

Гидрометеорология и экология. 2023. №73. С. 644—652.

Hydrometeorology and Ecology. 2023;(73):644—652.

Научная статья

УДК 551.591:551.501.8

doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-644-652

## **Методика уточнения пространственного распределения значений метеорологической дальности видимости на основе данных радиолокационных и наземных измерений**

*Илья Евгеньевич Кузнецов, Сергей Александрович Дьяков, Дмитрий Владимирович Булгин*

Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, Воронеж, vaiumet@mail.ru.

*Аннотация.* В работе предлагается методика уточнения поля видимости с использованием информации об осадках на основе вариационного анализа данных о радиолокационной отражательной способности на первом уровне высоты и наземных измерений видимости с учетом физико-географических и климатических особенностей района исследования. Показано, что предлагаемая методика позволяет уточнять значения видимости в различных точках пространства с точностью от 0,6 км до 1,8 км в зависимости от количества станций наземных метеорологических наблюдений.

*Ключевые слова:* видимость, интенсивность осадков, радиолокационная отражательная способность, вариационный анализ.

*Для цитирования:* Кузнецов И. Е., Дьяков С. А., Булгин Д. В. Методика уточнения пространственного распределения значений метеорологической дальности видимости на основе данных радиолокационных и наземных измерений // Гидрометеорология и экология. 2023. № 73. С. 644—652. doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-644-652.

Original article

## **Methodology for clarifying the spatial distribution of meteorological visibility range values based on radar and ground measurements**

*Ilya E. Kuznetsov, Sergey A. Dyakov, Dmitry V. Bulgin*

Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin, Voronezh, Russia.

*Summary.* Currently, information about the meteorological visibility range (MVR) is relevant and allows us to assess the possibility of using aviation in various meteorological conditions. The MVR in the work is understood as the maximum distance determined at the meteorological station, from which unlit objects are visible and identified during the day and light landmarks at night. Its spatial and temporal variability is caused by many factors, including precipitation. Therefore, in order to obtain visibility data, it is necessary to use remote sensing methods of the atmosphere using meteorological radars (MR), information

from which has its advantages and disadvantages. The most important advantage is the ability to obtain information about meteorological magnitudes over a sufficiently large area with good spatial and temporal resolution. The purpose of this study is to improve the quality of meteorological information on the spatial distribution of the values of the MVR by developing a methodology based on the coupling of radar and ground measurements.

At the first stage, based on ground-based observations obtained from weather stations and posts, the field of visibility values of the first approximation is restored using the spline interpolation method. Then, according to radar measurements of reflectivity, visibility values are calculated at each point in space (a 4x4 km cell). At the final stage, a variational analysis of radar and ground measurements of meteorological magnitudes is carried out. A distinctive feature of the proposed algorithm is taking into account the physical, geographical and climatic features of the study area, as well as the use of models for combining heterogeneous meteorological information based on radar and ground observations, taking into account measurement errors of meteorological parameters.

The implementation of this algorithm was carried out on the basis of archival data of radar measurements using meteorological radars of Krasnodar, Sochi, Anapa, Mineralnye Vody for the period from 2015 to 2020. The calculated results were compared with the measured values of the desired meteorological magnitude at meteorological stations not included in the general calculation. A numerical experiment conducted with real data in various synoptic situations has shown that the best result is observed when wet and drizzling precipitation falls. The presence of zones with cumulonimbus clouds leads to significant errors when specifying the values of the MDV, reaching values of 100—150 % of the initial value.

The analysis of the obtained results allows us to conclude that the proposed algorithm for constructing the field of view in precipitation based on radar and ground observations can be used in the operational prognostic practice of meteorological departments.

*Keywords:* visibility, precipitation intensity, radar reflectivity, variation analysis.

*For citation:* Kuznetsov I. E., Dyakov S. A., Bulgin D. V. Methodology for clarifying the spatial distribution of meteorological visibility range values based on radar and ground measurements. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(73):644—652. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-644-652.

## Введение

В настоящее время информация о метеорологической дальности видимости (МДВ) является актуальной и позволяет оценить возможность применения авиации в различных метеорологических условиях. Под МДВ в работе понимается определенное на метеорологической станции максимальное расстояние, с которого видны и опознаются неосвещенные объекты днем и световые ориентиры ночью [1]. Ее пространственно-временная изменчивость обусловлена многими факторами, в том числе и выпадающими осадками. Для получения данных о видимости необходимо применение дистанционных методов зондирования атмосферы с использованием метеорологических радиолокаторов (МРЛ), информация с которых обладает определенными преимуществами и недостатками [2]. Наиболее важным преимуществом является возможность получения сведений о метеовеличинах на довольно большой территории, которые обладают достаточным пространственным и временным разрешением. Основным недостатком подобного рода данных является то, что они зависят от распределения частиц в облаках и осадках по размерам и от их фазового состояния, информация о которых носит стохастический характер. Также возникают существенные ошибки в определении радиолокационных характеристик облаков с удалением от метеорологической радиолокационной станции.

Хотя метеорологические станции и радиолокатор позволяют получить информацию по некоторой территории, генезис и пространственно-временные характеристики исходных данных настолько сильно различаются, что фактически мы имеем дело с различными источниками информации [3]. Поля с информацией об облаках и осадках, полученные по данным измерений на метеостанциях и МРЛ, являются разнородными и для их совместного анализа требуется использование специальных алгоритмов усвоения данных, например, на основе вариационного согласования.

Целью настоящего исследования является повышение качества информации о МДВ на основе использования вариационного анализа данных радиолокационных и наземных измерений с учетом физико-географических и климатических особенностей района исследования.

### **Материалы и методы исследования**

В процессе разработки методики учитывались архивные данные радиолокационных измерений с использованием МРЛ г. Краснодар, г. Сочи, г. Анапа, г. Минеральные Воды за период с 2015 г. по 2020 г.

#### **Методика уточнения пространственного распределения видимости с учетом информации об интенсивности осадков**

В работе предлагается методика уточнения пространственного распределения значений МДВ с учетом информации об осадках на основе статистических зависимостей между данными радиолокационных измерений отражательной способности метеообъектов, полученных с метеорологической радиолокационной станции, и значениями МДВ ( $V$ ), определенными на метеостанциях.

Предлагаемая методика реализуется следующим образом:

1. По данным наземных измерений, полученных с метеостанций и постов, восстанавливается поле значений МДВ с использованием метода сплайновой интерполяции на основе выражения [4]:

$$V_{(x,y)} = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 a_{i,j} x^i y^j, \quad (1)$$

где  $a$  — значения коэффициентов полинома,  $x$  и  $y$  — координаты метеостанции.

Пример построения полученного поля значений МДВ для типовой синоптической ситуации при прохождении холодного фронта первого рода на территории Краснодарского края 28 ноября 2018 года представлен на рисунке 1.

2. По радиолокационным данным выделяются зоны с осадками и проводится их классификация (дождь, морось и т.д.). По результатам измерения отражательной способности ( $Z$ ) на первом уровне высоты в каждой точке пространства (квадрате со стороной 4 км) рассчитываются значения интенсивности осадков по формуле [2, 5, 6]:

$$I=10^{\frac{1}{\beta} \lg \frac{Z}{\alpha}}, \quad (2)$$

где  $I$  — интенсивность осадков, мм/ч,  $\alpha$  и  $\beta$  — коэффициенты, учитывающие характер метеорологического явления, ухудшающего видимость.

Зная информацию об интенсивности осадков, значения МДВ можно определить по формуле [1]:

$$V_{(x,y)}=V_0 I^{-0,71}, \quad (3)$$

где  $V_0$  — видимость при отсутствии осадков, км.

Подставляя (2) в (3), получим значения МДВ в осадках:

$$V_{(x,y)}=V_0 \cdot 10^{\frac{-0,71}{\beta} \lg \frac{Z}{\alpha}}. \quad (4)$$

При отсутствии возможности измерений отражательной способности на первом уровне по высоте производится её определение по алгоритму, представленному в работе [7].

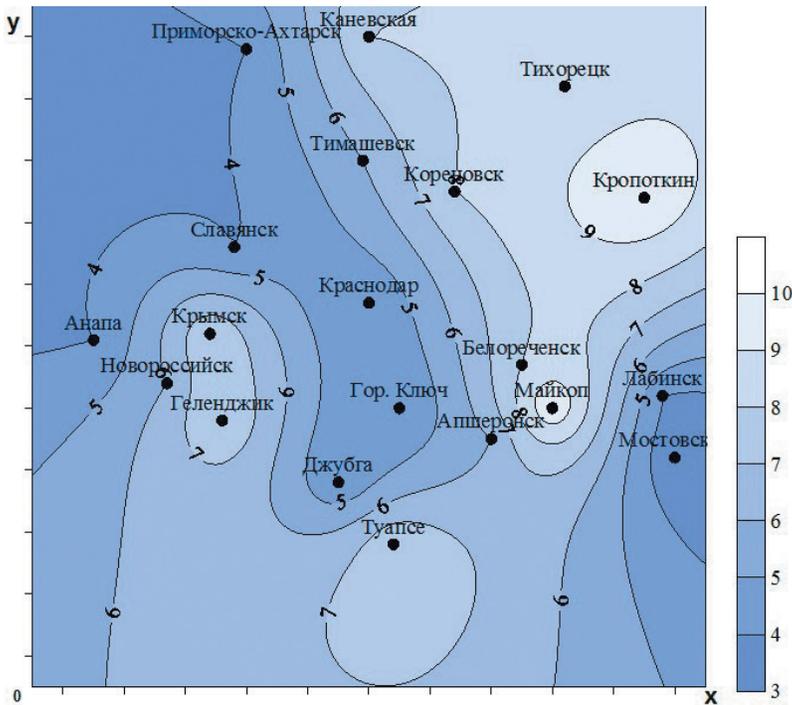


Рис. 1. Поле значений метеорологической дальности видимости, построенное по данным наземных измерений.

Fig. 1. The field of values of the meteorological range of visibility, constructed from ground-based observations.

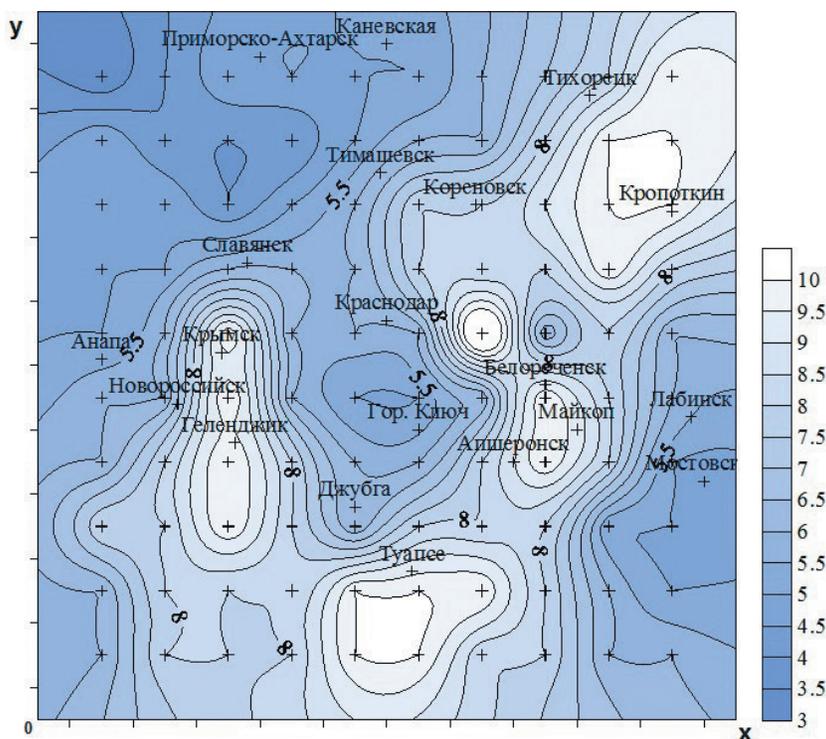


Рис. 2. Поле значений метеорологической дальности видимости, построенное по радиолокационным данным.

Fig. 2. The field of values of meteorological visibility range, constructed from radar data.

Затем восстанавливается поле по радиолокационным данным. Пример реализации предлагаемого подхода для типовой синоптической ситуации при прохождении холодного фронта первого рода на территории Краснодарского края 28 ноября 2018 года представлен на рисунке 2.

3. Далее выполняется вариационный анализ данных радиолокационных и наземных измерений метеовеличин с использованием модели [8, 9]:

$$J = \int_{x_i}^{x_{i+1}} \int_{y_i}^{y_{i+1}} \left[ A(V_{(x,y)} - V_{0(x,y)})^2 + B(V_{(x,y)} - V_{1(x,y)})^2 + C \left( \frac{\partial(V_{(x)} - V_{1(x)})}{\partial x} + \frac{\partial(V_{(y)} - V_{1(y)})}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy \rightarrow \min, \quad (5)$$

где  $V$  — искомое значение МДВ, которое является конечным результатом процедуры вариационного согласования, км;  $V_0$  — значение МДВ с учетом информации от сети метеорологических станций, км;  $V_1$  — значение МДВ, полученное по данным радиолокационных измерений, км;  $A, B, C$  — весовые коэффициенты,

определяющие вклад каждого из слагаемых в вариационный анализ;  $x$  и  $y$  — координаты точки пространства, в которой определяется МДВ.

Коэффициенты  $A$ ,  $B$ ,  $C$  должны быть обратно пропорциональными ковариационным матрицам ошибок ( $A^{-1}$ ,  $B^{-1}$ ,  $C^{-1}$ ), где  $A^{-1}$  — ковариационная матрица ошибок стационарных измерений,  $B^{-1}$ ,  $C^{-1}$  — ковариационные матрицы ошибок радиолокационных измерений. Однако из-за отсутствия такого рода информации коэффициенты подбирались из выполнения условий минимизации ошибок анализа.

После варьирования функционала (5) с использованием уравнения Эйлера—Лагранжа получим:

$$A(V_{(x,y)} - V_{0(x,y)})^2 - B(V_{(x,y)} - V_{1(x,y)})^2 - C \left( \frac{\partial(V_{(x)} - V_{1(x)})^2}{\partial x} + \frac{\partial(V_{(y)} - V_{1(y)})^2}{\partial y} \right) = 0, \quad (6)$$

Решение уравнения (6) осуществляется с использованием итерационной процедуры. Построение поля МДВ выполнялось при помощи процедуры интерполяции на основе использования весовых функций. При этом значение МДВ в каждой точке сетки  $(x,y)$  определялось по формуле:

$$V_{(x,y)} = \frac{\sum_{k=1}^N V_k w_k}{\sum_{k=1}^N w_k}, \quad (7)$$

где  $N$  — количество станций наблюдения;  $V_k$  — значение МДВ, определенное на станции, км;  $w_k$  — весовой множитель, определяющий вклад  $k$ -ой станции в поле МДВ для точки  $(x,y)$ , определяемый по формуле:

$$w_k = e^{-\gamma V_k^2}, \quad (8)$$

где  $\gamma$  — коэффициент пространственной автокорреляции МДВ.

На основе предлагаемой формулы (5) были проведены численные эксперименты по повышению точности поля МДВ по данным радиолокационных и наземных измерений на территории Краснодарского края, в результате которых были подобраны оптимальные коэффициенты  $A$ ,  $B$ ,  $C$ .

Пример для типовой синоптической ситуации при прохождении холодного фронта первого рода на территории Краснодарского края 28 ноября 2018 года представлен на рисунке 3.

Оценка точности результатов, полученных с использованием предлагаемой методики, осуществлялась по данным наземных измерений в каждой точке путем расчета следующих показателей: среднеквадратическая  $\sigma(V)$  и средняя абсолютная  $\delta(V)$  ошибки, коэффициенты вариации внутри исследуемых областей  $C_v(V)$  с использованием данных, не включенных в общий расчет. Результаты оценки качества предлагаемой методики, представляющие собой среднюю по полю ошибку восстановления значений МДВ, представлены в таблице 1.

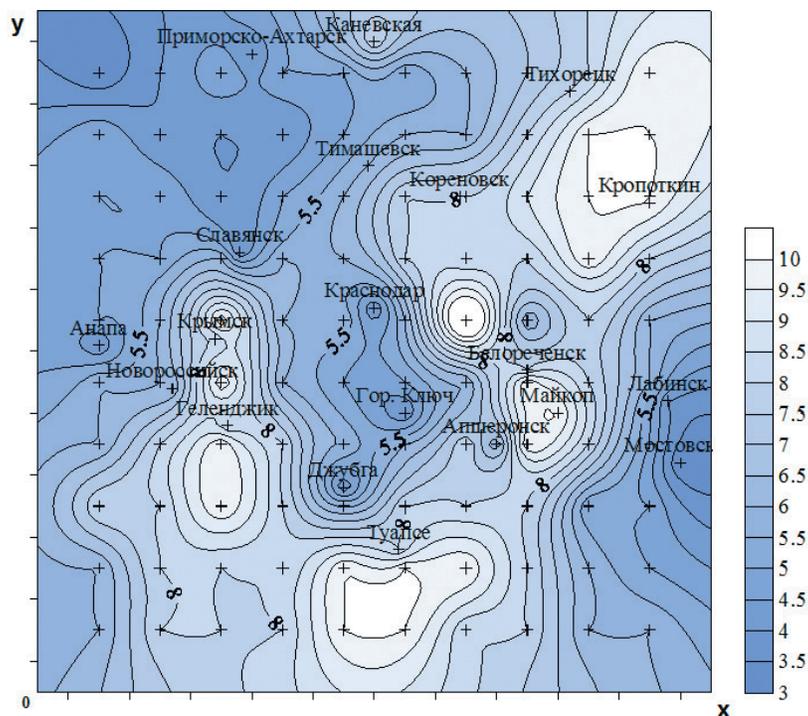


Рис. 3. Поле значений метеорологической дальности видимости, построенное по комплексным данным.

Fig. 3. The field of values of meteorological visibility range, constructed from complex data.

Таблица 1

Статистические характеристики точности аппроксимации поля видимости с учетом информации об осадках на территории Краснодарского края  
 Statistical characteristics of the accuracy of the approximation of the field of view, taking into account information about precipitation in the Krasnodarskiy kray

Количество пунктов наблюдений	$\sigma(V)$ , км	$a(V)$ , км	$\delta(V)$ , км	$C_v(V)$ , км
10	1,23	1,8	2,0	0,62
15	0,55	0,8	0,9	0,45
20	0,45	0,6	0,7	0,39

Анализ данных таблицы 1 показывает, что количество включенных в расчет метеорологических станций существенно влияет на точность пространственного восстановления МДВ. При этом качество полученных результатов также зависит от плотности их распределения. Особенно ярко это проявляется при наличии над территорией исследования внутримассовых и замаскированных кучево-дождевых облаков.

## Выводы

Предложенная в работе методика пространственного распределения значений МДВ, основанная на статистических зависимостях между радиолокационной отражаемостью метеообъектов и данными наземных измерений МДВ, а также на моделях вариационного анализа и сплайновой интерполяции этих данных, позволяет повысить точность пространственной аппроксимации МДВ по значениям средней абсолютной ошибки от 0,6 км до 1,8 км, по значениям среднеквадратического отклонения от 0,45 км до 1,23 км при размещении станций наземных измерений в районе исследования с равномерной плотностью в количестве от 10 до 20 шт.

Численный эксперимент, проведенный с реальными данными при различных синоптических ситуациях, показал, что получение наилучшего результата наблюдается при выпадении обложных и морозящих осадков. Наличие зон с кучево-дождевой облачностью приводит к значительным ошибкам при уточнении значений МДВ, достигающим значений 100—150 % от исходной величины.

## Список литературы

1. Богаткин О. Г. Основы авиационной метеорологии. Учебник. СПб.: Изд. РГГМУ, 2009. 339 с.
2. Билетов М. В., Тищенко А. И., Кузнецов И. Е. Радиолокационная метеорология. Часть 1. Основы радиолокационной метеорологии. М.: Воениздат, 2008. 332 с.
3. Караваев Д. М., Шукин Г. Г. Совершенствование методов раннего предупреждения развития грозных процессов и выявления зон обледенения в облаках на основе комплексного использования методов активной и пассивной радиолокации // Ученые записки РГГМУ. 2021. Вып. 62. С. 7—21. doi: 10.33933/20742762202162726.
4. Расселл Д. Бикубическая интерполяция. М.: Книга по требованию, 2013. 38 с.
5. Жуков В. Ю., Рыков М. С., Шукин Г. Г. Экспериментальная проверка нового радиолокационного метода оценивания интенсивности осадков // Ученые записки РГГМУ. 2018. Вып. 52. С. 21—28.
6. Безрукова Н. А., Чернокульский А. В. Российские исследования облаков и осадков в 2015—2018 гг. Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 4. С. 397—417. doi: 10.31857/S0002351520040021.
7. Кузнецов И. Е., Горбачев В. Д. Методика пространственно-временного анализа полей метеорологических величин в условиях ограничения метеоинформации // Научно-технический вестник Поволжья № 5, 2011. С. 98—102.
8. Клименко Д. Е. Оценка предельных максимумов дождевых осадков физическими методами на основе спутниковых и радиолокационных данных наблюдений. Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 4. С. 443—452. doi: 10.31857/S0321059620040069.
9. Кузнецов И. Е., Первезенцев Р. Е. Методические аспекты восстановления метеорологических полей при комплексном использовании данных радиолокационных и аэросиноптических наблюдений // Навигация и гидрография. 2016. № 43 С. 57—63.

## References

1. Bogatkin O. G. *Osnovy aviacionnoj meteorologii = Fundamentals of aviation meteorology*. St. Petersburg: Izd. RGGMU, 2009: 339 p. (In Russ.).
2. Biletov M. V., Tishchenko A. I., Kuznetsov I. E. *Radiolokacionnaja meteorologija = Radar meteorology. Part 1. Fundamentals of radar meteorology*. Moscow: Voensizdat, 2008: 332 p. (In Russ.).
3. Karavaev D. M., Shchukin G. G. Improving methods of early warning of the development of thunderstorm processes and identification of icing zones in clouds based on the integrated use of active and

- passive radar methods. *Uchenye zapiski RGGMU = Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University*. 2021;(62):(7—21). (In Russ.). doi: 10.33933/20742762202162726.
4. Russell D. *Bikubicheskaja interpolacija = Bicubic interpolation*. Moscow: Kniga po trebovaniju, 2013: 38 p. (In Russ.).
  5. Zhukov V. Yu., Rykov M. S., Shchukin G.G. Experimental verification of a new radar method for estimating precipitation intensity. *Uchenye zapiski RGGMU = Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University*. 2018;(52): (21—28). (In Russ.).
  6. Bezrukova N. A., Chernokulsky A. V. Russian studies of clouds and precipitation in 2015—2018. *Izvestiya Rossijskoy akademii nauk. Pfizika atmosfery i okeana = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Atmospheric and ocean physics*. 2020;(56): (397—417). (In Russ.). doi: 10.31857/S0002351520040021.
  7. Kuznetsov I. E., Gorbachev V. D. Methodology of spatial and temporal analysis of meteorological magnification fields in conditions of limited meteorological information. *Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolg'ja = Scientific and Technical Bulletin of the Volga region*. 2011;(5):(98—102). (In Russ.).
  8. Klimenko D. E. Assessment of maximum rainfall maxima by physical methods based on satellite and radar observation data. *Vodnye resursy = Water resources*. 2020;(47):(443—452). (In Russ.). doi: 10.31857/S0321059620040069.
  9. Kuznetsov I. E., Pervezentsev R. E. Methodological aspects of the restoration of meteorological fields with the integrated use of radar and aerosynoptic observations. *Navigatsija i gidrografija = Navigation and hydrography*. 2016;(43):(57—63). (In Russ.).

### **Информация об авторах**

*Илья Евгеньевич Кузнецов*, д-р техн. наук, профессор, начальник кафедры гидрометеорологического обеспечения, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина (г. Воронеж), vaiumet@mail.ru.

*Сергей Александрович Дьяков*, канд. геогр. наук, заместитель начальника кафедры гидрометеорологического обеспечения, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина (г. Воронеж), karino\_1976@mail.ru.

*Дмитрий Владимирович Булгин*, канд. техн. наук, доцент кафедры гидрометеорологического обеспечения, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина (г. Воронеж), d.bulgin77@yandex.ru.

### **Information about the authors**

*Ilya Evgenievich Kuznetsov*, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department Hydrometeorological Support, Military Training and Research Center of the Air Force “Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin (Voronezh).

*Sergey Alexandrovich Dyakov*, Candidate of Geological Sciences, Deputy Head of the Department Hydrometeorological Support, Military Training and Research Center of the Air Force “Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin (Voronezh).

*Dmitry Vladimirovich Bulgin*, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department Hydrometeorological Support, Military Training and Research Center of the Air Force “Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin (Voronezh).

**Конфликт интересов:** конфликт интересов отсутствует.

*Статья поступила 23.04.2023*

*Принята к печати после доработки 23.11.2023*

*The article was received on 23.04.2023*

*The article was accepted after revision on 23.11.2023*