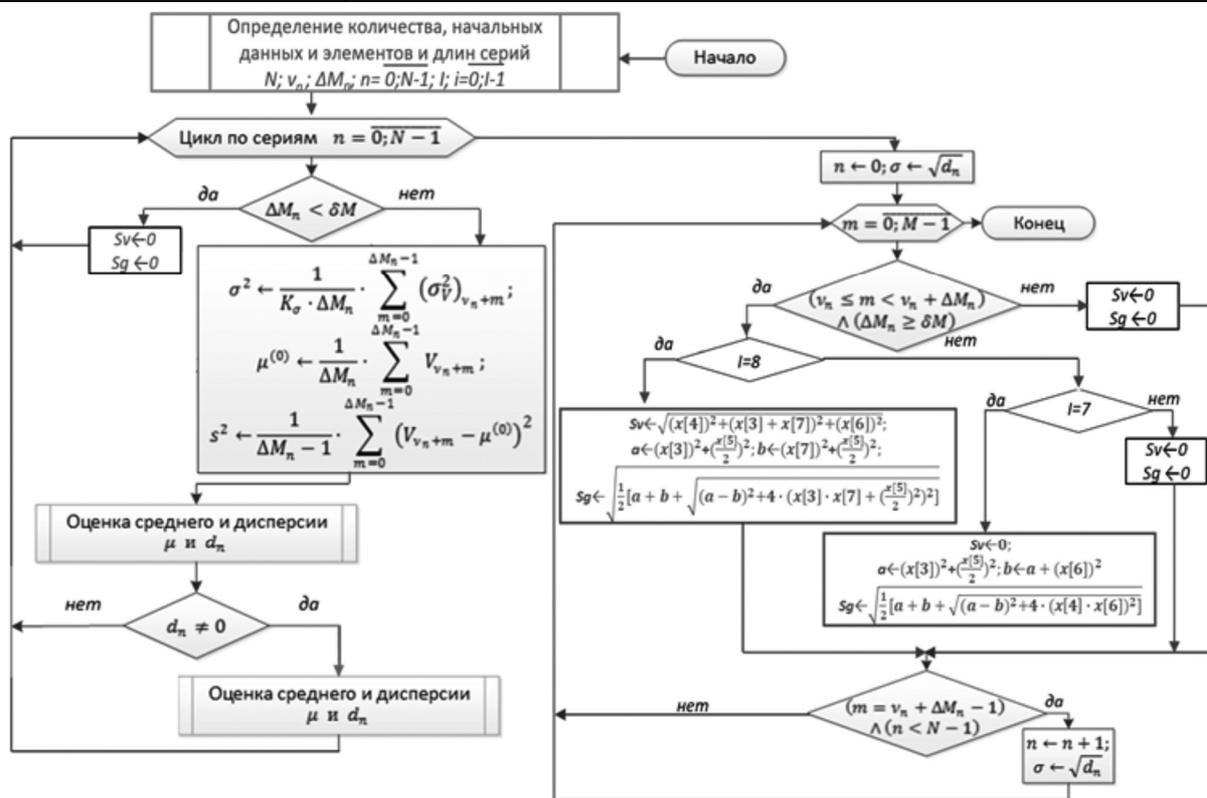


Рис. 5. Блок-схема алгоритма оценки сдвигов ветра в МРЛК АЗ

### Определение ошибки оценки вертикального ВСВ и горизонтального ГСВ сдвигов ветра

Для  $\sigma$  формирования сдвигов ветра были получены следующие выражения: для ВСВ  $S_g$ :

$$\sigma_g = 30\sqrt{\sigma_4^2 + \sigma_6^2 + \sigma_7^2}, \quad (2)$$

для ГСВ  $S_z$ :

$$\sigma_r = 600\sqrt{\sigma_3^2 + \sigma_5^2 + \sigma_8^2}. \quad (3)$$

Результаты испытаний алгоритмов оценки горизон-

тального сдвига ветра представлены в табл. 5.

Таким образом, В МРЛК АЗ дискретность цифровых данных для оценки горизонтального сдвига ветра со значением 0,2 м/с на 600 метров обеспечивает определение уровня градации опасности ГСВ согласно требованиям [7-8,12-20] и рис. 1.

Далее представлен расчёт ошибки оценки вертикального сдвига ветра (таблица 6). Ошибка оценки вертикального сдвига ветра определяется СКО по выражению (2) для объектов анализа (далее – ОА).

Таблица 5. Результаты расчетов ошибки оценки ГСВ по выражению (3)

Дальность центра ОА $D_0$ , м	Размер ОА по $\Delta D$ , м	Размер ОА по $\Delta \alpha$ , градус	Размер ОА по УМ $\Delta \beta$ , градус	$\sigma$ ГСВ $\sigma_z$ м/с на 600 м
Значение ГСВ согласно требованиям – 0,5 м/с на 600 м				
1500,0	1500,0	23,00	17,00	0,1444
3000,0	1500,0	19,00	15,00	0,1533
10000,0	1500,0	17,00	14,50	0,1010
25000,0	1500,0	15,00	13,00	0,1109
50000,0	1500,0	13,00	13,00	0,1260
Значение ГСВ согласно требованиям – 2,0 м/с на 600 м				
1500,0	1500,0	23,00	17,00	0,1444
3000,0	1500,0	19,00	15,00	0,1532
10000,0	1500,0	17,00	14,50	0,1009
25000,0	1500,0	15,00	13,00	0,1110
50000,0	1500,0	13,00	13,00	0,1265
Значение ГСВ согласно требованиям – 4,0 м/с на 600 м				
1500,0	1500,0	23,00	17,00	0,1444
3000,0	1500,0	19,00	15,00	0,1532
10000,0	1500,0	17,00	14,50	0,1009
25000,0	1500,0	15,00	13,00	0,1114
50000,0	1500,0	13,00	13,00	0,1288
Значение ГСВ согласно требованиям – 6,0 м/с на 600 м				
1500,0	1500,0	23,00	17,00	0,1444
3000,0	1500,0	19,00	15,00	0,1532
10000,0	1500,0	17,00	14,50	0,1011
25000,0	1500,0	15,00	13,00	0,1122
50000,0	1500,0	13,00	13,00	0,1329
Значение ГСВ согласно требованиям – 8,0 м/с на 600 м				
1500,0	1500,0	23,00	17,00	0,1445
3000,0	1500,0	19,00	15,00	0,1533
10000,0	1500,0	17,00	14,50	0,1012
25000,0	1500,0	15,00	13,00	0,1135
50000,0	1500,0	13,00	13,00	0,1386
Максимум меньше 0,2 м/с на 600 м				

Таблица 6. Результаты расчетов ошибки оценки ВСВ

Дальность центра ОА $D_0$ , м	Размер ОА по $\Delta D$ , м	Размер ОА по $\Delta \alpha$ , градус	Размер ОА по УМ $\Delta \beta$ , градус	$\sigma$ ГСВ $\sigma_z$ м/с на 600 м
Значение ВСВ согласно требованиям – 0,5 м/с на 600 м				
1500,0	1500,0	23,00	17,00	0,0150
3000,0	1500,0	19,00	15,00	0,0145
10000,0	1500,0	17,00	14,50	0,0142
25000,0	1500,0	15,00	13,00	0,0338
30000,0	1500,0	13,00	13,00	0,0422
35000,0	1500,0	13,00	13,00	0,0482
40000,0	1500,0	13,00	13,00	0,0541
45000,0	1500,0	13,00	13,00	0,0600
50000,0	1500,0	13,00	13,00	0,0657

Дальность центра ОА $D_0$ , м	Размер ОА по $\Delta D$ , м	Размер ОА по $\Delta \alpha$ , градус	Размер ОА по УМ $\Delta \beta$ , градус	$\sigma$ ГСВ $\sigma_z$ м/с на 600 м
Значение ВСВ согласно требованиям – 2,0 м/с на 600 м				
1500,0	1500,0	23,00	17,00	0,0249
3000,0	1500,0	19,00	15,00	0,0338
10000,0	1500,0	17,00	14,50	0,0510
25000,0	1500,0	15,00	13,00	0,1322
30000,0	1500,0	13,00	13,00	0,1661
35000,0	1500,0	13,00	13,00	0,1903
40000,0	1500,0	13,00	13,00	0,2142
45000,0	1500,0	13,00	13,00	0,2378
50000,0	1500,0	13,00	13,00	0,2610
Значение ВСВ согласно требованиям – 4,0 м/с на 600 м				
500,0	1500,0	23,00	17,00	0,0431
3000,0	1500,0	19,00	15,00	0,0639
10000,0	1500,0	17,00	14,50	0,1013
25000,0	1500,0	15,00	13,00	0,2639
30000,0	1500,0	13,00	13,00	0,3318
35000,0	1500,0	13,00	13,00	0,3802
40000,0	1500,0	13,00	13,00	0,4281
45000,0	1500,0	13,00	13,00	0,4753
50000,0	1500,0	13,00	13,00	0,4918
Значение ВСВ согласно требованиям – 6,0 м/с на 600 м				
1500,0	1500,0	23,00	17,00	0,0625
3000,0	1500,0	19,00	15,00	0,0947
10000,0	1500,0	17,00	14,50	0,1517
25000,0	1500,0	15,00	13,00	0,1956
30000,0	1500,0	13,00	13,00	0,2076
35000,0	1500,0	13,00	13,00	0,2701
40000,0	1500,0	13,00	13,00	0,3419
45000,0	1500,0	13,00	13,00	0,4128
50000,0	1500,0	13,00	13,00	0,4824
Значение ВСВ согласно требованиям – 8,0 м/с на 600 м				
1500,0	1500,0	23,00	17,00	0,0823
3000,0	1500,0	19,00	15,00	0,1257
10000,0	1500,0	17,00	14,50	0,2022
25000,0	1500,0	15,00	13,00	0,2274
30000,0	1500,0	13,00	13,00	0,2633
35000,0	1500,0	13,00	13,00	0,3100
40000,0	1500,0	13,00	13,00	0,3558
45000,0	1500,0	13,00	13,00	0,3703
50000,0	1500,0	13,00	13,00	0,4431

Таким образом, в МРЛК АЗ дискретность оценки вертикального сдвига ветра соответствует рассмотренным требованиям не более 0,5 м/с в диапазоне значений интенсивности ВСВ на 30 м от не более 0,5 м/с до не менее 6,0 м/с. Следовательно, в МРЛК АЗ обеспечивается определение уровней градации опасности вертикального сдвига ветра по его интенсивности в соответствии с рис. 1 и требованиям [7-8, 12-20].

#### Получение экспериментальных фактических данных об удельной скорости диссипации турбулентной энергии и сдвигах ветра в МРЛК АЗ

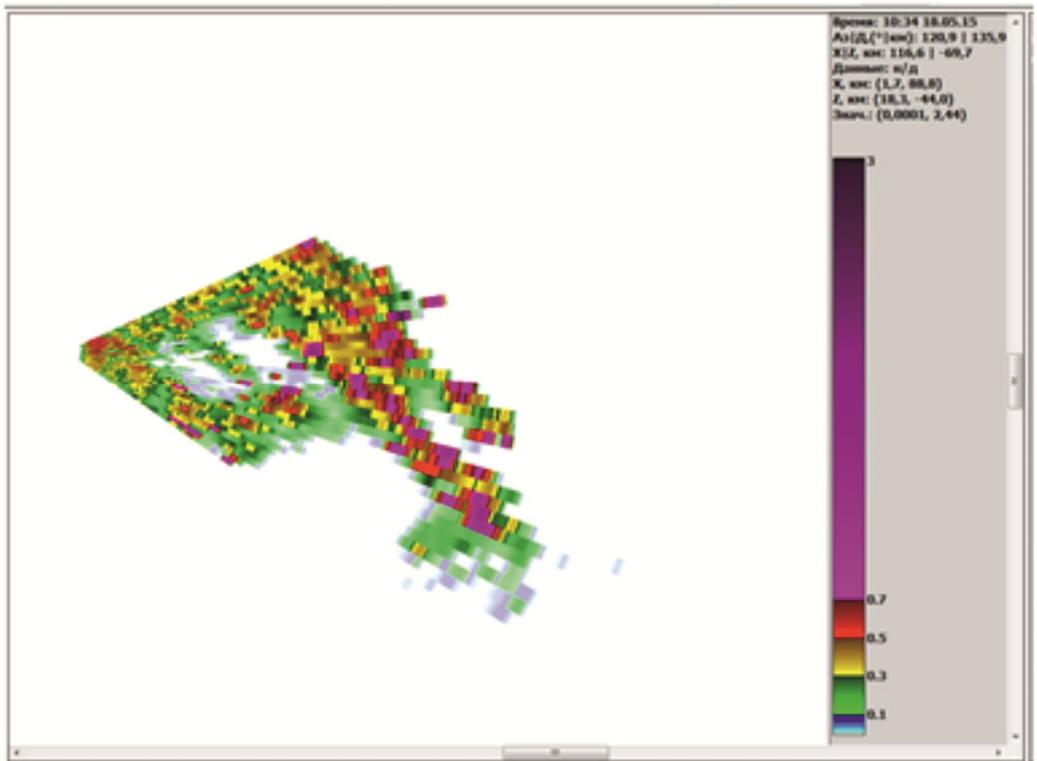
Для подтверждения работоспособности разработанных метода и алгоритмов для всей зоны секторного обзора МРЛК АЗ были получены матрицы значений для удельной скорости диссипации турбулентной энергии EDR (рис. 6), а также горизонтальный ГСВ и вертикаль-

ный ВСВ сдвиги ветра (рис. 7-8 соответственно).

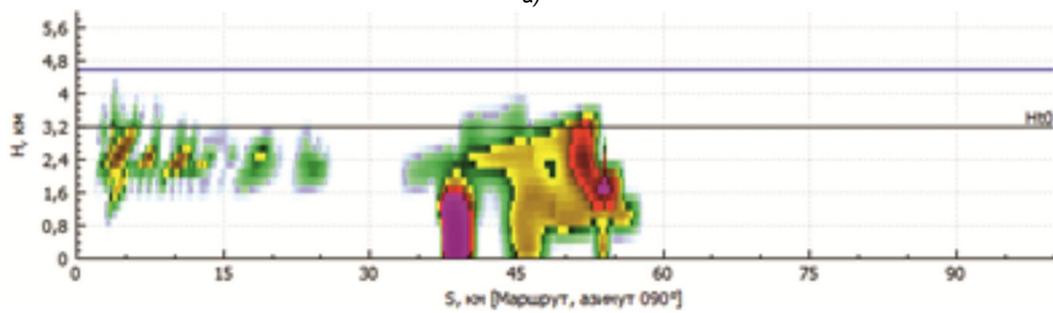
Рис. 6-8 являются результатами серий экспериментальных испытаний по фактической погоде для аэродрома Орловка (Тверская область).

#### Заключение

В настоящее время разработан метод оценки турбулентности и сдвигов ветра в МРЛК АЗ, в котором поэтапно определяются радиальная скорость и её среднеквадратичное отклонение – ширина спектра радиальных скоростей. Далее рассчитываются турбулентность в единицах удельной скорости диссипации турбулентной энергии EDR, горизонтальный сдвиг ветра на 600 метров, вертикальный сдвиг ветра на 30 метров согласно требованиям ИКАО, с градациями степеней опасности. На основе разработанного метода были синтезированы алгоритмы удельной скорости диссипации турбулентной энергии и вертикального, горизонтального сдвигов вет-



а)



б)

Рис. 6. Горизонтальное (а) и вертикальное (б) сечения EDR в секторном режиме в МРЛК АЗ

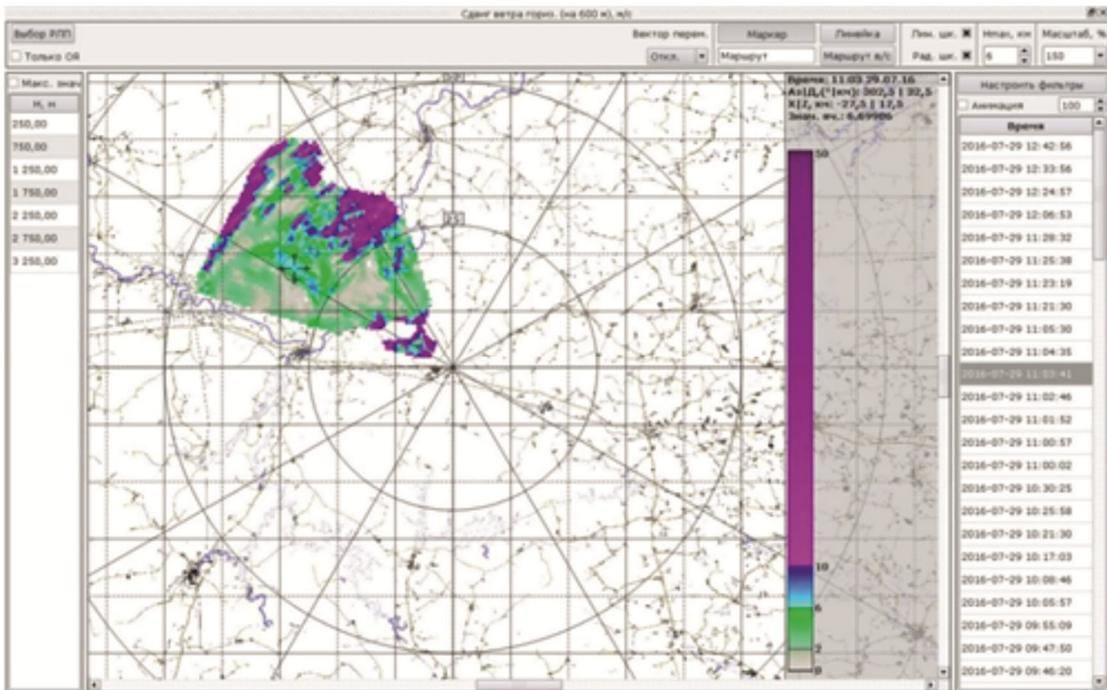


Рис. 7. Карта ГСВ в режиме «Сектор» в МРЛК АЗ

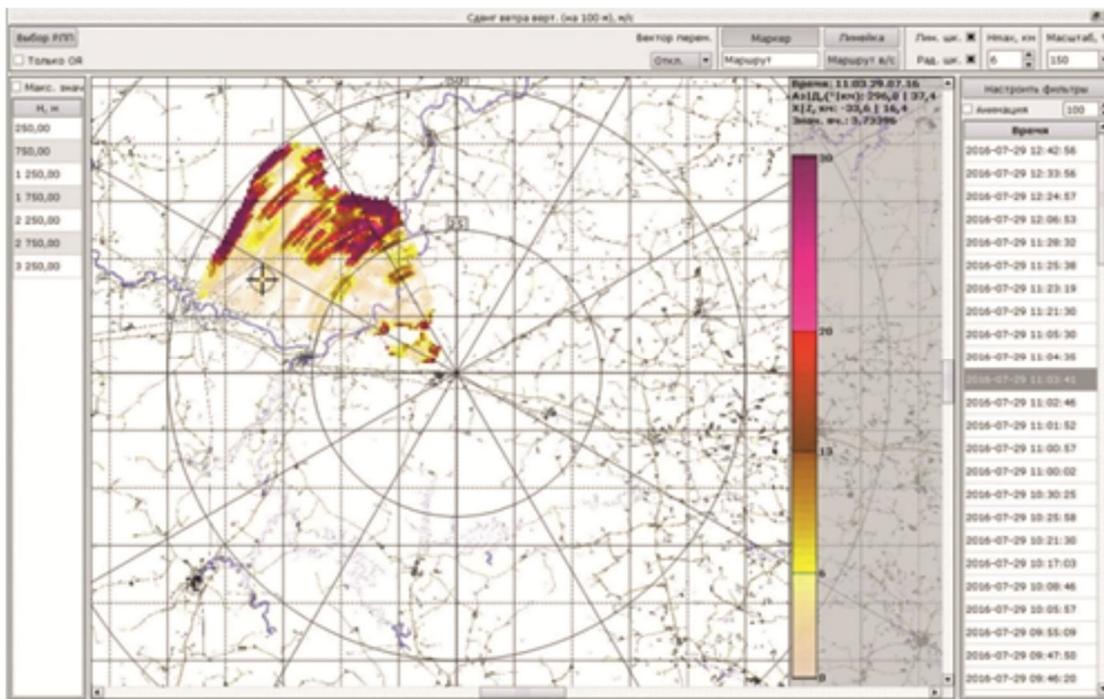


Рис. 8. Карта ВСВ в режиме «Сектор» в МРЛК АЗ

ра. Начальными данными для алгоритмов оценки EDR, горизонтального и вертикального сдвигов ветра являются: количество каналов дальности, количество угловых и азимутальных углов, декартовы координаты точек области анализа, значения в каналах дальности  $V$  и  $W$ . Выходные массивы алгоритмов представляют собой оценки EDR и оценки сдвигов ветра в каналах дальности.

Получены оценки для среднеквадратичного отклонения формирования сдвигов ветра, рассчитанные значения шага дискретизации для вертикального сдвига ветра составляет 0,5 м/с и для горизонтального сдвига ветра составляет 0,2 м/с, что соответствует выдвинутым в работе требованиям.

В МРЛК АЗ диапазоны оценки турбулентности EDR соответствуют следующим значениям: от не более  $0,1 \text{ м}^{2/3}/\text{с}$  до не менее  $3 \text{ м}^{2/3}/\text{с}$ , что полностью удовлетворяет рассмотренным требованиям.

*Статья подготовлена в рамках поддержанного грантом Российского научного фонда проекта № 23-29-00450 «Исследование отражательных и турбулентных характеристик атмосферы с использованием нового отечественного метеорологического радиолокационного комплекса ближней зоны «Монокль» в различных климатических зонах в интересах повышения достоверности автоматической классификации опасных метеоявлений».*

### Литература

1. Методическое пособие. Расследование авиационных происшествий и инцидентов, связанных с метеорологическими факторами. Изд. 3. Москва, 2009. 57 с.
2. Vasiliev O., Bolelov E., Galaeva K., Gevak N., Zybkin S., Kolesnikov E., Peshko A., Sinitsyn I. The Design and Operation Features of the Near-airfield Zone Weather Radar Complex «Monocle». 2021 XVIII Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of

N.E. Zhukovsky (TSCZh). DOI:10.1109/TSCZh53346.2021.9628352.

3. Vasiliev O.V., Boyarenko E.S., Galaeva K.I., Zybkin S.A. Concerning the Issue of Classification of Hazardous Weather Events. 2022 XIX Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of NE Zhukovsky (TSCZh). IEEE, 2022. С. 76-78. DOI:10.1109/TSCZh55469.2022.9802491

4. Nanding N., Rico-Ramirez M.A. Precipitation Measurement with Weather Radars. ICT for Smart Water Systems: Measurements and Data Science/Springer Nature. November 2019. pp.1-24. DOI: 10.1007/698\_2019\_404.

5. Васильев О.В., Зябкин С.А., Никоненко А.В., Чиров Д.С. Функционально-ориентированная модель формирования метеорологического продукта в X-диапазоне от гидрометеоров переохлажденной жидкости при полном поляризованном приеме. Цифровая Обработка Сигналов, №1, 2023. С.57-64.

6. D.S. Chirov, E.A. Bolelov, S.A. Zybkin and O.V. Vasiliev. «Fuzzy-logical Classifier of the Phase State of Hydrometeors in X-band Weather Radars», 2023 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), St. Petersburg, Russian Federation, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/WECONF57201.2023.10148003.

7. Руководство по метеорологическим приборам и методам наблюдений. ВМО-№ 8, Женева, 2010.

8. Руководство по сдвигу ветра на малых высотах. Doc 9817 AN/449. ИКАО, Монреаль, 2005.

9. Временные методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике М. 2014. 110 с.

10. Временные методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике М. 2017. 121 с.

11. Методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике М. 2019. 129 с.

12. Авиационные правила. Часть 170. Сертификация оборудования аэродромов и воздушных трасс (АП-170). Том II. Сертификационные требования к оборудованию аэродромов и воздушных трасс. Дата актуализации: 01.02.2020.

13. Метеорологическое обеспечение международной аэронавигации. Прил.3 к Конвенции о международной гражданской авиации. ИКАО, Монреаль, 2013.

14. Основные технические требования к системе обнаружения опасных атмосферных явлений и штормового оповещения на базе метеорологических радиолокаторов. Приказ Росгидромета № 95 от 21.06.2004 г.

15. Руководство по авиационной метеорологии.

Изд.10. ИКАО, Монреаль, 2015.

16. Руководство по Глобальной системе наблюдений. Изд. 3-е. ВМО № 488, Женева, 2010.

17. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. РД 52.04.320-91. СПб. 1993.

18. Руководство по требованиям к системе организации воздушного движения. Дос 9882. ИКАО, Монреаль, 2008.

19. Федеральные авиационные правила «Использование воздушного пространства Российской Федерации», приказ Минтранса РФ № 138 от 11.03.2010 г.

20. Федеральные авиационные правила «Предоставления метеорологической информации для обеспечения полетов воздушных судов» 3.03.2014 г. № 60.

## ООО «Лаборатория Сфера»

Наша компания успешно занимается научными исследованиями и разработками в области связи, цифровой обработки сигналов и помехоустойчивого кодирования. Мы реализуем проекты в области радиосвязи, мобильной связи, радиодоступа и цифрового вещания.

Основные направления деятельности нашей компании:

- **Разработка ПО.** Разрабатываем специализированное компьютерное программное обеспечение.
- **Разработка для ПЛИС.** Разрабатываем сложные функциональные блоки цифровой обработки сигналов.
- **Научные исследования.** Проводим исследования в области интересующих Вас задач.
- **Разработка решений в области связи.** Решаем поставленные Вами задачи в области связи, радиодоступа и телерадиовещания.
- **Действия с интеллектуальной собственностью.** Осуществляем проведение патентных исследований, составление заявок на патенты на изобретения и полезные модели, а также на свидетельства на программы для ЭВМ и баз данных.
- **Консультации.** Осуществляем консультативную деятельность в области компьютерных технологий и систем связи.

Наши клиенты: ООО «Т8», ООО «3В-Сервис», ООО «Цифровые решения», ООО «НПФ «Сад-Ком», ООО НПП «ТЕПЛОВОДОХРАН», ООО «Силовая электроника» и др.

### Контакты:

Адрес: 390035, г. Рязань, ул. Гоголя, д. 16, оф. 308

Тел.: +7(995)540-75-03

E-mail: [info@labsphera.ru](mailto:info@labsphera.ru)

Сайт: <https://labsphera.ru/>

