

Сравнительный анализ данных реанализа и аэрологического зондирования и его валидация по показателю возможного обледенения воздушного судна на примере пункта Воронеж

В. С. Балакин , Ю. В. Шипко, О. В. Колычев

Центральный научно-исследовательский институт Военно-воздушных сил,
Российская Федерация
(127083, г. Москва, аллея Петровско-Разумовская, 12А, стр. 4)

Аннотация. Цель – сравнительный анализ метеорологических характеристик (температуры и влажности воздуха) по данным реанализа и аэрологического зондирования в определенном пункте.

Материалы и методы. Исходная информация – данные реанализа NCEP/DOE AMIP-II и телеграмм аэрологического зондирования. Для сопоставления рядов многолетних данных по каждому месяцу использовались непараметрические критерии прикладной статистики.

Результаты и обсуждение. Установлено, что соответствующие совокупности значений температуры и влажности воздуха по реанализу и атмосферному зондированию на уровнях 925, 850, 700, 500 гПа в каждом месяце имеют идентичные распределения. Выявлено, что статистическое соответствие сопоставленных пар значений параметров не наблюдается. Проведена валидация анализа на примере расчета климатического показателя оценки возможного обледенения воздушного судна.

Выводы. Данные реанализа (температуры и относительной влажности) могут быть использованы в климатологических исследованиях, исключение составляет параметр влажности воздуха уровня 1000 гПа. Оперативное прогнозирование на данных реанализа проблематично.

Ключевые слова: реанализ, аэрологическое зондирование, климатический показатель, непараметрический критерий, обледенение воздушного судна.

Для цитирования: Балакин В. С., Шипко Ю. В., Колычев О. В. Сравнительный анализ данных реанализа и аэрологического зондирования и его валидация по показателю возможного обледенения воздушного судна на примере пункта Воронеж // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*, 2025, № 2, с. 110-117. DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/2/110-117>

ВВЕДЕНИЕ

В метеорологической практике в качестве исходных данных используются так называемые «точечные» данные наблюдений на метеостанциях, и «сеточные» – приведенные к узлам регулярной сетки – данные реанализа параметров атмосферы (например, NCEP/DOE AMIP-II¹, JRA, ERA-Interim² и др.).


«Сеточные» архивы на базе данных реанализа имеют определенные преимущества. Во-первых, это наличие метеоинформации в малонаселенных регионах, где сеть метеостанций редкая и неоднородная, над океанами. Во-вторых, в сеточных климатических архивах отфильтрованы ошибки, отсутствуют пропуски в рядах данных. В-третьих, данные удобны для тестирования результатов моделирования. Поэтому для исследования

общих закономерностей и особенностей процессов атмосферы материалы реанализов широко используются в климатологии, геоинформационных системах, научных разработках предметного назначения.

Однако существует и недостаток данных реанализа – это точность информации. Климатические сеточные модели лучше воспроизводят давление и температуру, но хуже – осадки, облачность, потоки радиации. Качество моделирования зависит от особенностей подстилающей поверхности.

Для обоснования адекватности, корректности использования данных реанализов в настоящее время проводятся исследования, где отражается разного рода сравнительный анализ. Например, сравниваются среднемесячные характеристики температуры воздуха

© Балакин В. С., Шипко Ю. В., Колычев О. В., 2024

 Балакин Владимир Станиславович, e-mail: balakin69vs@mail.ru

¹ NCEP/DOE AMIP II Reanalysis. – URL: <http://www.esrl.noaa.gov/pcd/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.html> (дата обращения: 22.05.2024). – Текст: электронный.

² Atmospheric Reanalyses Comparison Table. – URL: <https://reanalyses.org/atmosphere/comparison-table> (дата обращения: 20.02.2024). – Текст: электронный.



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

и осадков по реанализу ERA5-Land и приземным данным метеостанций на территории Московской области на базе корреляционного анализа [2]. Оценивается сезонная и межгодовая изменчивость высоты снежного покрова в Пермском крае по разности данных реанализа ERA5-Land и станционных наблюдений [6]. Сравнительный анализ проводится по территории Западной Сибири, исследуется пространственно-временное распределение температуры деятельного слоя почвы, используется корреляционный анализ [5]. Для обоснования использования данных реанализа проводится верификация среднемесячной температуры воздуха на высоте 2 м и месячных сумм осадков по ERA5-Land со станционными данными в горных районах азиатской территории России по сезонам, оценивается относительная погрешность [9]. Дается сравнение трендов (тенденций) среднего атмосферного давления на уровне моря по данным реанализов (NCEP-NCAR, ERA5, JRA55) и приземных наблюдений из базы антарктических данных [7]. Рассматривается сравнение данных реанализа MERRA-2 и реальных измерений массового содержания аэрозольных частиц в приземном воздухе в Москве, используются среднемесячные показатели [3]. При исследовании формирования циклонов в умеренных и полярных широтах сравниваются максимальные скорости ветра по данным радиометра и реанализа ERA-Interim [1].

Исследования по данной тематике образуют целый спектр, который можно формулировать как систему сравнений, где рассматриваются:

- определенные проекты реанализа и ресурсы фактических данных;
- пункты и территории;
- различные временные рамки (сроки, месяцы, сезоны, годы);
- отдельные параметры и их характеристики (абсолютные величины, средние, отклонения, аномалии и др.); производные (комплексные) показатели; процессы, где предикторами выступают гидрометеорологические величины;
- оригинальные подходы и приложения разных методов математико-статистического инструментария.

В научных работах отмечается, что приложение в исследованиях модельных данных реанализов качественно отражает различные гидрометеорологические характеристики, показатели, процессы, однако, в каждом случае имеет место некоторая «недооценка» наблюдаемого уровня условий внешней среды.

Имеет место противоречие между необходимостью использования информации реанализов, имеющей по многим свойствам определенные преимущества перед «точечными» базами данных, с одной стороны, и отсутствием полного соответствия этой информации реальным (наблюдаемым) природным характеристикам.

Таким образом, актуальность работы с целью сравнения метеорологических характеристик (температуры и влажности воздуха) по данным реанализа и аэрологического зондирования в определенном пункте путем оценки непараметрическими критериями статистики, как дополнения отмеченной системы сравнения данных, не вызывает сомнений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использованы данные параметров атмосферы – температуры и относительной влажности воздуха – архива реанализа NCEP/DOE AMIP-II и телеграмм аэрологического зондирования атмосферы³ (ст. Воронеж, индекс 34122, период 2015–2019 гг.). Выбор данных параметров обоснован тем, что они используются при построении индексов грозоопасности, аэрологических диаграмм, в расчете условий облечения самолетов и т. д. Для корректности сравнения данных определен один срок – 00 ч Всемирного согласованного времени (BCV). Данные реанализа в узлах сетки интерполированы для координат ст. Воронеж (51,8° северной широты, 39,3° восточной долготы). Проведена статистическая обработка многолетних данных на изобарических уровнях 1000, 925, 850, 700, 500 гПа по месяцам года. Для сопоставления данных реанализа и аэрологического зондирования использовались непараметрические критерии статистики: Колмогорова-Смирнова и Манна-Уитни – при сравнении распределений параметров; тесты (критерии) знаков и знаковых рангов Уилкоксона – при оценке сходимости пар взаимосвязанных измерений [8]. Их использование обосновано тем, что они менее ограничительны в смысле независимости от определенного параметрического семейства распределений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты первичной обработки многолетних данных реанализа и аэрологического зондирования представлены для сравнения в виде схем распределений параметров (рис. 1, 2, где, для примера, даны распределения для января). О статистической сходимости данных реанализа и аэрологического зондирования можно судить по гистограммам (например, рис. 3). Следует заметить, что объемы выборок для данных зондирования меньше соответствующих объемов из реанализа, – из-за пропуска некоторых значений в телеграммах зондирования (данные реанализа лишены такого недостатка).

Проведена сравнительная оценка статистической идентичности распределений параметров атмосферы по данным реанализа и атмосферного зондирования с использованием непараметрических критериев Колмогорова-Смирнова и Манна-Уитни [8] (табл. 1, где обозначение «+» соответствует идентичности распределений на уровне статистической значимости 0,05).

³University of Wyoming/ Radiosonde Data. – URL: <https://weather.uwyo.edu/upperair/europe.html> (дата обращения 25.04.2024). – Текст: электронный.

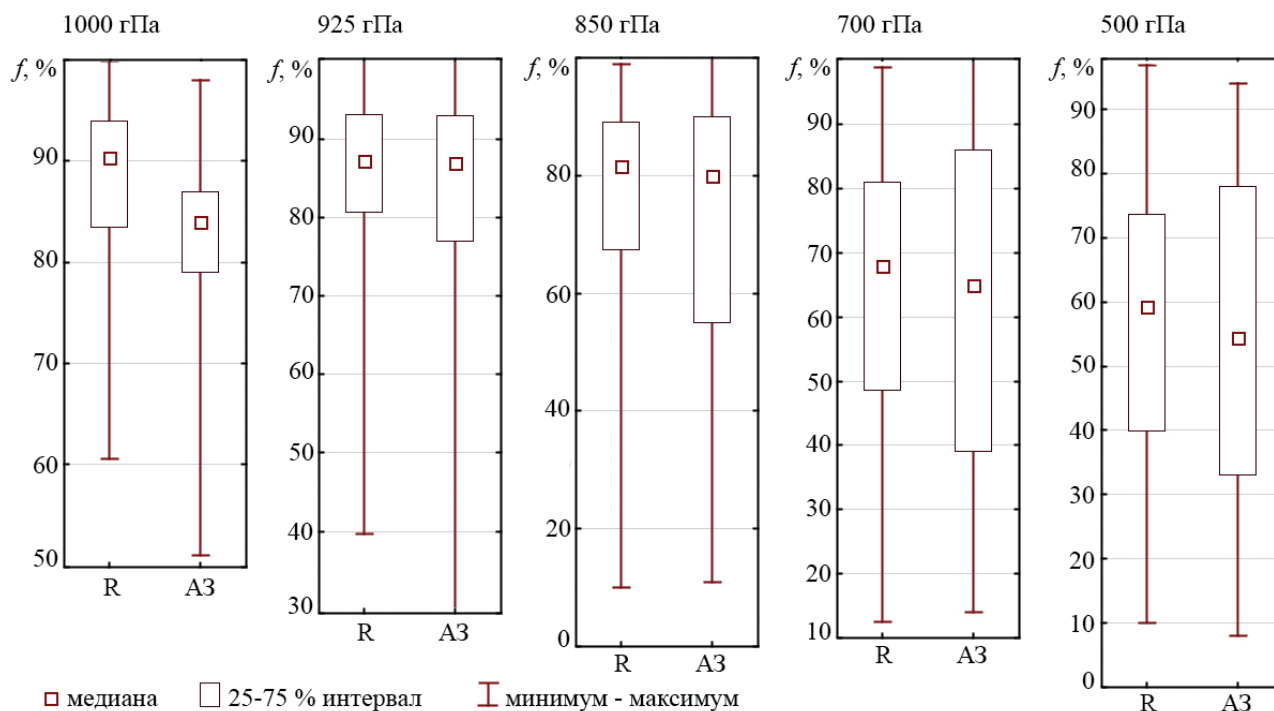


Рис. 1. Схема распределения относительной влажности воздуха на изобарических уровнях по данным реанализа и атмосферного зондирования в январе

[Fig. 1. Scheme of relative air humidity distribution at isobaric levels according to reanalysis and atmospheric sounding data in January]

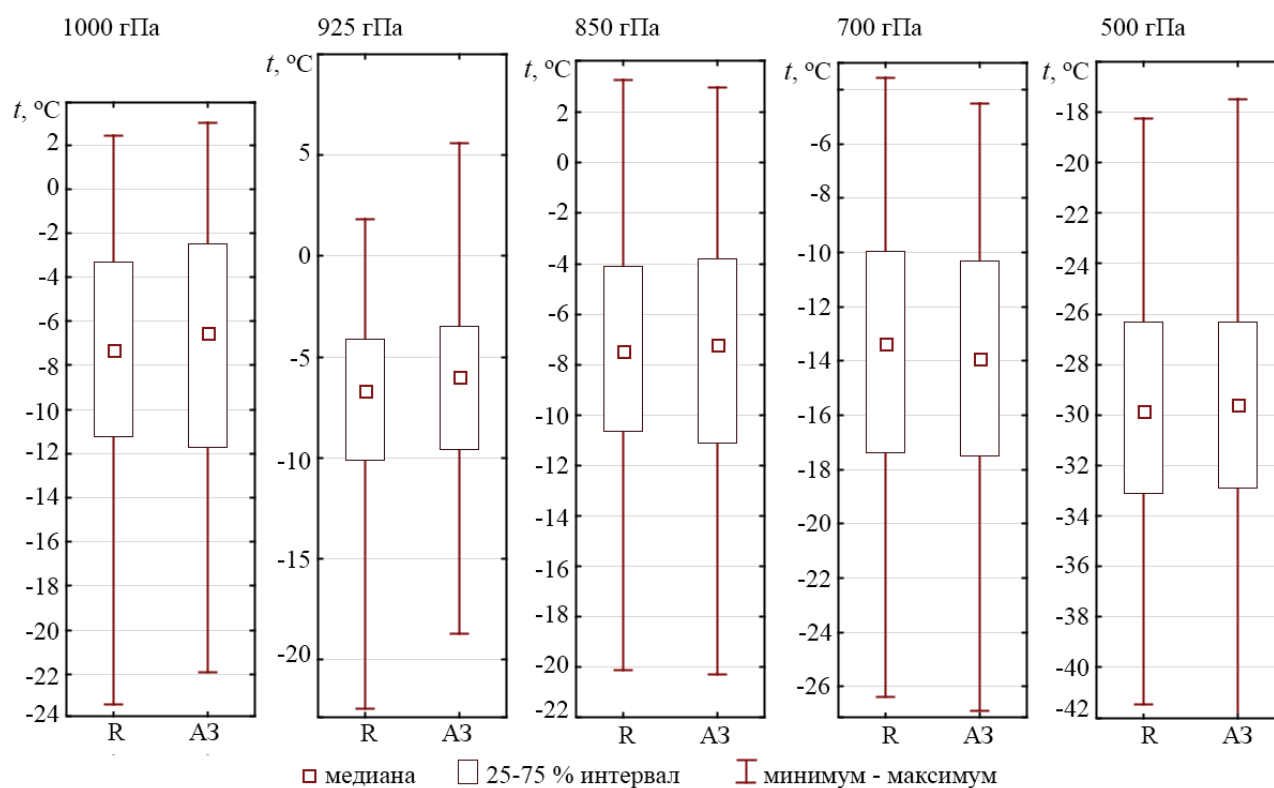


Рис. 2. Схема распределения температуры воздуха на изобарических уровнях по данным реанализа и атмосферного зондирования в январе

[Fig. 2. Scheme of air temperature distribution at isobaric levels according to reanalysis and atmospheric sounding data in January]

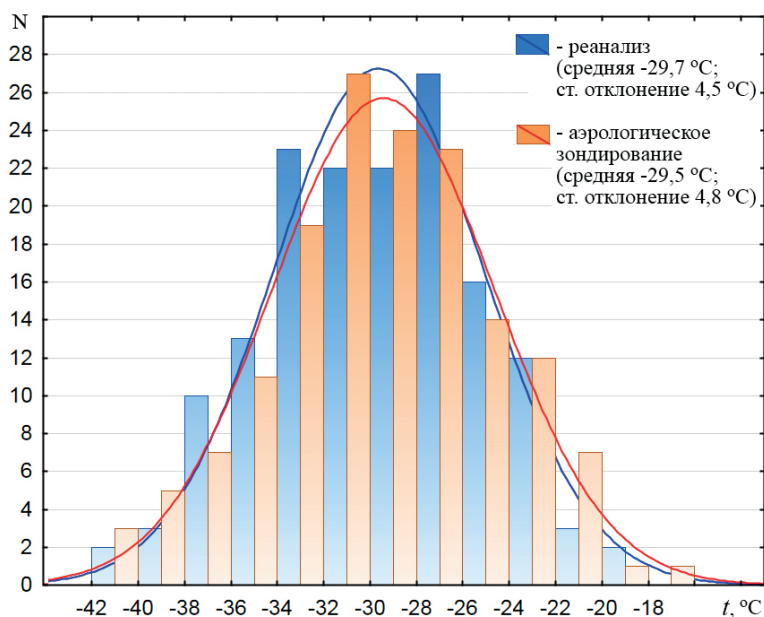


Рис. 3. Гистограмма распределения температуры воздуха на уровне 500 гПа по данным реанализа и атмосферного зондирования в январе

[Fig. 3. Histogram of air temperature distribution at the 500 hPa level according to reanalysis and atmospheric sounding data in January]

Таблица 1

Результаты проверки статистических гипотез при сравнении параметров по данным реанализа и атмосферного зондирования с использованием непараметрических критериев Колмогорова-Смирнова и Манна-Уитни
[Table 1. Statistical hypothesis test results comparing parameters according to reanalysis and atmospheric sounding data using nonparametric criterion Kolmogorov-Smirnov and Mann-Whitney]

Месяц / Month	Критерий / Criterion	Изобарический уровень, гПа / Isobaric level, hPa									
		1000		925		850		700		500	
		Параметр атмосферы / Atmospheric parameter									
		<i>f</i>	<i>t</i>	<i>f</i>	<i>t</i>	<i>f</i>	<i>t</i>	<i>f</i>	<i>t</i>	<i>f</i>	<i>t</i>
январь	Колмогорова-Смирнова	—	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Манна-Уитни	—	+	+	+	+	+	+	+	+	+
февраль	Колмогорова-Смирнова	—	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Манна-Уитни	—	+	+	+	+	+	+	+	+	+
март	Колмогорова-Смирнова	—	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Манна-Уитни	—	+	+	+	+	+	+	+	+	+
апрель	Колмогорова-Смирнова	—	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Манна-Уитни	—	+	+	+	+	+	+	+	+	+
май	Колмогорова-Смирнова	—	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Манна-Уитни	—	+	+	+	+	+	+	+	+	+
июнь	Колмогорова-Смирнова	+	+	+	+	+	+	+	+	—	+
	Манна-Уитни	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
июль	Колмогорова-Смирнова	+	+	+	+	+	+	+	+	—	+
	Манна-Уитни	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
август	Колмогорова-Смирнова	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Манна-Уитни	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
сентябрь	Колмогорова-Смирнова	+	+	+	+	+	+	—	+	+	+
	Манна-Уитни	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
октябрь	Колмогорова-Смирнова	—	+	—	+	+	+	+	+	+	+
	Манна-Уитни	—	+	+	+	+	+	+	+	+	+
ноябрь	Колмогорова-Смирнова	—	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Манна-Уитни	—	+	+	+	+	+	+	+	+	+
декабрь	Колмогорова-Смирнова	—	+	—	+	+	+	+	+	+	+
	Манна-Уитни	—	+	—	+	+	+	+	+	+	+

Из данных таблицы 1 следует, что в целом совокупности значений температуры и влажности воздуха по реанализу и атмосферному зондированию на всех изобарических уровнях в каждом месяце имеют одно и то же распределение (на уровне значимости 0,05); исключение составляет уровень 1000 гПа для относительной влажности, где идентичность распределений имеет место только в летние месяцы.

Результаты сопоставления пар взаимосвязанных измерений в данных реанализа и аэрологического зондирования с использованием критериев знаков и знаковых рангов Уилкоксона представлены в таблице 2 (где выделены ячейки, соответствующие сходимости сопоставленных пар значений параметров по месяцам и изобарическим уровням, обозначение «+» соответствует сходимости пар на уровне значимости 0,05).

Таблица 2

Результаты проверки статистических гипотез при сравнении параметров по данным реанализа и атмосферного зондирования с использованием непараметрических критериев знаков и знаковых рангов Уилкоксона
[Table 2. Statistical hypothesis test results comparing parameters according to reanalysis and atmospheric sounding data using nonparametric sign criterion and Wilcoxon sign ranks]

Месяц / Month	Критерий / Criterion	Изобарический уровень, гПа / Isobaric level, hPa									
		1000		925		850		700		500	
		Параметр атмосферы / Atmospheric parameter									
		<i>f</i>	<i>t</i>	<i>f</i>	<i>t</i>	<i>f</i>	<i>t</i>	<i>f</i>	<i>t</i>	<i>f</i>	<i>t</i>
январь	Знаков	—	—	—	—	—	+	—	+	+	+
	Уилкоксона	—	—	—	—	—	+	—	—	+	+
февраль	Знаков	—	—	—	—	—	—	+	+	+	+
	Уилкоксона	—	—	—	—	—	—	+	+	+	+
март	Знаков	—	—	+	+	+	+	+	+	+	+
	Уилкоксона	—	—	+	+	+	+	+	+	+	+
апрель	Знаков	—	+	—	+	+	+	+	+	+	+
	Уилкоксона	—	+	—	+	+	+	+	+	+	+
май	Знаков	—	—	—	—	—	—	+	+	+	+
	Уилкоксона	—	—	—	—	+	—	+	—	+	—
июнь	Знаков	+	+	+	—	+	—	+	—	—	—
	Уилкоксона	+	+	+	—	+	—	+	—	—	—
июль	Знаков	+	+	—	+	—	+	+	+	+	+
	Уилкоксона	+	+	—	+	—	+	+	+	+	+
август	Знаков	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Уилкоксона	+	+	+	—	+	+	+	+	+	+
сентябрь	Знаков	+	+	+	+	+	+	+	—	+	+
	Уилкоксона	+	+	+	+	+	+	+	+	—	+
октябрь	Знаков	—	+	—	+	+	+	+	—	+	+
	Уилкоксона	—	—	—	+	+	+	+	—	+	+
ноябрь	Знаков	—	—	—	+	—	+	—	—	—	+
	Уилкоксона	—	—	—	+	—	+	—	—	—	+
декабрь	Знаков	—	—	—	+	—	+	—	—	+	+
	Уилкоксона	—	—	—	+	—	+	—	—	+	+

Согласно данным таблицы 2, в целом статистическое соответствие сопоставленных пар измерений в реанализе и атмосферном зондировании не наблюдается и на изобарических уровнях, и по месяцам. Наибольшая сходимость данных на уровне 500 гПа.

В качестве валидации сравнительного анализа проведен расчет специализированного климатического показателя условий возможного обледенения воздушного судна в районе аэродрома. При этом рассматривается

подход расчета числа дней в месяце с такими условиями – удобного показателя для планирования мероприятий в авиации. Методика автоматизированного расчета показателя строится по алгоритму:

1) обращение к файлам реанализа, считывание значений температуры (t_j , °C) и относительной влажности (f_j , %) на стандартных уровнях 1000...500 гПа ($j = 1, 2, \dots, 5$), их пересчет для координат аэродрома;

2) расчет температуры точки росы t_{dj} по формуле⁴

⁴ ГОСТ 8.524–85 Таблицы психрометрические. Построение, содержание, расчетные соотношения. Москва: Издательство стандартов, 1985. 34 с.

$$t_{dj} = \beta_w \left(\frac{\ln(0,01f_j)}{\alpha_w} + \frac{t_j}{\beta_w + t_j} \right) / [1 - D_{des} + \left(\frac{\ln(0,01f_j)}{\alpha_w} + \frac{t_j}{\beta_w + t_j} \right)], \quad (1)$$

где коэффициенты $\alpha_w = 17,5043$, $\beta_w = 241,2$ °C;

3) определение величины температуры насыщения надо льдом [4]:

$$t_{nlj} = -8(t_j - t_{dj}); \quad (2)$$

4) проверка условия $t_j \leq t_{nlj}$ ($j = 1, 2, \dots, 5$); если оказывается, что температура насыщения надо льдом выше температуры окружающего воздуха на одном из уровней, то принимается наличие условий возможного обледенения в районе аэродрома;

5) по многолетней выборке за определенный месяц рассчитывается показатель числа дней с условиями возможного обледенения в районе аэродрома.

Рассматриваемый подход имеет определенные недостатки. Например, не определяется коридор высот с обледенением, не учитываются скорости полета, тип воздушного судна и др. Но данную оценку специализированного климатического показателя в первом приближении можно считать приемлемой, поскольку она позволяет представить повторяемость опасного явления в определенном месяце в конкретном районе.

Проведено сравнение результатов оценки числа дней в месяце с условиями возможного обледенения по данным реанализа и телеграмм аэрологического зондирования атмосферы для ст. Воронеж (рис. 4).

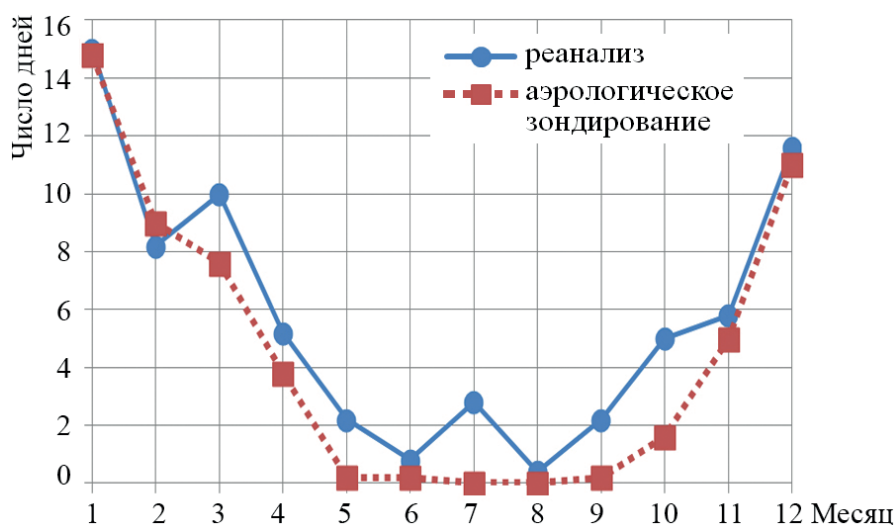


Рис. 4. Сравнение числа дней в месяце с условиями возможного обледенения по данным реанализа и аэрологического зондирования

[Fig. 4. Comparison of the number days in month with conditions of possible icing according to reanalysis and aerological sounding]

Как следует из рисунка 4, сходимость (в среднем) оценки числа дней с условиями возможного обледенения достаточно хорошая, хотя при сравнении пар измерений (в определенный день месяца) часто наблюдается расхождение результатов, что подтверждает предназначение проведенного сравнительного анализа для конкретного использования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнительный анализ метеорологических характеристик по данным реанализа и аэрологического зондирования в определенном пункте путем оценки непараметрическими критериями статистики показал, что распределения температуры и влажности воздуха по реанализу достаточно хорошо (на уровне значимости 0,05) отображают фактические распределения на изобарических уровнях 925-500 гПа (где ослаблено влияние подстилающей поверхности).

Данные реанализа (параметры температуры и относительной влажности воздуха) могут быть использованы в климатологических исследованиях, исключе-

ние составляет параметр влажности воздуха на уровне 1000 гПа. Оперативное прогнозирование на данных реанализа проблематично.

Автоматизированный подход на основе материалов реанализа к расчету различных климатических показателей, требующих использования аэрологической диаграммы, имеет практическое приложение для районов, где запуск аэрологических зондов (с целью вертикального комплексного радиозондирования атмосферы) по каким-либо причинам ограничен.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильева П. В., Заболотских Е. В., Шапрон Б. Сравнительный анализ характеристик внетропических циклонов в северной Атлантике и северной части Тихого океана по данным реанализа ERA-Interim и спутникового радиометра AMSR-E // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2018, т. 15, № 4, с. 236-248.
2. Головинов Е. Э., Васильева Н. А. Сравнение многолетних метеорологических характеристик по данным реанализа и наземных наблюдений на территории Московской области // *Мелиорация и гидротехника*, 2022, т. 12, № 3, с. 92-105.

3. Губанова Д.П., Виноградова А.А., Иванова Ю.А. Сравнение результатов измерений некоторых параметров атмосферного аэрозоля в Москве с данными реанализа ERA-RA-2 // *Экологические исследования и экологический мониторинг*, 2020, т. 1, № 5, с. 115-122.

4. Задорожная Т.Н., Бучнев Д.В., Любимов Р.Г. *Построение и анализ аэрологической диаграммы*. Воронеж: Цифровая типография, 2019. 125 с.

5. Золотов С.Ю., Ипполитов И.И., Логинов С.В. Сравнение данных реанализа NCEP-NCAR профилей температуры почвы с данными измерений сети станций на территории Западной Сибири // *Криосфера Земли*, 2011, т. 15, № 2, с. 14-20.

6. Крючков А.Д., Калинин Н.А. Сравнение характеристик снежного покрова по данным метеорологических станций и реанализа ERA5-Land на территории Пермского края // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*, 2021, № 2 (380), с. 95-110.

7. Романов П.Ю., Романова Н.А. Тренды давления на уровне моря в Южном океане и Антарктике по результатам реанализа и наземным данным // *Океанологические исследования*, 2021, т. 49, № 4, с. 63-85.

8. *Справочник по прикладной статистике. Т. 2: Пер. с англ.* / под ред. Э. Ллойда, У. Ледермана, С.А. Айвазяна, Ю.Н. Тюрина. Москва: Финансы и статистика, 1990. 526 с.

9. Титкова Т.Б., Ананичева М.Д. Использование реанализа ERA5-Land и данных метеостанций в горных районах России для оценки изменения ледниковых систем Восточной Сибири и Дальнего Востока // *Лед и снег*, 2023, т. 63, № 2, с. 199-213.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Поступила в редакцию: 27.02.2025

Принята к публикации: 02.06.2025

ATMOSPHERIC AND CLIMATE SCIENCES

UDC 551.5:311.218:004

ISSN 1609-0683

DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/2/110-117>

Comparative Analysis of Reanalysis and Aerological Sounding Data and Its Validation for the Indicator of Possible Aircraft Icing on the Example of Voronezh Point

V.S. Balakin ✉, Yu. V. Shipko, O. V. Kolychev

Central Scientific Research Institute of Air Force
(Ministry of Defense of the Russian Federation), Russian Federation
(4 b., 12A, Petrovsky-Razumovskaya Al., Moscow, 127083)

Abstract. The purpose is comparative analysis of meteorological characteristics (air temperature and relative humidity) based on reanalysis and airborne sensing data at certain point.

Methods and materials. The data of reanalysis NCEP/DOE AMIP-II and airborne sensing telegrams are initial information. Nonparametric criteria of applied statistics were used to compare multiyear data series for each month.

Results and discussion. It was found that the corresponding sets of air temperature and humidity values for reanalysis and atmospheric sounding at the levels of 925, 850, 700, 500 hPa in each month have identical distributions. It was determined that the statistical correspondence of the compared pairs of parameter values is not observed. Validation of the analysis was carried out using the example of calculating the climatic index for assessing the possible icing of an aircraft.

Conclusions. The reanalysis data (temperature and relative humidity) can be used in climatological studies, with the exception of air humidity parameter of 1000 hPa level. Operational forecasting based on reanalysis data is problematic.

Key words: reanalysis, aerological sounding, climatic index, nonparametric criterion, aircraft icing.

For citation: Balakin V.S., Shipko Yu. V., Kolychev O. V. Comparative Analysis of Reanalysis and Aerological Sounding Data and Its Validation for the Indicator of Possible Aircraft Icing on the Example of Voronezh Point. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografia. Geoekologia*, 2025, no. 2, p. 110-117 (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/2/110-117>

REFERENCES

1. Vasil'eva P.V., Zabolotskih E.V., Shapron B. Sravnitel'nyy analiz harakteristik vnetropicheskikh ciklonov v severnoy Atlantike i severnoy chasti Tihogo okeana po dannym reanaliza ERA-Interim i sputnikovogo radiometra AMSR-E [Comparative

analysis of extratropical cyclones characteristics in the north Atlantic and the north Pacific according to ERA-Interim reanalysis and AMSR-E satellite radiometer data]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, vol. 15, no. 4, pp. 236-248. (In Russ.)



2. Golovinov E.E., Vasil'eva N.A. Sravnenie mnogoletnih meteorologicheskikh harakteristik po dannym reanaliza i nazemnyh nablyudenij na territorii Moskovskoj oblasti [Comparison of long-term meteorological characteristics based on reanalysis and ground observation in the Moscow region]. *Melioraciya i gidrotekhnika*, 2022, vol. 12, no. 3, pp. 92-105. (In Russ.)

3. Gubanova D.P., Vinogradova A.A., Ivanova Y.A. Sravnenie rezul'tatov izmerenij nekotoryh parametrov atmosfernogo aerolya v Moskve s dannymi reanaliza MERRA-2 [Comparison of the results of atmospheric aerosol same parameters measurements in Moscow with MERRA-2 reanalysis data]. *Ekologicheskie issledovaniya i ekologicheskij monitoring*, 2020, vol. 1, no. 5, pp. 115-122. (In Russ.)

4. Zadorozhnaya T.N., Buchnev D.V., Lyubimov R.G. *Postroenie i analiz aerologicheskoy diagrammy* [Aerological diagram construction and analysis]. Voronezh: Cifrovaya tipografiya, 2019. 125 p. (In Russ.)

5. Zolotov S.Yu., Ippolitov I.I., Loginov S.V. i dr. Sravnenie dannyh reanaliza NCEP-NCAR profilej temperatury pochvy s dannymi izmerenij seti stancij na territorii Zapadnoj Sibiri [Comparison of soil temperature profile NCEP-NSAR reanalysis data with station network measurement data in Western Siberia]. *Kriosfera Zemli*, 2011, vol. 15, no. 2, pp. 14-20. (In Russ.)

6. Kryuchkov A.D., Kalinin N.A. Sravnenie harakteristik snezhnogo pokrova po dannym meteorologicheskikh stancij i reanaliza ERA5-Land na territorii Permskogo kraja [Comparison of

snow cover characteristics according to meteorological stations data and ERA5-Land reanalysis in the Perm territory]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy*, 2021, no. 2 (380), pp. 95-110. (In Russ.)

7. Romanov P.Yu., Romanova N.A. Trendy davleniya na urovne morya v Yuzhnom okeane i Antarktike po rezul'tatam reanaliza i nazemnym dannym [Sea level pressure trends in the Southern Ocean and Antarctic based on reanalysis and ground data]. *Okeanologicheskie issledovaniya*, 2021, vol. 49, no. 4, pp. 63-85. (In Russ.)

8. *Spravochnik po prikladnoj statistike. T. 2: per. s angl.* [Handbook of applicable statistics. Vol. 2: Translated from English]. / pod red. E. Llojda, U. Ledermana, S.A. Ajvazyana, Yu. N. Tyurina. Moscow: Finansy i statistika, 1990. 526 p. (In Russ.)

9. Titkova T.B., Ananicheva M.D. Ispol'zovanie reanaliza ERA5-Land i dannyh meteostancij v gornyh rajonah Rossii dlya ocenki izmeneniya lednikovyh sistem Vostochnoj Sibiri i Dal'nego Vostoka [Using ERA5-Land reanalysis and weather stations data in mountainous regions of Russia to evaluate changes in glacial systems in Eastern Siberia and the Far East]. *Led i sneg*, 2023, vol. 63, no. 2, pp. 199-213. (In Russ.)

Conflict of interests: The authors declare no information of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Received: 27.02.2025

Accepted: 02.06.2025

Балакин Владимир Станиславович

Кандидат географических наук, начальник научно-исследовательской лаборатории, Центральный научно-исследовательский институт Военно-воздушных сил (Министерства обороны Российской Федерации), г. Москва, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-7332-2946, e-mail: balakin69vs@mail.ru

Шипко Юрий Владимирович

Кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории, Центральный научно-исследовательский институт Военно-воздушных сил (Министерства обороны Российской Федерации), г. Москва, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-3677-6594, e-mail: yshipko@mail.ru.

Колычев Олег Васильевич

Младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории, Центральный научно-исследовательский институт Военно-воздушных сил (Министерства обороны Российской Федерации), г. Москва, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-7332-2946, e-mail: ok.home@mail.ru

Vladimir S. Balakin

Cand. Sci. (Geogr.), Head of Scientific Research Laboratory, Central Scientific Research Institute of Air Force (Ministry of Defense of the Russian Federation), Moscow, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-7332-2946, e-mail: balakin69vs@mail.ru

Yuri V. Shipko

Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof., Senior Researcher at the Scientific Research Laboratory, Central Scientific Research Institute of Air Force (Ministry of Defense of the Russian Federation), Moscow, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-3677-6594, e-mail: yshipko@mail.ru

Oleg V. Kolychev

Junior Researcher at the Scientific Research Laboratory, Central Scientific Research Institute of Air Force (Ministry of Defense of the Russian Federation), Moscow, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-7332-2946, e-mail: ok.home@mail.ru