

Результаты радиометрических измерений параметров атмосферы в районе аэропорта Пулково (Санкт-Петербург, Россия)

© В. В. Зуев¹, А. В. Павлинский¹, Д. П. Мордус^{1,2}, Г. Н. Ильин³, В. Ю. Быков³, О. Е. Нечепуренко⁴

¹ИМКЭС СО РАН, г. Томск, Россия

²Западно-Сибирский филиал ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета», г. Новосибирск, Россия

³ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

⁴НИ ТГУ, г. Томск, Россия

Реферат

Обледенение воздушных судов в полете – метеорологическое явление, влияющее на безопасность и регулярность полетов. Крупноразмерные воздушные суда оборудованы эффективными противообледенительными системами, кроме этого, для них при необходимости применяется регламентная антиобледенительная обработка. Малоразмерные воздушные суда и беспилотные летательные аппараты не имеют никаких противообледенительных систем, при этом даже незначительное накопление льда на корпусе беспилотного летательного аппарата лишает его способности продолжать полет из-за низкой энерговооруженности. В связи с этим большое значение приобретает своевременное прогнозирование риска обледенения. Известные методики прогнозирования обледенения используют данные аэрологического зондирования, что подразумевает периодичность прогноза 12–24 ч. Столь долгосрочные прогнозы практически бесполезны для обеспечения работы малой авиации и беспилотных летательных аппаратов.

Альтернативным подходом является применение методов дистанционного зондирования для получения текущего прогноза обледенения воздушных судов. Исходными данными для прогноза в этом случае являются вертикальный профиль температуры воздуха и интегральное влагосодержание воздушного столба.

В работе рассматривается связь радиометрических данных и метеорологических параметров атмосферы в привязке к зарегистрированным случаям обледенения воздушных судов по данным метеослужбы аэропорта Пулково. Определены диапазоны интегрального влагосодержания и температуры воздуха, соответствующие различным состояниям атмосферы в периоды обледенения воздушного судна и при его отсутствии. Полученные результаты позволили сформулировать пороговые критерии прогноза обледенения для автоматизированной радиометрической методики прогнозирования. Показаны отличия критериев прогноза для прибрежной (г. Санкт-Петербург) и внутриконтинентальной (г. Томск) зон.

Ключевые слова: обледенение, интегральное влагосодержание, метеорологические параметры атмосферы, радиометрия.

Контакты для связи: Мордус Дарья Петровна (dariymordus@gmail.com).

Статья поступила в редакцию 17.02.2019, принята к публикации 13.04.2020, опубликована 12.05.2020.

Для цитирования: Зуев В. В., Павлинский А. В., Мордус Д. П., Ильин Г. Н., Быков В. Ю., Нечепуренко О. Е. Результаты радиометрических измерений параметров атмосферы в районе аэропорта Пулково (Санкт-Петербург) // Труды ИПА РАН. 2020. Вып. 52. С. 3–8.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.52.3-8>

Results of Radiometric Measurements of Atmospheric Parameters over Pulkovo Airport (St. Petersburg, Russia)

V. V. Zuev¹, A. V. Pavlinskii¹, D. P. Mordus^{1,2}, G. N. Ilin³, V. Yu. Bykov³, O. Eu. Nepochurenko⁴

¹Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Tomsk, Russia

²West Siberian Branch FSBI “Aviamettelecom Roshydromet”, Novosibirsk, Russia

³Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

⁴National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

Abstract

In-flight aircraft icing is a meteorological phenomenon that affects safety and regularity of flights. Large-sized aircraft are equipped with effective deicing systems. In addition, they may be subject to the routine anti-icing treatment, if necessary. Small-sized aircraft and unmanned aerial vehicles (UAV) do not have deicing systems, while even a slight accumulation of ice on UAV body deprives it of its ability to continue flying due to the low power available. In this regard, real-time forecasting (nowcasting) of the icing risk is of great importance. The methods available for icing prediction, use pilot balloon data, which usually implies a forecasting periods of 12 or 24 hours. Such long-term forecasts are virtually useless for the operation of small aircraft and UAVs.

An alternative approach is the use of remote sensing methods to obtain the real-time data on atmospheric conditions and a forecast of icing hazard. The initial data for the forecast in this case are the vertical profile of air temperature and the integral water content of the air column.

The paper considers the characteristics of radiometric data and meteorological parameters of the atmosphere in relation to the recorded cases of aircraft icing according to the data of Pulkovo Airport weather service. The ranges of integral moisture content and air temperature corresponding to various atmospheric conditions during aircraft icing periods and in its absence are determined. The results obtained made it possible to formulate threshold criteria for icing hazard warning system using an automated radiometric technique. The differences of forecast criteria for coastal (St. Petersburg) and intracontinental (Tomsk) zones are revealed and shown.

Keywords: aircraft icing, total vapor content, meteorological parameters of the atmosphere, radiometry.

Contacts: Daria Mordus (dariymordus@gmail.com).

Received February 17, 2019, accepted April 13, 2020, published May 12, 2020.

For citation: Zuev V. V., Pavlinskii A. V., Mordus D. P., Ilin G. N., Bykov V. Yu., Nechepurenko O. Eu. Results of radiometric measurements of atmospheric parameters over Pulkovo airport (St. Petersburg, Russia) // Transactions of IAA RAS. 2020. Vol. 52. P. 3–8.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.52.3-8>

Введение

Известно, что обледенение воздушных судов (ВС) происходит при отрицательной температуре поверхности ВС и наличии в воздухе переохлажденной воды в виде мелкодисперсных капель. Обледенению способствуют определенное сочетание комплекса гидрометеорологических параметров и явлений, и, как правило, этот процесс наблюдается в облаках и осадках, а наиболее интенсивно – в переохлажденных осадках и в облаках с крупными переохлажденными каплями.

Обледенение – одно из наиболее опасных метеорологических явлений для авиации, требующее детального изучения и контроля. Ввиду значительной внутрисуточной изменчивости гидрометеорологических параметров, например, при прохождении атмосферных фронтов, получение оперативной информации о зонах возможного обледенения ВС является весьма актуальной задачей.

Основные контактные исследования обледенения ВС были проведены в XX веке, когда по результатам многочисленных летных экспериментов была изучена вероятность обледенения ВС, а в дальнейшем разработаны методы фиксации (определения) и борьбы с обледенением ВС [1, 2] и основные методы прогноза. В настоящее время прогноз особых явлений в районе аэродрома (2 раза в сутки) основан на данных аэрологического зондирования [3], а по маршруту полета составляются прогностические карты особых явлений погоды (четыре раза в сутки) по результатам численного моделирования [4].

В настоящее время активно развиваются радиометрические методы получения информации о метеорологической обстановке над аэродромом, в том числе с высоким вертикальным разрешением [5], необходимым для прогнозов текущего состояния погоды (наукастинг). Так, в аэропорту Пулково (г. Санкт-Петербург) введена система наукастинга для определения видимости и высоты нижней границы облаков на основе измерений метеорологического температурного профиломера

МТР-5 [6]. В целях дальнейшего расширения методов дистанционного зондирования для прогноза обледенения ВС в районе аэропортов важно изучить особенности возникновения данного явления для каждой конкретной территории.

В работе проанализированы гидрометеорологические параметры и результаты радиометрических измерений в нижнем километровом слое атмосферы (НКСА) в периоды обледенения ВС в районе аэропорта Пулково.

Исходные данные

Основным материалом для исследований послужили данные Комплексной радиотехнической аэродромной метеорологической станции (КРАМС) [7] Международного аэропорта Пулково за 2012–2019 г. Они включают в себя данные бортовой погоды (сообщения экипажей об обледенении ВС, его высоте и интенсивности) и основные метеорологические параметры, измеряемые на аэродроме: высота нижней границы облаков, количество облачности в октантах, наличие таких атмосферных явлений, как осадки, туман, дымка и направление ветра. На основе данных бортовой погоды рассчитана средняя повторяемость обледенения ВС с учетом высоты.

Следует отметить, что информация об обледенении, полученная с бортов ВС, изначально является неполной по ряду причин: сообщения передаются метеослужбе аэропорта только по их запросу, при этом общее количество таких сообщений, и, следовательно, их статистическая репрезентативность зависит от регулярности полетов в рассмотренном аэропорту. Однако бортовая погода является единственным источником информации о фактических случаях обледенения ВС в полете. Международный аэропорт Пулково входит в пятерку крупнейших аэропортов России по пассажиропотоку, следовательно, и по количеству самолетовылетов, поэтому информацию о случаях об-

леденения ВС для аэропорта «Пулково» можно считать статистически значимой с учетом вышеприведенных особенностей.

В настоящей работе случаем обледенения считается первое сообщение с борта ВС о факте обледенения (по наблюдениям экипажа или по срабатыванию сигнализатора обледенения) в конкретном диапазоне высот. Повторные записи журнала АВ–6 (входит в базу КРАМС) о наличии обледенения на тех же высотах в последующие сроки наблюдений рассмотрены как тот же самый случай.

Для анализа также использованы вертикальные температурные профили, полученные с помощью метеорологического температурного профилера МТР–5 [8], и измерения общего влагосодержания в столбе атмосферы по данным радиометра водяного пара (РВП) [9] за период с ноября 2018 г. по ноябрь 2019 г. Рассмотрен нижний предел общего влагосодержания атмосферы по градациям условий: жидкие осадки, смешанные, снег, переохлажденный дождь, туман, без осадков. Также рассмотрено общее влагосодержание для дней без явлений с градациями по облачности: ясно, значительная (5–7 октантов) и сплошная (8 октантов) облачность.

Приборы МТР–5 и РВП расположены на площадке Института прикладной астрономии РАН на удалении 17 км от аэропорта Пулково.

Повторяемость обледенения воздушных судов в районе аэропорта Пулково

Согласно данным КРАМС в районе аэродрома Пулково отмечено значительное количество сообщений об обледенении ВС. За весь рассмотренный период поступило 1324 сообщения об обледенении на высотах от земли до 6000 м (табл. 1). Важный критерий для оценки опасности обледенения ВС в атмосфере – учет распределения средней повторяемости обледенения в зависимости от высоты.

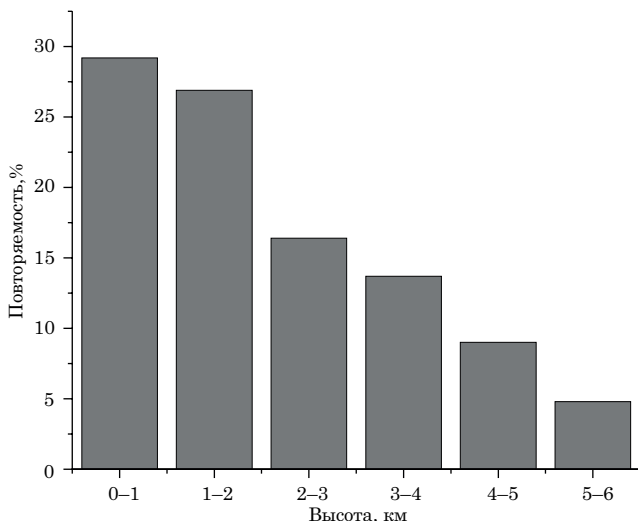


Рис. 1. Средняя повторяемость случаев обледенения ВС в разных высотных слоях в районе аэродрома Пулково

Таблица 1

Количество сообщений об обледенении ВС за период 2012–2019 гг.

Год	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2012–2019
Количество случаев обледенения	93	113	132	60	242	324	198	162	1324

Основное количество случаев обледенения (рис. 1) приходится на диапазон высот от поверхности земли до 2 км (56.1 % от всех случаев), а с увеличением высоты количество зарегистрированных случаев уменьшается. При этом максимальное количество случаев обледенения приходится на высотный интервал от поверхности земли до 1 км (29.2 %). Этот высотный интервал совпадает с рабочим диапазоном высот температурного профилера МТР–5, что позволяет эффективно использовать его для дистанционного радиометрического прогнозирования обледенения ВС.

Особенности метеоусловий в период формирования обледенения ВС

Температура воздуха

Температура воздуха является одним из основных факторов, определяющих вероятность обледенения ВС. Наибольшее количество случаев с обледенением зафиксировано в температурном диапазоне от 0 до -10 °C (рис. 2). При понижении температуры ниже -10 °C вероятность обледенения уменьшается, однако в районе аэродрома Пулково обледенение ВС наблюдалось и при температурах до -14 °C.

В исходных данных отмечены отдельные случаи обледенения при положительной температуре окружающего воздуха. Очевидно, что в таких условиях вероятность обледенения ВС непосред-

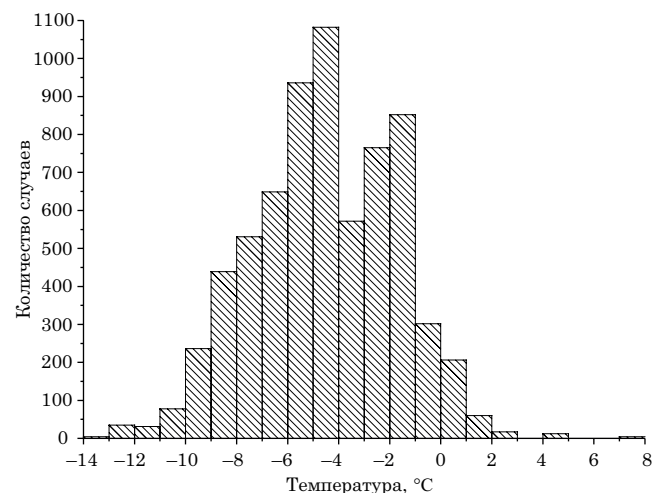


Рис. 2. Распределение температур на момент начала обледенения на высотах от 0 до 1 км в районе аэродрома Пулково

ственно в этом слое воздуха сводится к нулю. Но следует учитывать, что информация об обледенении основана на показаниях датчиков обледенения ВС или на визуальных наблюдениях экипажа, то есть на регистрации фактического наличия льда на поверхности ВС. Фиксируемая индикация обледенения в слое положительных температур объясняется сохранением на поверхности ВС слоя льда, образовавшегося в холодной воздушной массе при отрицательной температуре.

Важным фактором в определении атмосферных слоев, в которых возможно обледенение, является анализ распределения температуры с высотой. За период наблюдений (с октября 2018 г. по сентябрь 2019 г.) метеослужбой аэропорта Пулково зарегистрировано 153 случая обледенения в нижнем километровом слое, из них 7 случаев – при положительных температурах – исключены из дальнейшего анализа.

В табл. 2 представлена характеристика температурной стратификации в НКСА в периоды зарегистрированного обледенения ВС при наличии и отсутствии температурных инверсий. В районе аэродрома Пулково обледенение ВС происходило в 67.1 % случаев при инверсионном распределении температуры и в 32.9 % – при нормальном распределении. В условиях отрицательной температуры воздуха при наличии инверсии или слабом росте температуры обледенение фиксировалось в 71.4 % случаев.

Иная ситуация наблюдалась при нормальном распределении температуры с высотой, когда в большей части случаев (58.3 %) обледенение ВС наблюдалось при наличии нулевой изотермы, а при отрицательных температурах воздуха в НКСА – в 41.7 % случаев с обледенением.

На основе информации о влиянии температурной стратификации НКСА на количество случаев обледенения ВС (табл. 2) можно сказать, что обледенение ВС в НКСА регистрировалось в инверсионной или устойчивой атмосфере без инверсий. Такое распределение температуры, как правило, сопряжено с развитием слоистой облачности нижнего яруса, которая в большинстве случаев располагается под слоем инверсии или вклинивается в нее, а также связана с фронтальной облачностью [10]. Это подтверждается фактическими данными по облачности в районе аэродрома Пулково. Так, обледенение ВС преимущественно наблюдалось выше нижней кромки облаков и в нескольких случаях ниже высоты нижней границы облаков в осадках, при сплошной и значительной облачности нижнего яруса.

Влагосодержание атмосферы

Общее влагосодержание характеризуется значительным разбросом значений, однако прослеживается определенная закономерность в распределении его минимальных значений для раз-

Таблица 2

Температурная стратификация НКСА в периоды зарегистрированного обледенения ВС

	Общее кол-во случаев	Стратификация ПСА	Кол-во случаев	Разброс градиента температуры (°C /100 м)	Средний градиент температуры (°C /100 м)
Наличие инверсий или слабый рост температуры	98 (67.1 %)	Наличие нулевой изотермы	21 (21.4 %)	-0.24...+0.48	0.21
		Наличие двух нулевых изотерм	7 (7.2 %)		
		Отрицательная температура от 0 до 1000 м	70 (71.4 %)		
Отсутствие инверсий или слабое падение температуры	48 (32.9 %)	Наличие нулевой изотермы	28 (58.3 %)	0.19...0.87	0.59
		Отрицательная температура от 0 до 1000 м	20 (41.7 %)		

Таблица 3

Минимальные значения общего влагосодержания атмосферы по градациям явлений для аэродрома Пулково

Атмосферные явления	Q_{\min} , г/см ²	Q_{\min} в периоды обледенения ВС, г/см ²
Без явлений	0.15	0.31
Снег (сухой)	0.15	0.35
Туман, дымка	0.23	0.34
Смешанные осадки	0.45	0.82
Переохлажденный дождь	0.55	0.55
Дождь	0.55	0.90

ных погодных явлений. В табл. 3 представлены минимальные значения общего влагосодержания (Q_{\min}) при наличии и отсутствии атмосферных явлений за каждый получасовой срок наблюдений и отдельно для сроков с наблюдавшимся фактическим обледенением ВС в НКСА. Серым цветом выделены явления, при которых наличие обледенения наиболее вероятно.

Распределение общего влагосодержания атмосферы имеет определенный характер, в зависимости от атмосферных явлений: без явлений при значительной облачности и в ясную погоду. В районе аэродрома Пулково минимальные значения общего влагосодержания, равные 0.15 г/см^2 , отмечены в сроки с отсутствием атмосферных явлений (в ясную погоду или при сплошной облачности), а также при значительной облачности и отрицательных температурах.

При сухом снеге, который выпадает при отрицательной температуре воздуха под облаком до самой земной поверхности [11] и состоит из сложных ледяных кристаллов, минимум общего влагосодержания составил 0.15 г/см^2 , как и при отсутствии атмосферных явлений, а в случаях обледенения ВС нижний предел $Q_{\min} = 0.35 \text{ г/см}^2$. В случае выпадения жидких осадков (дождь или смешанные осадки), когда нижняя часть облака или подоблачный слой имеет температуру выше нуля или близкую к нулю, общее влагосодержание увеличивается до 0.55 и 0.45 г/см^2 соответственно. При наличии инверсий с положительными или отрицательными, но близкими к нулю, температурами регистрировался переохлажденный дождь, для которого нижний предел общего влагосодержания составил 0.55 г/см^2 ; при наличии и отсутствии обледенения. При выпадении жидких осадков при наличии обледенения ВС нижний предел общего влагосодержания во время дождя увеличился до 0.9 г/см^2 , а во время смешанных осадков – до 0.82 г/см^2 .

Условия образования тумана или дымки, которые представляют собой плотное или разреженное скопление продуктов конденсации (капель и кристаллов разных размеров), взвешенных в воздухе непосредственно над поверхностью земли [11], не отличаются от условий для слоистой облачности. Минимум общего влагосодержания при тумане и дымке составил 0.23 г/см^2 , а при наличии обледенения достигал 0.34 г/см^2 .

Заключение

Результаты проведенных экспериментальных измерений и анализ метеоданных в районе аэропорта Пулково позволили установить уровни метеорологических параметров, при которых вероятно обледенение ВС.

Температурный диапазон, при котором обледенение ВС наблюдается наиболее часто, составляет от -14 до $0 \text{ }^\circ\text{C}$, при этом наличие инверсии в нижнем километровом слое атмосферы повышает вероятность обледенения. Минимальный уровень влагосодержания во время обледенения ВС в переохлажденных осадках, наличие которых является характерным показателем возможности обледенения ВС, равен 0.55 г/см^2 . Это значение, полученное в прибрежной зоне Финского залива, отличается от минимального уровня влагосодержания, определенного для внутриконтинентальной зоны (в районе аэропорта г. Томска), составляющего 0.4 г/см^2 [5].

Появление современных средств и методов дистанционного зондирования предоставляет исследователям новые возможности для оперативного контроля таких важных гидрометеорологических параметров атмосферы, как вертикальный профиль температуры и интегральное влагосодержание. Эти данные, получаемые в реальном времени с периодом 5–10 мин, важны для диагноза текущего состояния погоды, включая риск возможного обледенения ВС на самых сложных и опасных этапах полёта, а именно на взлете и при посадке. Методика прогнозирования, базирующаяся на оперативных наблюдениях автономных приборов, таких как температурный профиломер и радиометр водяного пара, не задействует субъективные данные, не требует участия человека и может являться основой для разработки и внедрения автоматических систем предупреждения об опасных явлениях.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-05-80051.

Литература

1. Степаненко В. Д. Вероятность и интенсивность обледенения самолетов. СПб.: ГГО, 1994. 99 с.
2. Трунов О. К. Обледенение самолетов и средства борьбы с ними. М.: Машиностроение, 1965. 247 с.
3. Абрамович К. Г., Васильев А. А. Руководство по прогнозированию метеорологических условий для авиации. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 301 с.
4. Иванова А. Р., Шакина Н. П. Перспективы развития наукастинга для обеспечения авиации в рамках реализации глобального аэронавигационного плана (ГАНП) // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2016. № 360. С. 113–134.
5. Способ дистанционного определения условий обледенения воздушных судов на основе радиометрии реального времени: пат. 2664972. Россия, МПК, G01W 1/02, G01W 1/08, G01W 1/10, G01W 1/11, G01W 1/17, G01K 13/00, G01N 25/60, B64D 15/20 / Зуев В. В., Шелехов А. П., Павлинский А. В., Шелехова Е. А., Поплевина О. Н., Ильин Г. Н., Стэмповский В. Г., Быков В. Ю., Шишкин А. М.; патентообладатель АО «ИПА», ИМКЭС СО РАН. № 2017133362; заявл. 25.09.17, опубл. 24.08.18. бюл. № 24.
6. ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» Северо-Западный филиал [Электронный ресурс]. URL: <http://szf.aviamettelecom.ru/?p=2364> (дата обращения: 05.02.2020).

7. ООО «Институт радарной метеорологии» «КРАМС-4» для аэродромов [Электронный ресурс]. URL: http://iram.ru/iram/all_main.php?js=1&list_par=21-0 (дата обращения: 26.01.2020).

8. *Кадыгров Е. Н., Ганьшин Е. В., Миллер Е. А. и др.* Наземные микроволновые температурные профилемеры: потенциал и реальность // *Оптика атмосферы и океана*. 2015. Т. 28, № 6. С. 521–528.

9. Институт прикладной астрономии Российской академии наук [Электронный ресурс]. URL: <http://iaaras.ru/quasar/wvr/> (дата обращения: 10.02.2020).

10. *Физика облаков* / под ред. А. Х. Хргиан. Л.: Гидрометеоздат, 1961. 458 с.

11. *Хромов С. П.* Метеорология и климатология для географических факультетов. Л.: Гидрометеоздат, 1968. 491 с.