

Результаты дистанционного мониторинга атмосферы методами радиометрии в условиях обледенения воздушного судна

© А. П. Шелехов¹, Е. А. Шелехова¹, Г. Н. Ильин², В. Ю. Быков²,
В. Г. Стэмповский², А. М. Шишкин²

¹ИМКЭС СО РАН, г. Томск, Россия

²ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

В работе представлены результаты анализа дистанционных радиометрических измерений параметров атмосферы в Геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН (Томск) в интервалы, совпадающие по времени с явлениями обледенения воздушного судна (ВС), фиксируемыми аэродромной службой. Наблюдения проводились в осенне-зимний период наиболее вероятного проявления обледенения ВС с 28.10.2016 по 28.02.2017.

Показано, что величину интегрального влагосодержания атмосферы, регистрируемую наземными радиометрическими средствами в реальном времени, возможно использовать в качестве предиктора явления обледенения ВС в облаках, наряду с профилем температуры. Сформулирован количественный критерий возникновения условий, приводящих к обледенению ВС, и способ определения таких условий методом наземного дистанционного радиометрического зондирования атмосферы в реальном времени.

Ключевые слова: обледенение, атмосфера, дистанционное зондирование, влагосодержание.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.50.87-96>

Введение

При высокой влажности и отрицательной температуре атмосферные водяной пар и вода находятся в переохлажденном метастабильном состоянии и создают условия, приводящие к опасному для авиации явлению обледенения ВС.

Основы современного подхода к диагностике и прогнозу обледенения ВС опубликованы в работе [1], где предложено использовать высотные профили температуры $T(h)$ и относительной влажности $R_{\text{д}}(h)$ для определения состояния атмосферы, при котором возможно появление данного опасного явления. Другими характеристиками состояния атмосферы, которые улучшают результаты диагностики и прогноза обледенения ВС, принято считать параметры вертикальной термодинамической структуры облака [2, 3] и вертикальную скорость ветра [4]. Несмотря на тот факт, что знание температуры и влажности недостаточно для описания состояния атмосферы в период обледенения

ВС, профили $T(h)$ и $R_n(h)$ являются основными величинами для диагностики и прогноза, а алгоритмы обледенения, созданные на их основе (известные как T–RH-алгоритмы), используются в исследованиях или на практике.

Комплексный подход к диагностике обледенения, получивший название Current Icing Product (CIP), применяется с 2002 г. в Национальной метеорологической службе и Федеральной авиационной администрации США. Методика CIP предполагает использование данных наблюдений, результатов прогноза параметров метеорологических полей с применением современных численных моделей, включая результаты прогноза $T(h)$ и $R_n(h)$ и сообщения пилотов об обледенении ВС [5].

В настоящее время одним из основных подходов в области диагностики и прогноза обледенения ВС является использование данных спутникового зондирования и численных моделей, учитывающих в том числе размер водных капель в облаке [6–11]. Другим подходом в данной области стало использование техники дистанционного зондирования атмосферы, которая включает в себя радары, лазерный измеритель высоты облачности и многоканальный СВЧ-радиометр, а также радиометр, который обеспечивает получение информации о профилях $T(h)$ и $R_n(h)$ [12, 13]. Также для диагностики и прогноза обледенения ВС используется лидар в комплексе с СВЧ-радаром и радиозондом [14]. В рамках выполнения проекта по прогнозированию погоды в Канаде [15] разработана система составления оперативного, на 2–6 ч, прогноза текущей погоды (наукастинг, nowcasting) для крупных аэропортов, которая также предполагает использование многоканального СВЧ-радиометра для определения температуры и влажности [16].

Альтернативой многоканальному радиометру [16] может служить метеорологический температурный профилемер МТР-5РЕ, который позволяет измерять профиль температуры $T(h)$ с высоким пространственно-временным разрешением [17]. В работах [18, 19] для прогноза пространственных зон возможного обледенения воздушных судов в Международном аэропорту Томска использовались данные профилемера МТР-5РЕ, формула Годске и метод, предложенный в работе [1]. Восстановление профиля влажности осуществлялось на основе аналитической экстраполяции приземных измерений влажности с учетом данных о высоте облачности. Показано, что формула Годске и метод, представленный в [1], дают схожие результаты по расположению пространственных зон возможного обледенения. Однако результат, полученный по методу, предложенному в работе [1], более близок к фактическим данным об обледенении, которые поступали с бортов ВС.

Кроме относительной влажности и точки росы влажность воздуха можно характеризовать интегральным содержанием водяного пара (ИВС) в вертикальном столбе единичной площади — Q (кг/м²) — так называемым влаго-содержанием атмосферы, а также водосодержанием атмосферы — удельным количеством конденсированной воды в облаках, W (кг/м²). Мониторинг указанных параметров атмосферы возможно осуществлять в реальном времени с помощью наземной двухчастотной радиометрической системы [20, 21].

Целью настоящей работы является исследование суточных вариаций профиля температуры $T(h)$ и ИВС, полученных на основе радиометрических измерений в интервалы обледенения ВС, регистрируемые аэродромной службой.

Данное исследование позволило найти диапазон изменения значений ИВС, при которых возможно обледенение ВС, и тем самым обосновать использование ИВС в качестве предиктора опасного явления.

В представленной работе исследование общего влагосодержания атмосферы охватывает период, который соответствует климатической зиме в Томской области. Измерение общего влагосодержания атмосферы осуществлялось с помощью двухчастотной радиометрической системы РМС-1 [20, 21], а профиль температуры измерялся метеорологическим температурным профилемером МТР-5РЕ [17]. Приземные значения метеопараметров фиксировались универсальной метеостанцией Vaisala WXT-520. Сведения о наличии фактического обледенения ВС и высоте нижней границы облачности получены из данных Аэродромной метеорологической информационно-измерительной системы (АМИС-РФ) Международного аэропорта Томска.

В первой части статьи дана общая характеристика проведенного в Геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН комплексного эксперимента по измерению общего влагосодержания, высотных профилей температуры и приземных значений метеопараметров. Во второй и третьей частях представлены результаты диагностики суточных вариаций приземных метеопараметров, высоты нижней границы облачности (ВНГО), ИВС, водосодержания и высотного профиля температуры, полученных в период 05.01.2017–06.01.2017. В четвертой части приведен статистический анализ влагосодержания атмосферы в периоды, когда наблюдалось обледенение ВС по данным АМИС-РФ аэропорта Томска. Сформулированы научные основы способа дистанционного прогноза обледенения ВС с использованием радиометрических средств дистанционного зондирования атмосферы в реальном времени.

Общая характеристика проведенных работ

Комплексные наблюдения, ориентированные на решение поставленной задачи, проводились с 28.10.2016 по 28.02.2017 на базе Геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН, где размещались радиометрические и метеорологические приборы. Результаты радиометрических измерений влажности и метеопараметры фиксировались с интервалом 1 мин, температурных высотных профилей – с интервалом 10 мин.

Радиометрическая система РМС-1 представляет собой двухканальный СВЧ-радиометр, определяющий радиояркостную температуру (РЯТ) излучения атмосферы. По измеренным значениям РЯТ рассчитывалось влагосодержание и водосодержание атмосферы [20]. Метеорологический температурный профилемер МТР-5РЕ, работающий на частоте $f = 56.7$ ГГц, служит для определения вертикального профиля температуры в диапазоне высот 0–1000 м с пространственным разрешением 10–50 м в зависимости от высоты [17]. Таким образом, методы радиометрии позволяют с высоким пространственно-временным разрешением определять пространственные зоны с отрицательной температурой и динамику ИВС в режиме реального времени.

Расстояние между Геофизической обсерваторией ИМКЭС СО РАН и Международным аэропортом Томска составляет ~10 км. Относительная близость аэропорта к обсерватории дала возможность авторам сопоставлять

данные АМИС-РФ об обледенении ВС и о высоте нижней границы облачности в районе аэропорта с результатами радиометрических наблюдений в обсерватории. В процессе работы были получены непрерывные ряды значений общего влагосодержания, общего водосодержания, профилей температуры, высоты нижней границы облачности, приземных значений относительной влажности и температуры, точки росы и давления.

Суточные вариации метеопараметров

Рассмотрим вариации приземных значений метеопараметров и высоты нижней границы облачности на интервале 05.01.2017–06.01.2017. Указанный интервал интересен тем, что в эти дни, согласно данным АМИС-РФ, в период с 00:00 05.01.2017 по 00:49 06.01.2017 (здесь и далее время UTC) в районе аэропорта было зарегистрировано сильное обледенение воздушных судов в облаках.

На рис. 1а представлены результаты измерений вариаций метеопараметров в Геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН. Из рис. 1а видно, что в рассматриваемый интервал времени выделяются три периода: первый период с 00:00 до 22:00 05.01.2017 — оттепель, второй период с 22:00 05.01.2017 по 00:49 06.01.2017 соответствует началу похолодания, третий с 00:49 по 24:00 06.01.2017 — времени сильного похолодания. В первый и второй периоды по данным АМИС-РФ в аэропорту фиксировалось сильное обледенение ВС в облаках, а в третий период данное опасное явление не регистрировалось.

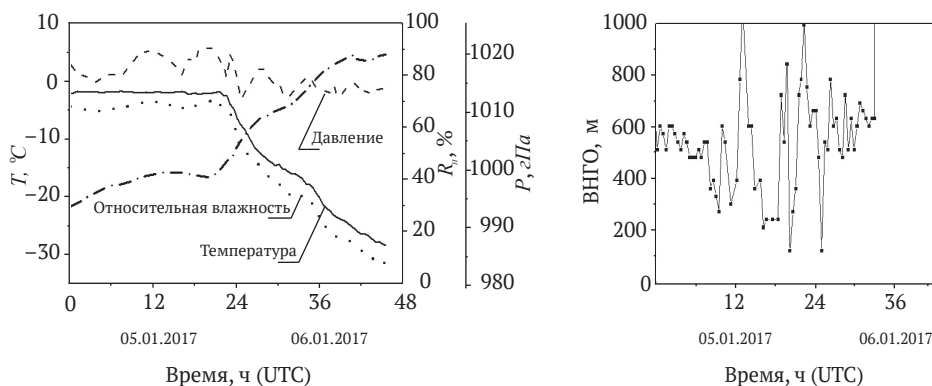


Рис. 1. а — метеопараметры: температура — сплошная линия, относительная влажность — прерывистая, давление — пунктир; б — ВНГО в период с 05.01.2017 по 06.01.2017

В период оттепели приземная температура колебалась в пределах от -2°C до -3°C . С 22:00 05.01.2017 началось похолодание, с 00:49 06.01.2017 тенденция к понижению температуры продолжилась до конца дня 06.01.2017, и температура опустилась ниже -28°C . Приземное значение относительной влажности воздуха в течение двух дней колебалось в пределах 70–80 %, дефицит точки росы (разность между температурой и точкой росы воздуха) составил от -2°C до -4°C . В период оттепели атмосферное давление медленно росло, а затем при сильном похолодании произошел скачок с 1000 гПа до 1020 гПа.

На рис. 1б представлены результаты измерений вариаций ВНГО, которая измерялась в аэропорту. Значения ВНГО колебались в пределах 90–1140 м в период с 00:00 05.01.2017 по 13:00 06.01.2017, затем ВНГО резко увеличилась и существенным образом превысила 1000 м.

Результаты измерений общего влагосодержания и высотного профиля температуры

На рис. 2а показаны результаты измерений общего влагосодержания тропосферы в зените по данным РМС-1 на интервале с 05.01.2017 по 06.01.2017. Из рисунка видно, что в течение рассматриваемого периода времени, когда проводились измерения, поведение ИВС характеризовалось значительной изменчивостью. С течением времени в целом ИВС имело тенденцию к уменьшению с 12 кг/м^2 до значений менее 4 кг/м^2 . Время, при котором ИВС стало меньше 4 кг/м^2 , наступило в 01:55 06.01.2017 и отстает на величину ~ 1 ч от начала сильного похолодания.

Кроме ИВС в эксперименте измерялось интегральное водосодержание W , результаты измерений показаны на рис. 2б. Из рисунка следует, что на протяжении первых и вторых суток, когда по данным АМИС-РФ в аэропорту фиксировалось сильное обледенение ВС в облаках, регистрировалось наличие конденсированной воды. Водосодержание облаков, оцениваемое с помощью РМС-1, принимало различные значения и в пике имело порядок $\sim 0.6 \text{ кг/м}^2$. В период сильного похолодания, т. е. с момента 00:49 06.01.2017 и до окончания суток, РМС-1 фактически фиксировала низкое содержание конденсированной воды в атмосфере $\leq 0.1 \text{ кг/м}^2$.

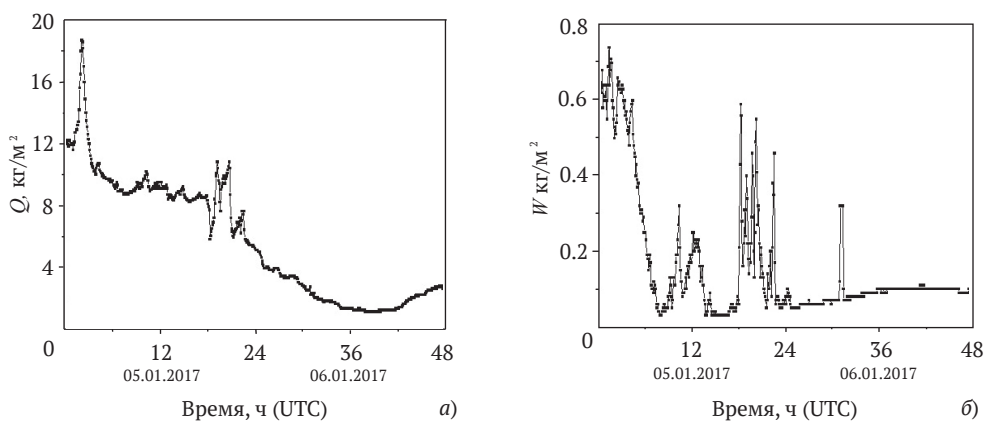


Рис. 2. Результаты измерений: а — общего влагосодержания Q ; б — общего водосодержания W в период с 05.01.2017 по 06.01.2017

На рис. 3 представлены вариации высотного профиля температуры, измеренного МТР-5РЕ на интервале с 05.01.2017 по 06.01.2017, сплошными линиями отмечены высоты с постоянной температурой. Внизу приведена цветовая температурная шкала с градацией 3°C .

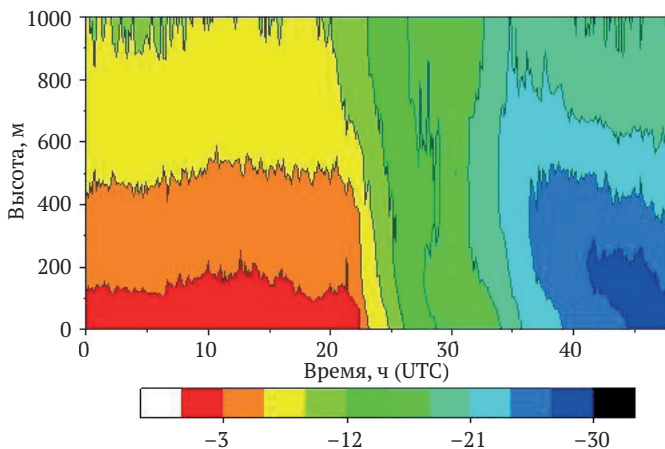


Рис. 3. Высотные профили температуры в период с 05.01.2017 по 06.01.2017

Из рис. 3 следует, что в течение рассматриваемого интервала времени температура в километровом слое атмосферы также характеризовалась значительной высотной и внутрисуточной изменчивостью.

В периоды, соответствующие обледенению ВС, вариации температуры находились в диапазоне значений $-16^{\circ}\text{C} \leq T(h) \leq 0^{\circ}\text{C}$. Указанный интервал температур считается одним из основных метеорологических условий возникновения обледенения ВС [1, 3]. В начале сильного похолодания значения температуры удовлетворяют указанному условию возникновения обледенения, а затем оно перестает выполняться.

На основании анализа результатов измерений можно сделать вывод, что на интервале обледенения ВС, фиксированного АМИС-РФ, в период оттепели и начала похолодания в приземном слое наблюдалась относительно высокая влажность воздуха ($\sim 80\%$), высокие значения интегрального водосодержания (до $\sim 0.6 \text{ кг/м}^2$). Во время обледенения температура удовлетворяла метеорологическим условиям возникновения обледенения ВС: $-16^{\circ}\text{C} \leq T(h) \leq 0^{\circ}\text{C}$. В период сильного похолодания значения приземной относительной влажности и влагосодержания снизились, влагосодержание в атмосфере понизилось до минимальных значений — ниже порога чувствительности РМС-1, а температура упала ниже -16°C .

Статистический анализ общего влагосодержания

Рассмотрим статистику ИВС на полном интервале наблюдений: с 28.10.2016 по 28.02.2017 в периоды, когда авиационная метеорологическая служба аэропорта фиксировала обледенение ВС. Метеорологической службой аэропорта за рассматриваемый период времени отмечен 21 день, когда наблюдалось обледенение ВС. Наибольшее число таких событий зафиксировано в ноябре 2016 г. — 11, общей продолжительностью 172 ч, в декабре 2016 г. — 5, в январе, феврале 2017 г. — 3 и 2 раза соответственно, продолжительностью 117 ч. В течение времени, когда фиксировалось обледенение ВС, получено более 17000 измерений текущих значений ИВС, осредненных на интервале 1 мин.

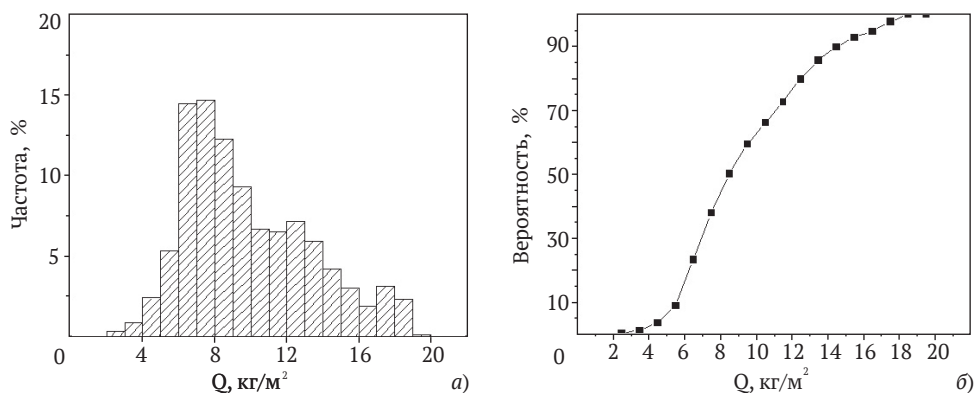


Рис. 4. Гистограмма общего влагосодержания (а) и функция распределения вероятностей (б) для периодов обледенения ВС

На рис. 4 приведены частотная гистограмма, отражающая процент отмеченных службой обледенений ВС в зависимости от влагосодержания, и соответствующая функция распределения вероятностей на интервалах обледенения ВС.

Из рис. 4а видно, что в рассматриваемый период времени значения ИВС варьировались в широком пределе: от 2 кг/м² до 20 кг/м². Гистограмма ИВС в периоды обледенения ВС одномодальна и асимметрична со смещением максимума в сторону меньших значений ИВС. Максимальное значение гистограммы соответствует интервалу значений Q: 7.5–8 кг/м². Распределение вероятностей (рис. 4б) показывает, что появление условий, приводящих к обледенению ВС, резко возрастает при Q ≥ 4 кг/м². При относительно низком содержании водяного пара (Q ≤ 4 кг/м²) вероятность обледенения ВС близка к нулю.

На основании проведенного статистического анализа данных радиометрического зондирования можно сформулировать количественный критерий возникновения в атмосфере условий, приводящих к обледенению ВС:

$$\begin{aligned} Q &\geq 4 \text{ кг/м}^2, \\ -16^\circ\text{C} &\leq T(h) \leq 0^\circ\text{C}. \end{aligned} \quad (1)$$

Условия (1) являются научными основами нового способа дистанционного определения условий обледенения ВС с использованием радиометрии реального времени.

Прогноз пространственных зон возможного обледенения воздушных судов

Хорошо известно, что обледенение ВС наиболее вероятно наблюдается в облаках и в подоблачном слое. Анализ данных АМИС-РФ за период с 28.10.2016 г. по 28.02.2017 г., показывает, что обледенение ВС происходит в основном в облаках. Таким образом, количественный критерий (1) необходимо дополнить информацией о ВНГО, что существенным образом улучшит качество прогноза обледенения ВС.

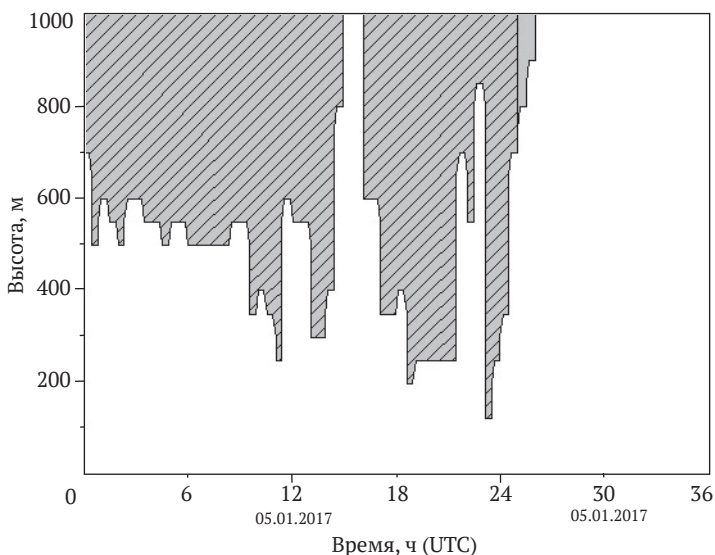


Рис. 5. Пространственные зоны обледенения ВС для периода с 00:00 05.01.2017 г. по 12:00 06.01.2017 г., вычисленные согласно условию (1) с учетом ВНГО

На рис. 5 показаны пространственные зоны обледенения воздушных судов по данным АМИС-РФ (заштриховано) за период с 00:00 05.01.2017 г. по 12:00 06.01.2017 г. Зоны возможного обледенения ВС изображены серым цветом, только в них выполняются условия (1). Белый цвет соответствует зонам, в которых не должно быть обледенения ВС.

Заключение

В работе исследованы суточные вариации профиля температуры, ИВС и метеопараметров, полученные с помощью радиометрической аппаратуры в Геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН. Исследование проводилось в период, который соответствует климатической зиме в Томской области, в интервалы обледенения ВС. На основании проведенных экспериментальных исследований показано, что величину ИВС можно предложить использовать в качестве предиктора обледенения ВС. Сформулирован количественный критерий (1) возникновения в облаках условий, приводящих к обледенению ВС. Данный критерий может служить альтернативой T-RH-алгоритму [1] при диагностике и прогнозе опасного явления.

Результаты прогноза обледенения ВС, рассчитанного по критерию (1), находятся в полном согласии с фактическими данными АМИС-РФ, полученными с бортов самолетов.

Предложенный способ можно использовать для диагностики и прогноза обледенения ВС совместно с данными о термодинамической структуре облака, вертикальной скорости ветра и о каплях больших размеров (диаметром > 50 мкм).

Литература

1. *Schultz P., Politovich M. K.* Toward the improvement of aircraft-icing forecasts for the continental United States // *Weather and Forecasting*. — 1992. — Vol. 7. — P. 491–500.
2. *Forbes G. S., Hu Y., Brown B. G., Bernstein B. C., Politovich M. K.* Examination of soundings in the proximity of pilot reports of aircraft icing during STORM-FEST // *AMS fifth conf. on aviation weather systems*. — 1993. — P. 282–286.
3. *Thompson G., Brientjes R. T., Brown B. G., Hage F.* Intercomparison of in-flight icing algorithms. Part 1: WISP94 real-time icing prediction and evaluation program // *Weather and Forecasting*. — 1997. — Vol. 12. — P. 878–889.
4. *Carriere J., Alquier S., LeBot C., Moulin E.* Some results of a statistical evaluation of forecast icing risk algorithms // 7th Conference on aviation, range and aerospace meteorology. — 1997. — P. 106–111.
5. *Bernstein B. C., McDonough F., Politovich M. K., Brown B. G.* Current icing potential: algorithm description and comparison with aircraft observations // *Journ. of Appl. Meteor.* — 2005. — Vol. 44. — P. 969–986.
6. *Forbes R. M., Ahlgrimm M.* On the representation of high-latitude boundary layer mixed-phase cloud in the ECMWF global model // *Monthly Weather Review*. — 2014. — P. 3425–3445.
7. *Belo-Pereira M.* Comparison of in-flight aircraft icing algorithms based on ECMWF forecasts // *Meteorol. Appl.* — 2015. — Vol. 22. — P. 705–715.
8. *Thompson G., Politovich M. K., Rasmussen R. M. A.* Numerical weather model's ability to predict characteristics of aircraft icing environments // *Weather and Forecasting*. — 2017. — Vol. 32. — P. 207–221.
9. *Kalinka F., Roloff K., Tendel J., Hauf T.* The in-flight icing warning system ADWICE for European airspace — Current structure, recent improvements and verification results // *Meteorologische Zeitschrift*. — 2017. — Vol. 26, no. 4. — P. 441–455.
10. *Bowyer K. L., Gill P. G.* Objective verification of global in-flight icing forecasts using satellite observations: Verification of WAFS icing forecasts using satellite observations // *Meteorol. Appl.* — 2019. — P. 1–10.
11. *Morcrette C., Brown K., Bowyer R., Gill F., Suri D.* Development and evaluation of in-flight icing index forecast for aviation // *Weather and Forecasting*. — 2019. — Vol. 34. — P. 731–750.
12. *Serke D. J., Politovich M. K., Reehorst A. L., Gaydos A.* Use of X-band radars to support the detection of in-flight icing hazards // *Journal of Applied Remote Sensing*. — 2009. — Vol. 3, no. 1. — 13 p.
13. *Serke D. J., Reehorst A. L., Politovich M. K.* Supercooled large drop detection with NASA's Icing Remote Sensing System // *Proc. SPIE*. — 2010. — Vol. 7827. doi: 10.1117/12.863176.
14. *Wang J. H., Ge J. X., Zhang Q. L., Fan P., Wei M., Li X.* Study of aircraft icing warning algorithm based on millimeter wave radar // *Journal of Meteorological Research*. — Springer: 2017. — Vol. 31, no. 6. — P. 1034–1044.
15. *Isaac G. A., Bailey M., Boudala F. S., Burrows W. R., Cober S. G., Crawford R. W., Donaldson N., Gultepe I., Hansen B., Heckman I., Huang L. X., Ling A., Mailhot J., Milbrandt J. A., Reida J., Fournierc M.* The Canadian Airport Nowcasting System (CAN-Now) // *Meteor. Appl.* — 2014. — Vol. 21. — P. 30–49.
16. *Ware R., Carpenter R., Guldner J., Liljegren J., Nehr Korn T., Solheim F., Vandenberghe F.* A multichannel radiometric profiler of temperature, humidity, and cloud liquid // *Radio Science*. — 2003. — Vol. 38. — P. 8079.
17. *Troitsky A. V., Gajkovich K. P., Gromov V. D., Kadygrov E. N., Kosov A. S.* Thermal sounding of the atmospheric boundary layer in the oxygen absorption band center at 60 GHz // *IEEE Trans. On Geosci. Remote Sens.* — 1993. — Vol. 31. — P. 116–120.
18. *Zuev V. V., Nakhtigalova D. P., Shelekhov A. P., Shelekhova E. A., Baranov N. A., Kizh-*

ner L. I. Remote sensing of potential aircraft icing areas // Proc. SPIE. — 2015. — Vol. 9680. 96806Q. doi: 10.1117/12.2205762.

19. Zuev V. V., Nakhtigalova D. P., Shelekhov A. P., Shelekhova E. A., Baranov N. A., Kizhner L. I. Application of MTP-5PE meteorological temperature profiler in an airport for determining spatial zones of possible aircraft Icing // Atmospheric and Oceanic Optics. — 2016. Vol. 29, no. 2. — P. 186–190.

20. Ilyin G. N., Troitsky A. V. Determining the tropospheric delay of a radio signal by the radiometric method // Radiophysics and Quantum Electronics. — 2017. — Vol. 60, no. 4. — P. 291–299.

21. АО «Институт прикладной астрономии». Радиометрическая метеосистема для исследования характеристик тропосферы. [Электронный ресурс] URL: <http://aoiraspb.com/projects/rms/> (дата обращения: 09.08.2019.).

Remote Monitoring of the Atmosphere Using Radiometric Methods to Predict the Aircraft Icing: current results

**A. P. Shelekhov, E. A. Shelekhova, G. N. Ilin, V. Yu. Bykov,
V. G. Stempkovskiy, A. M. Shishikin**

This paper presents the conclusions we made having analysed the remote radiometric measurements of atmosphere parameters from the Geophysical Observatory of the IMCES SB RAS, Tomsk. We only considered those time intervals where the icing phenomena of the aircraft had been recorded by the local aerodrome service. The observations were carried out when it was most likely that the aircraft icing could be manifested (the autumn and winter period: from 10.28.2016 to 02.28.2017).

It is shown that the values of the integral water vapor content of the atmosphere which are recorded in real time by the ground-based radiometric system can be used to predict such a phenomenon as the aircraft icing in the clouds. The same conclusion can be made concerning the temperature profile. Both parameters have been accounted to formulate a quantitative criterion for the occurrence of the conditions which cause the aircraft icing.

Thus, we have suggested a method to determine the icing conditions in real time from the ground-based remote radiometric sounding of the atmosphere.

Keywords: aircraft icing, atmosphere, remote sensing, remote sounding, water vapor content, radiometric system.