

## Анализ радиометрических измерений параметров атмосферы в периоды обледенения воздушных судов в районе аэропорта Санкт-Петербурга

© В. В. Зуев<sup>1</sup>, А. В. Павлинский<sup>1</sup>, Е. С. Савельева<sup>1</sup>, Г. Н. Ильин<sup>2</sup>, В. Ю. Быков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИМКЭС СО РАН, г. Томск, Россия

<sup>2</sup>ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

### Реферат

Обледенение воздушного судна в полете является одним из неблагоприятных и потенциально опасных метеорологических явлений для авиации. Наибольшую опасность обледенение представляет для малоразмерных и беспилотных летательных аппаратов, для которых единственной защитой от обледенения является его своевременный и точный прогноз. Разработка новых методов прогнозирования возможного обледенения, в том числе автоматизированных методов на основе наземных наблюдений, требует подробного изучения метеорологических условий, при которых происходит его возникновение.

В работе приведены результаты радиометрических измерений параметров атмосферы в районе аэродрома Пулково в условиях обледенения и при его отсутствии, рассмотрено их влияние на вероятность возникновения обледенения. Используются данные собственных измерений общего влагосодержания атмосферы и температуры воздуха; а также данные о высоте нижней границы облачности и случаях фактического обледенения воздушных судов в полете, полученные от метеослужбы аэропорта Пулково. На основе полученных данных построены гистограммы распределения вероятности обледенения в зависимости от измеренных параметров атмосферы.

Уточнены диапазоны температуры и влагосодержания атмосферы, при которых вероятность обледенения максимальна. Показано, что наибольшее количество случаев обледенения наблюдается при значениях общего влагосодержания в диапазоне от 0.7 до 1.1 г/см<sup>2</sup>, с максимумом распределения вероятности при  $Q = 0.71$  г/см<sup>2</sup>. Все случаи обледенения наблюдались при температуре от  $-12$  до  $0$  °С без выраженной зависимости от высоты. Выявлено значительное увеличение количества случаев обледенения при высоте нижней границы облачности в диапазоне от 200 до 400 м. Полученные данные могут быть использованы как для уточнения критериев прогнозирования риска обледенения в автоматизированных прогностических системах, так и в качестве вспомогательных параметров в ручном составлении прогнозов.

**Ключевые слова:** обледенение воздушных судов, радиометрия, общее влагосодержание, высота нижней границы облачности, пограничный слой атмосферы.

*Контакты для связи: Павлинский Алексей Валерьевич (wf@inbox.ru).*

*Статья поступила в редакцию 13.10.2020, принята к публикации 16.10.2020, опубликована 30.10.2020.*

**Для цитирования:** Зуев В. В., Павлинский А. В., Савельева Е. С., Ильин Г. Н., Быков В. Ю. Анализ радиометрических измерений параметров атмосферы в периоды обледенения воздушных судов в районе аэропорта Санкт-Петербурга // Труды ИПА РАН. 2020. Вып. 54. С. 27–31.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.54.27-31>

## Analysis of Radiometric Measurements of Atmospheric Parameters in Aircraft Icing Periods in the Area of the St. Petersburg Airport

V. V. Zuev<sup>1</sup>, A. V. Pavlinsky<sup>1</sup>, E. S. Savelieva<sup>1</sup>, G. N. Il'in<sup>2</sup>, V. Yu. Bykov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia

<sup>2</sup>Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

### Abstract

Aircraft icing in-flight is one of the adverse and potentially dangerous meteorological phenomena for aviation. The greatest danger of icing is for small-sized and unmanned aerial vehicles, where timely and accurate forecast is the only protection against icing. The development of new methods for predicting possible icing, including automated methods of ground-based observations, requires a detailed study of the meteorological conditions under which it occurs.

The paper presents the results of radiometric parameters of the atmosphere in the area of the Pulkovo airfield under icing conditions and in the absence of icing and their effect on the icing probability. The data of our measurements of the total vapor content of the atmosphere and air temperature were used, as well as data on the cloud ceiling height and actual in-flight icing cases, provided by the Pulkovo airport weather service. Based on the data obtained, histograms of the icing probability distribution were constructed depending on the measured atmospheric parameters.

The ranges of temperature and total vapor content of the atmosphere, at which the probability of icing is maximum, have been specified. The largest number of icing cases is observed at values of total vapor content in the range from 0.7 to 1.1 g/cm<sup>3</sup>, with the maximum of the probability distribution at  $Q = 0.71$  g/cm<sup>3</sup>. All the cases of icing were observed at temperatures from  $-12$  °C to 0 °C without a marked dependence on height. A large increase in the number of icing cases was revealed at the cloud ceiling in the range from 200 to 400 m. The data obtained can be used both to refine the criteria for predicting the risk of icing in automated forecast systems and as auxiliary parameters in manual forecasting.

**Keywords:** aircraft icing, radiometry, total vapor content, cloud ceiling height, atmospheric boundary layer.

*Contacts: Alexey V. Pavlinsky (wf@inbox.ru).*

*Received 13 October, 2020, accepted 16 October, 2020, published 30 October, 2020.*

**For citation:** Zuev V. V., Pavlinsky A. V., Savelieva E. S., Il'in G. N., Bykov V. Yu. Analysis of radiometric measurements of atmospheric parameters in aircraft icing periods in the area of the St. Petersburg airport // Transactions of IAA RAS. 2020. Iss. 54. P. 27–31.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.54.27-31>

## Введение

Обледенение воздушного судна (ВС) в полете является одним из неблагоприятных метеорологических явлений для авиации [1–3]. Обледенение ВС, как правило, возникает при отрицательной температуре и высокой влажности воздуха в атмосфере [4–6]. В этих условиях возможно образование водяного пара и капель воды в переохлажденном состоянии, что может привести к образованию льда на поверхности ВС [7–9]. Обледенение может происходить на любых высотах, представляя особую опасность во время взлета и посадки ВС. Для обеспечения безопасности полетов необходимо изучение метеорологических условий, при которых наиболее вероятно возникновение обледенения [10–12]. Безопасность полетов, в частности, определяют такие критерии, как вероятность возникновения обледенения ВС и повторяемость случаев обледенения в районе аэродрома. Одним из основных методов прогноза обледенения является модель Шульца – Политович, согласно которой наиболее высокая вероятность возникновения обледенения ВС наблюдается при влажности воздуха  $\geq 63$  % и температуре от  $-16$  до 0 °C [13–15]. Обледенение при слаболожительных температурах также возможно при локальном адиабатическом расширении воздуха, обтекающем поверхность ВС [6]. При этом воздух охлаждается до отрицательных температур и в условиях высокого влагосодержания на поверхности ВС происходит образование льда. В данной работе на основе сравнительного анализа данных радиометрических измерений параметров атмосферы в условиях обледенения и при его отсутствии исследуются особенности возникновения обледенения ВС в районе аэродрома Санкт-Петербурга.

## Исходные данные

Основным источником информации о случаях обледенения ВС в полете являются сообщения экипажей (данные бортовой погоды). В работе использовались данные Комплексной радиотехнической аэродромной метеорологической станции (КРАМС)

Международного аэропорта Санкт-Петербурга (Пулково) за 2018–2020 гг. [16]. В районе аэродрома Пулково за период с 1 октября 2018 г. по 31 марта 2020 г. было зарегистрировано 508 случаев обледенения по данным бортовой погоды (4244 записи в электронном журнале погоды АВ-6). Для анализа условий формирования обледенения ВС использовались данные о высоте нижней границы облачности (ВНГО) по данным журнала АВ-6, данные об общем влагосодержании в столбе атмосферы, полученные с помощью радиометра водяного пара РВП [17], и вертикальные профили температуры в нижнем километровом слое, полученные с помощью метеорологического температурного профилера МТР-5 [18], за период с 1 октября 2018 г. по 31 марта 2020 г. Приборы МТР-5 и РВП расположены на площадке Института прикладной астрономии РАН на удалении 17 км от аэропорта Пулково.

## Результаты, их анализ и обсуждение

Основную опасность для обледенения ВС представляют собой облака и выпадающие из них осадки. Капли переохлажденной влаги облаков или осадков замерзают при контакте с поверхностью ВС, на образовавшуюся ледяную корку происходит налипание следующих слоев капель, увеличивающих ее толщину [1]. Степень опасности обледенения определяется скоростью нарастания льда, а характеристикой скорости нарастания является интенсивность обледенения, т. е. толщина льда, откладывающегося на поверхности в единицу времени. Интенсивность обледенения подразделяется на слабую (менее 0.5 мм/мин), умеренную (0.6–1.0 мм/мин) и сильную (более 1.0 мм/мин) [19, 20]. Обледенение ВС в районе аэродрома Пулково преимущественно наблюдается выше нижней кромки облаков и лишь в редких случаях — ниже высоты нижней границы облачности (ВНГО) в осадках [6]. На рис. 1 приведены гистограммы распределения значений ВНГО при обледенении и в его отсутствие, а также в зависимости от его интенсивности: при умеренном и сильном обледенении.

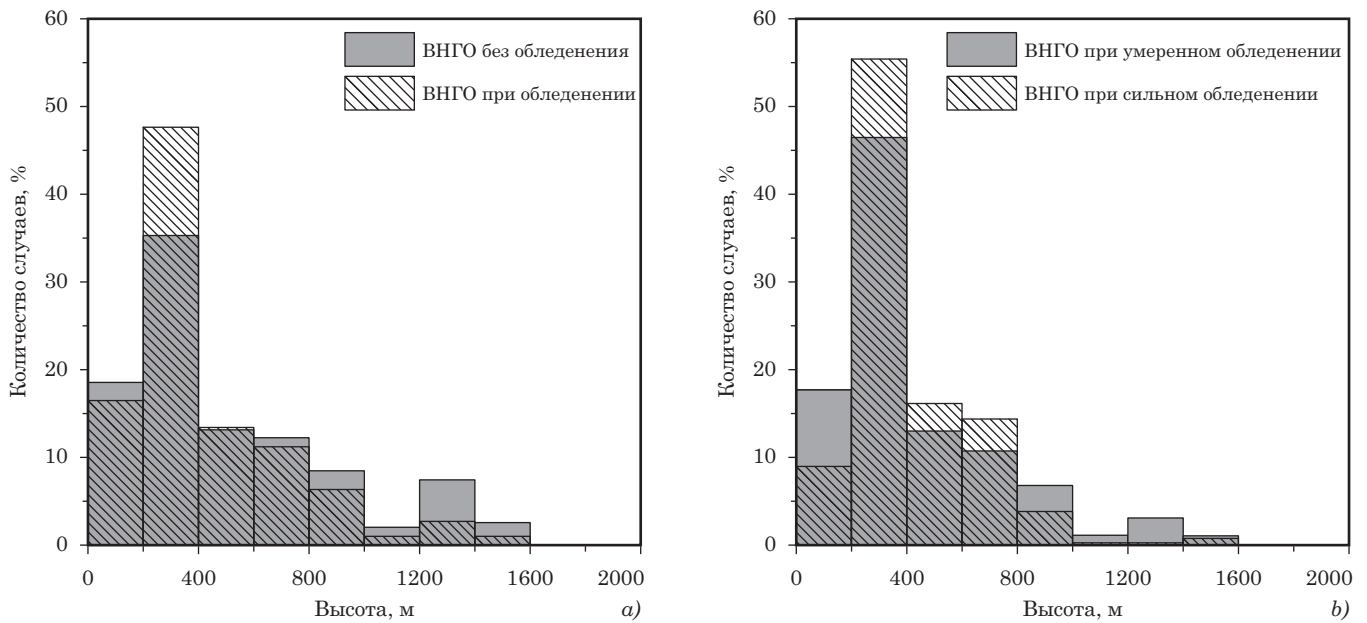


Рис. 1. Распределение ВНГО на высотах от 0 до 2 км: а) при наличии и отсутствии обледенения; б) при умеренном и сильном обледенении в районе аэродрома Пулково за период с 1 октября 2018 г. по 31 марта 2020 г.

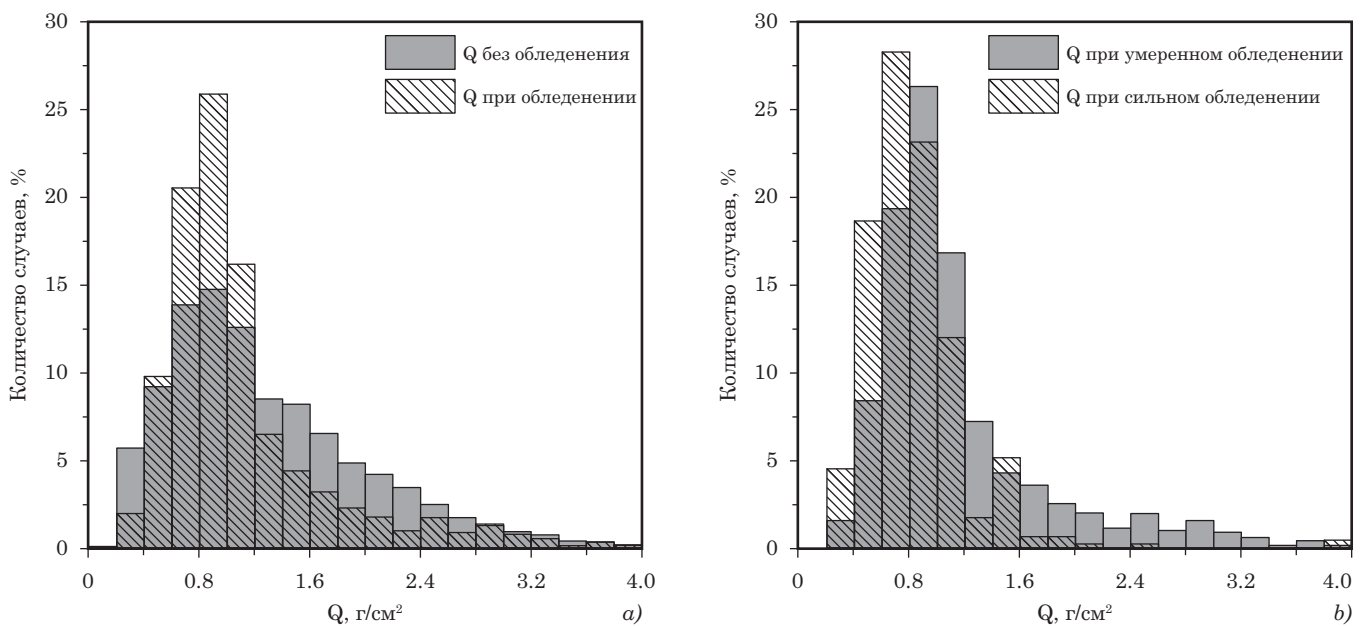


Рис. 2. Распределение общего влагосодержания атмосферы  $Q$ : а) при наличии и отсутствии обледенения; б) при умеренном и сильном обледенении в районе аэродрома Пулково за период с 1 октября 2018 г. по 31 марта 2020 г.

Как видно из рис. 1, наиболее высокая вероятность возникновения обледенения ВС наблюдается при ВНГО в диапазоне от 200 до 400 м: на 26 % выше по отношению к случаям без обледенения и в целом 48 % всех случаев обледенения наблюдалось при ВНГО от 200 до 400 м за период с 1 октября 2018 г. по 31 марта 2020 г. Умеренное обледенение в районе аэродрома Пулково наблюдается примерно в 6 раз чаще сильного: в 86 % случаев регистрировалось умеренное обледенение, в 14 % случаев — сильное. При ВНГО в диапазоне от 200 до 400 м наблюдалось наибольшее количе-

ство случаев обледенения ВС, как умеренного — в 46 %, так и сильного — в 55 % случаев (рис. 1).

Как было отмечено выше, влажность и температура воздуха играют определяющую роль в возникновении обледенения ВС. На рис. 2 приведены гистограммы распределения значений общего влагосодержания атмосферы  $Q$  при обледенении и отсутствии, а также в зависимости от его интенсивности: при умеренном и сильном обледенении, полученные по данным РВП и данным бортовой погоды. Наибольшее количество случаев обледенения наблюдалось при  $Q$  в диапазоне от 0.7 до

1.1 г/см<sup>2</sup> (суммарно ~ 52 %), с максимумом при  $Q = 0.71$  г/см<sup>2</sup> (~ 2.2 % случаев). При этом, если наибольшая вероятность умеренного обледенения сохраняется при  $Q$  в диапазоне от 0.7 до 1.1 г/см<sup>2</sup> (суммарно ~ 52 %), то наиболее высокая вероятность сильного обледенения смещается в область более низких значений  $Q$  и наблюдается в диапазоне  $Q$  от 0.5 до 0.9 г/см<sup>2</sup> (суммарно ~ 58 %). Максимум случаев умеренного обледенения наблюдался при  $Q = 0.73$  г/см<sup>2</sup> (~ 2.2 %), а сильного — при  $Q = 0.58$  и 0.77 г/см<sup>2</sup> (по 5.1 % случаев).

На рис. 3 приведены усредненные профили температуры в нижнем километровом слое при обледенении и его отсутствии за период с 1 октября 2018 г. по 31 марта 2020 г. по данным метеорологического температурного профилимера МТР-5. Как видно из рис. 1, в большинстве случаев обледенение ВС в нижнем километровом слое в районе аэродрома Пулково наблюдалось при температуре в диапазоне  $-12...-0$  °С. Возможно также возникновение обледенения при слабopоложительных температурах [6].

### Заключение

В работе на основе сравнительного анализа данных радиометрических измерений параметров атмосферы в условиях обледенения и в его отсутствии, а также при умеренном и сильном обледенении рассмотрена вероятность возникновения обледенения ВС в районе аэродрома Пулково. Обледенение ВС в районе аэродрома Пулково в большинстве случаев наблюдается выше нижней кромки облаков. Значительное увеличение количества случаев обледенения ВС наблюдается при ВНГО в диапазоне от 200 до 400 м. За период с 1 октября 2018 г. по 31 марта 2020 г. 48 % случаев обледенения наблюдалось при ВНГО от 200 до 400 м, из них в 46 % случаях регистрировалось умеренное обледенение, а в 55 % — сильное. В целом для аэродрома Пулково характерно другое распределение обледенения по интенсивности: в 84 % случаев зарегистрировано умеренное обледенение и в 16 % — сильное.

Рассмотрена вероятность возникновения обледенения ВС в районе аэродрома Пулково в зависимости от общего влагосодержания  $Q$  по данным РВП за период с 1 октября 2018 г. по 31 марта 2020 г. Наибольшая вероятность обледенения наблюдается при  $Q$  в диапазоне от 0.7 до 1.1 г/см<sup>2</sup>: было зарегистрировано 52 % случаев при максимальном значении  $Q = 0.71$  г/см<sup>2</sup> (2.2 % случаев). При этом наибольшее количество случаев умеренного обледенения наблюдалось при  $Q$  от 0.7 до 1.1 г/см<sup>2</sup> — 52 %, а сильного обледенения — при  $Q$  от 0.5 до 0.9 г/см<sup>2</sup> — 58 %. Обледенение ВС в нижнем километровом слое в районе аэродрома Пулково в большинстве случаев наблюдалось при температуре от  $-12$  до 0 °С.

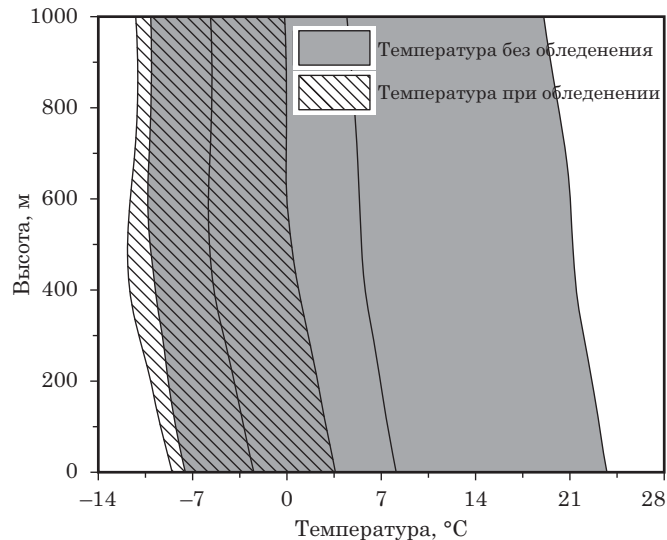


Рис. 3. Средние вертикальные профили температуры в нижнем километровом слое при обледенении и его отсутствии в районе аэродрома Пулково за период с 1 октября 2018 г. по 31 марта 2020 г. с СКО

### Источник финансирования

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-80051.

### Литература

1. Иванова А. Р. Обледенение двигателей самолетов в ледяных кристаллах: пути решения проблемы // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. Т. 368, № 2. С. 95–109.
2. Пенязь И. М. Анализ проблем по вопросу о необходимости повышения безопасности полетов в условиях обледенения // Проблемы безопасности полетов. 2018. № 11. С. 13–17.
3. Зуев В. В., Нахтигалова Д. П., Шелехов А. П. и др. Особенности обледенения воздушных судов в районе Международного аэропорта города Томска // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 12. С. 1080–1085.
4. Позднякова В. А. Практическая авиационная метеорология. Екатеринбург: Уральский УТИЦ ГА, 2015. 128 с.
5. Зуев В. В., Мордус Д. П., Павлинский А. В. Оценка успешности прогноза обледенения ВС на основе дистанционного способа радиометрирования атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 2019. Т. 32, № 4. С. 329–331.
6. Зуев В. В., Павлинский А. В., Мордус Д. П. и др. Результаты радиометрических измерений параметров атмосферы в районе аэропорта Пулково (Санкт-Петербург) // Труды ИПА РАН. 2020. Вып. 52. С. 3–8.
7. Иванова А. Р. Опыт верификации численных прогнозов влажности и оценка их пригодности для прогноза зон обледенения воздушных судов // Метеорология и гидрология. 2009. № 6. С. 33–46.
8. Приходько А. А., Алексеенко С. В. Обледенение аэродинамических поверхностей: условия возникновения и методика расчета // Авиационно-космическая техника и технология. 2012. Т. 93, № 6. С. 37–47.
9. Степаненко В. Д. Вероятность и интенсивность обледенения самолетов. СПб.: Изд. ГГО, 1994. 99 с.

10. Рыбалкина А. Л., Спирин А. С., Трусова Е. И. Уменьшение влияния неблагоприятных внешних условий в аэропортах местного значения // Научный Вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21, № 3. С. 101–114.
11. Богаткин О. Г. Авиационная метеорология. Учебник. СПб.: Изд. РГГМУ, 2005. 328 с.
12. Шакина Н. П., Скриптунова Е. Н., Иванова А. Р., Горлач И. А. О результатах испытания метода прогноза зон возможного обледенения воздушных судов // Информационный сборник № 37: Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов / под ред. Г. К. Веселовой. М.: ИГ-СОЦИН, 2010. 161 с.
13. Schultz P., Politovich M. K. Toward the improvement of aircraft-icing forecasts for the Continental United States // Weather Forecast. 1992. Vol. 7, no. 3. P. 491–500.
14. Thompson G., Bruintjes R. T., Brown B. G., Hage F. Intercomparison of in-flight icing algorithms. Part I: WISP94 realtime icing prediction and evaluation program // Weather Forecast. 1997. Vol. 12, no. 4. P. 878–889.
15. Зув В. В., Нахтигалова Д. П., Шелехов А. П. и др. Применение метеорологического температурного профилемера МТР-5РЕ в аэропорту для определения пространственных зон возможного обледенения воздушного судна // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 11. С. 1029–1034.
16. ООО «Институт радарной метеорологии» «КРАМС-4» для аэродромов [Электронный ресурс]. URL: [http://iram.ru/iram/all\\_main.php?js=1&list\\_par=21-0](http://iram.ru/iram/all_main.php?js=1&list_par=21-0) (дата обращения: 12.08.2020 г.).
17. Радиометр водяного пара. Институт прикладной астрономии РАН [Электронный ресурс]. URL: <http://iaaras.ru/quasar/wvr/> (дата обращения: 12.08.2020 г.).
18. Кадыгров Е. Н., Ганьшин Е. В., Миллер Е. А., Точилкина Т. А. Наземные микроволновые температурные профилемеры: потенциал и реальность // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28, № 6. С. 521–528.
19. Богаткин О. Г., Еникеева В. Д. Анализ и прогноз погоды для авиации. СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 272 с.
20. Иванова А. Р., Шакина Н. П. Перспективы развития наукастинга для метеорологического обеспечения авиации в рамках реализации глобального аэронавигационного плана (ГАНП) // Труды Гидрометцентра России. 2016. № 360. С. 113–134.