

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 551.509.32

Применение метеорологического температурного профилемера МТР-5РЕ в аэропорту для определения пространственных зон возможного обледенения воздушного судна

В.В. Зуев^{1,2}, Д.П. Нахтигалова^{1,3}, А.П. Шелехов¹, Е.А. Шелехова¹,
А.В. Павлинский¹, Н.А. Баранов⁴, Л.И. Кижнер^{2*}

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3

²Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

³Западно-Сибирский филиал «Авиаметтелекома Росгидромета»
630099, г. Новосибирск, ул. Депутатская, 1

⁴Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН
119333, г. Москва, ул. Вавилова, 40

Поступила в редакцию 4.09.2015 г.

Представлены результаты применения метеорологического температурного профилемера МТР-5РЕ для определения пространственных зон возможного обледенения воздушного судна в аэропорту г. Томска на 17.03.2013 г. При определении пространственных зон использовались RAR-алгоритм, формула Годске, а также данные АМИС-РФ для восстановления профиля влажности. Показано, что RAR-алгоритм и формула Годске дают схожие результаты по расположению пространственных зон возможного обледенения воздушного судна. Однако результат, полученный по RAR-алгоритму, более близок к фактическим данным об обледенении, которые поступали с бортов воздушных судов.

Ключевые слова: обледенение, профиль, температура, относительная влажность, температура точки росы; icing, profile, temperature, relative humidity, dew point temperature.

Введение

Обледенение воздушного судна относится к числу опасных явлений погоды. Оно нарушает аэродинамические свойства воздушного судна, работу приборов и двигателей, связь, ухудшает видимость, вызывает изменение конструкции летательных аппаратов. Обледенение может нарушать обтекание крыла самолета, что приводит к преждевременному срыву потока и даже к катастрофе. В большинстве самолетов имеются антиобледенительные устройства, и в аэропортах предусмотрено применение противообледенительных средств. Но борьба с этим явлением затратна, отнимает значительные материальные и людские ресурсы, поэтому регулярные наблюдения, контроль обледенения и его прогнозирование

совершенно необходимы для обеспечения безопасности полета.

В настоящее время на аэродромах РФ мониторинг метеорологических условий, которые способствуют обледенению, осуществляется 2 раза в сутки методами радиозондирования, а также периодически данные об обледенении поступают с бортов самолетов, на которых установлены контактные датчики. Данная периодичность получения информации недостаточна для объективного контроля над изменением метеорологической ситуации в силу высокой внутрисуточной изменчивости температурных полей в атмосфере.

В настоящее время повысить периодичность получения информации можно двумя способами. Первый способ заключается в использовании современных метеорологических моделей прогноза для определения зон возможного обледенения воздушных судов [1], второй способ — в применении техники дистанционного зондирования, которая позволяет контролировать термическую структуру нижнего километрового слоя атмосферы и оценивать ее временную динамику с высоким пространственно-временным разрешением.

* Владимир Владимирович Зуев (vvzuev@imces.ru); Дарья Павловна Нахтигалова (amila@sibmail.com); Александр Петрович Шелехов (ash@imces.ru); Евгения Александровна Шелехова (sea1125@mail.ru); Алексей Валерьевич Павлинский (wf@inbox.ru); Николай Алексеевич Баранов (baranov@ccas.ru); Любовь Ильинична Кижнер (kdm@mail.tsu.ru).

Пространственные зоны возможного обледенения воздушного судна нами определялись на основе измерения динамики температурного поля с помощью техники дистанционного зондирования, а именно метеорологического температурного профилера МТР-5РЕ (версия расширенного температурного диапазона и высокого разрешения) [2–4]. Данные измерений были получены в ходе экспедиционных работ в аэропорту г. Томска в период 2012–2013 гг. [5]. Профиль влажности, который также необходим для определения пространственных зон, восстанавливался с использованием данных аэродромной метеорологической системы АМИС-РФ.

В первом разделе статьи изложены методы прогноза обледенения с использованием RAP-алгоритма [6] и формулы Годске [7], а также представлены основные выражения для восстановления профилей относительной влажности и температуры точки росы. Во втором разделе содержится анализ синоптических и метеорологических условий в аэропорту г. Томска на 17.03.2013 г. В третьем разделе представлены результаты расчета пространственных зон возможного обледенения воздушного судна в аэропорту г. Томска на рассматриваемый день. Даты и время соответствуют Всемирному координированному времени (UTC). Основные выводы изложены в заключении.

1. Методы прогноза обледенения

С точки зрения метеорологических условий обледенение возможно при выполнении определенных условий, которые накладываются на диапазон температуры и влажности воздушной массы [6, 7]. На практике наиболее часто используются методы прогноза обледенения, известные как RAP-алгоритм и формула Годске.

1.1. RAP-алгоритм

В [6] показано, что повторяемость обледенения самолетов в зонах, где одновременно выполняются следующие неравенства, на порядок выше, чем вне этих зон:

$$-16\text{ °C} \leq T(z) \leq 0\text{ °C}, \quad (1)$$

$$R_H(z) \geq 63\%, \quad (2)$$

где $T(z)$ и $R_H(z)$ — температура и относительная влажность на высоте z .

1.2. Формула Годске

В случае формулы Годске [7] пространственные зоны возможного обледенения воздушных судов определяются следующим образом:

$$T(z) \leq -8 \cdot (T(z) - T_d(z)), \quad (3)$$

где $T_d(z)$ — температура точки росы на высоте z . Величина $-8 \cdot (T(z) - T_d(z))$ есть температура насыщения по отношению ко льду. Формула Годске повсе-

местно используется для прогноза обледенения в аэропортах РФ, в том числе и в аэропорту г. Томска.

1.3. Восстановление профиля влажности

Из неравенств (1)–(3) видно, что пространственные зоны возможного обледенения воздушного судна определяются поведением профилей температуры и влажности. Профиль температуры измерялся с помощью метеорологического температурного профилера МТР-5РЕ. Профиль относительной влажности $R_H(z)$ восстанавливается с использованием данных аэродромной метеорологической системы АМИС-РФ о нижней границе облачности H и приземных значениях относительной влажности $R_{H,0}$:

$$R_H(z) = \begin{cases} R_{H,0} + \frac{100 - R_{H,0}}{H} z, & z \leq H, \\ 100, & \text{в облаках.} \end{cases} \quad (4)$$

Восстановление профиля температуры точки росы осуществляется на основе измеренных значений профиля температуры $T(z)$ и результатов восстановления профиля относительной влажности $R_H(z)$ по (4):

$$T_d(z) = \frac{B_1 \left[\ln \left(\frac{R_H(z)}{100} \right) + \frac{A_1 T(z)}{B_1 + T(z)} \right]}{A_1 - \ln \left(\frac{R_H(z)}{100} \right) - \frac{A_1 T(z)}{B_1 + T(z)}}, \quad (5)$$

где коэффициенты $A_1 = 17,625$ и $B_1 = 243,04\text{ °C}$ [8].

2. Анализ синоптических и метеорологических условий

На рис. 1 представлен приземный анализ погоды для 00:00 UTC 17.03.2013 г. Юг Томской области и аэропорт г. Томска были расположены в ложбине циклона, центр которого находился на европейской территории России (условное обозначение на карте циклона — Н, антициклона — В). Видно, что аэропорт г. Томска оказался между двумя теплыми фронтами (Арктической и Полярной системы фронтов), которые были выражены в конвективной облачности и соответственно в осадках ливневого характера. Приземные значения температуры воздуха в зоне теплого фронта Арктической системы составляли перед фронтом порядка $-9,9\text{ °C}$ (на схеме значение температуры находится в верхнем левом углу) и за фронтом, в теплом секторе циклона, поднимались до значений $-2,9\text{ °C}$. Данная обстановка говорит о неустойчивой атмосфере в районе аэропорта г. Томска.

На рис. 2 показан анализ абсолютной топографии на изобарической высоте 700 гПа для 00:00 UTC, 17.03.2013 г. Видно, что воздушная масса, которая обуславливала погоду на юге Томской области, по своим свойствам была влажной и относительно теплой, дефицит точки росы составлял порядка 0 °C , температура воздуха не опускалась ниже -12 °C .

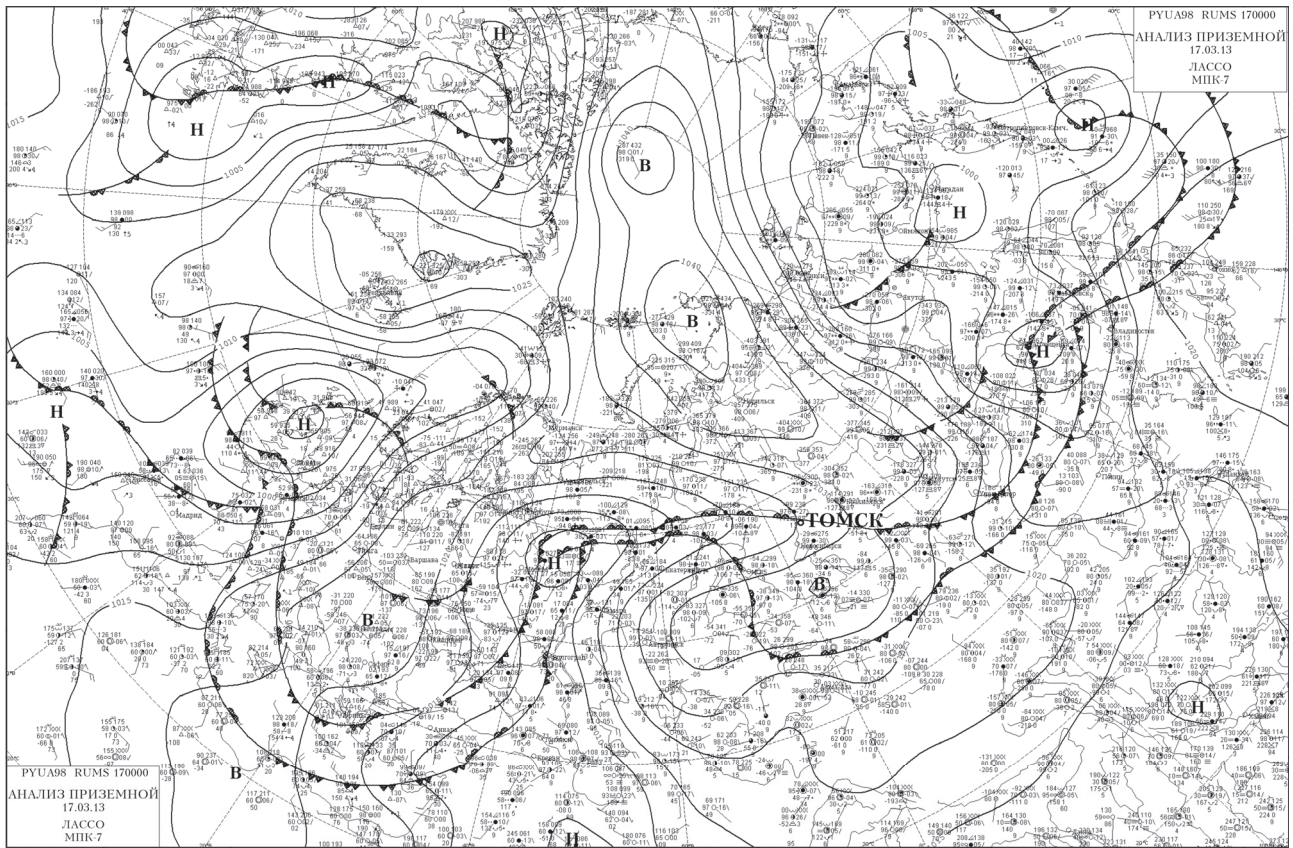


Рис. 1. Приземный анализ погоды, 00:00 UTC, 17.03.2013 г.

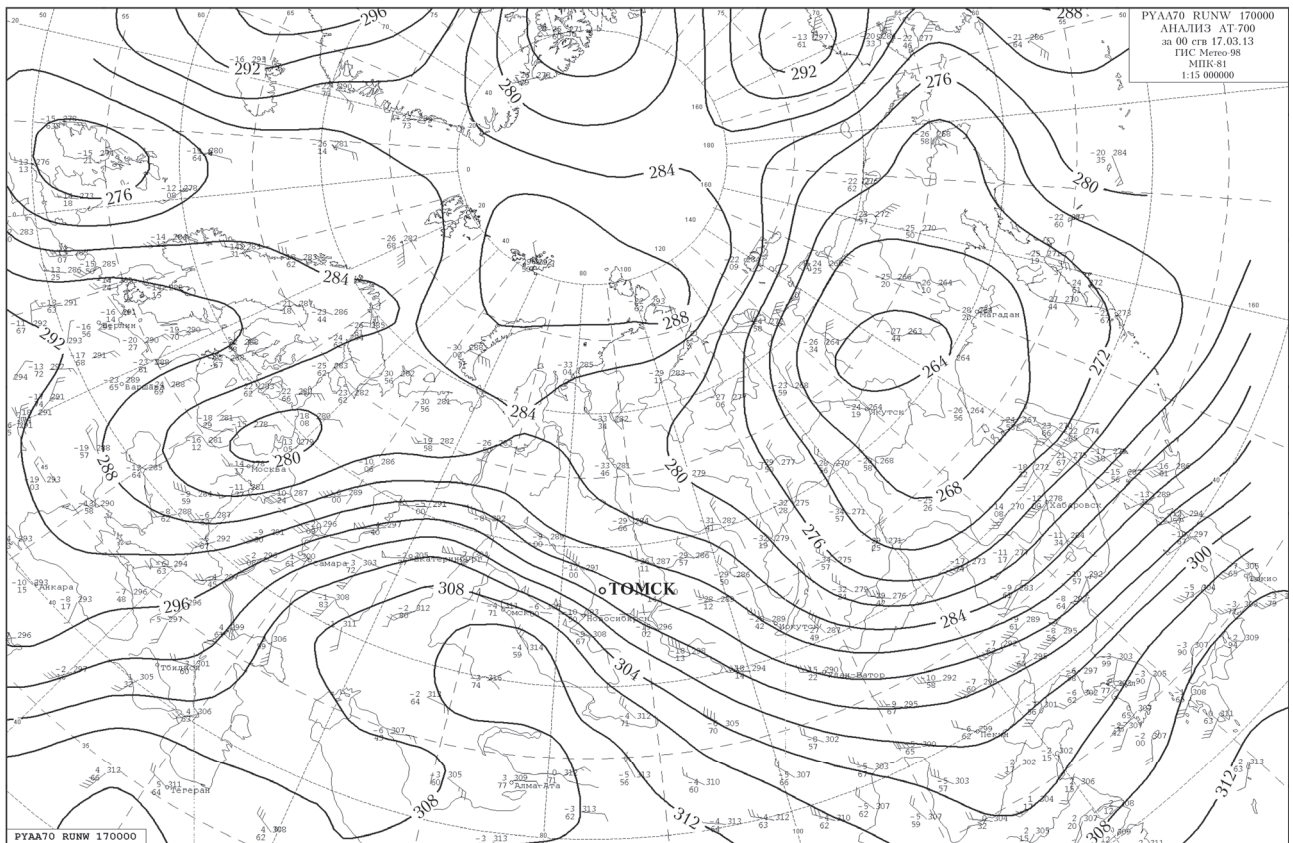


Рис. 2. Анализ абсолютной топографии на изобарической высоте 700 гПа, 00:00 UTC, 17.03.2013 г.

Полное описание схем и условных обозначений на рис. 1 и 2 представлено в Наставлении по службе прогнозов [9].

На рис. 3, *а* изображены приземные значения температуры (сплошная кривая), относительной влажности (пунктирная) воздуха, температура точки росы (штриховая). Приземные значения температуры воздуха на уровне 2 м в районе г. Томска изменялись от -2 до -6 °С, минимальные значения фиксировались в утренние часы (22:00–01:00 UTC) и максимальные в дневное и вечернее время (8:00–22:00 UTC). Дефицит точки росы в течение дня не превышал 2 °С, относительная влажность изменялась от 80 до 100%.

Суточные вариации высоты нижней кромки облачности по данным АМИС-РФ представлены на рис. 3, *б*. Видно, что высота нижней кромки облачности в течение суток не поднималась выше 650 м, а в некоторых случаях фиксировалась и на высоте 70–80 м.

Дневные вариации профиля температуры 17.03.2013 г. показаны на рис. 3, *в*. В течение суток, когда проводились измерения термической структу-

ры нижнего километрового слоя атмосферы в аэропорту г. Томска с помощью профилера МТР-5РЕ, температура в этом слое характеризовалась значительной высотной и внутрисуточной изменчивостью. В вечернее и ночное время изменение температуры в слое от земли до 1000 м соответствовало нормальному вертикальному градиенту. В утренние часы, начиная с высоты 500 м, наблюдался рост температуры воздуха. Минимальные значения температуры фиксировались на высотах 400–500 м с 00:00 до 02:00, а максимальные — в ночное время на высотах от земли до 100 м и составляли примерно -2 °С.

На основании проведенного анализа синоптических и метеорологических условий можно сделать вывод, что ситуация, которая наблюдалась в атмосфере 17.03.2013 г., способствовала обледенению воздушных судов. Согласно данным, поступавшим с бортов самолетов, умеренное обледенение отмечалось в этот день в периоды с 00:00 по 02:30 UTC в облаках, с 08:15 по 10:00 UTC в облаках на высотах от 700 до 2000 м и с 11:06 по 13:00 UTC в облаках и осадках на высотах от 0 до 2400 м.

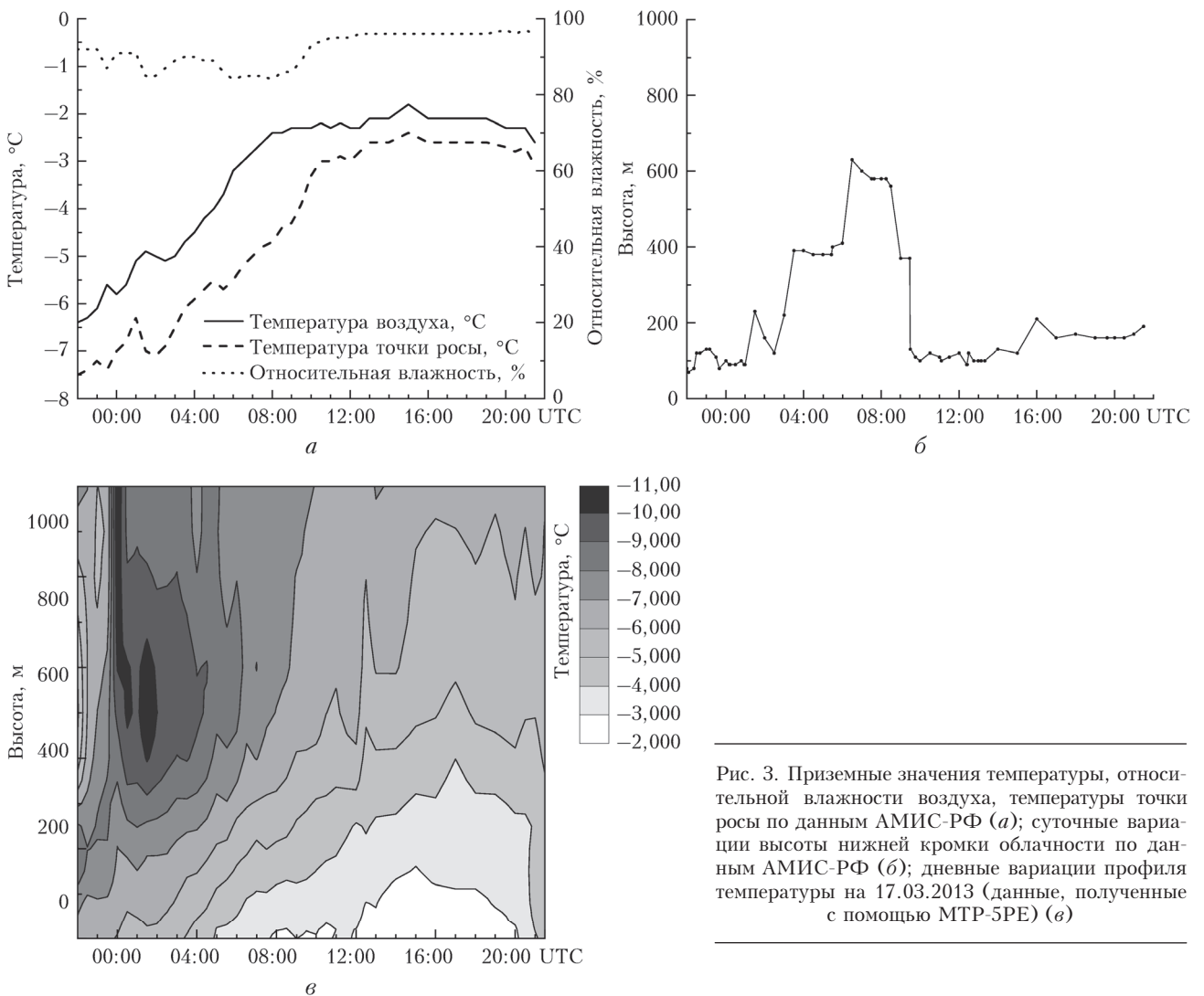


Рис. 3. Приземные значения температуры, относительной влажности воздуха, температуры точки росы по данным АМИС-РФ (*а*); суточные вариации высоты нижней кромки облачности по данным АМИС-РФ (*б*); дневные вариации профиля температуры на 17.03.2013 (данные, полученные с помощью МТР-5РЕ) (*в*)

3. Результаты расчета пространственных зон возможного обледенения

На рис. 4 показаны результаты расчета пространственных зон возможного обледенения воздушного судна для аэропорта г. Томска на 17.03.2013 г. с использованием RAP-алгоритма и формулы Годске соответственно. Светло-серым, серым и черным цветом показаны пространственные зоны возможного обледенения воздушного судна, белым цветом — зоны, где метеорологические условия не способствуют обледенению. Светло-серый цвет соответствует пространственным зонам возможного обледенения воздушного судна в облаках, черный — в ливневом снеге, серым цветом показаны зоны, где выполняются условия для возникновения обледенения в отсутствие облаков и осадков. Штрихом обозначены про-

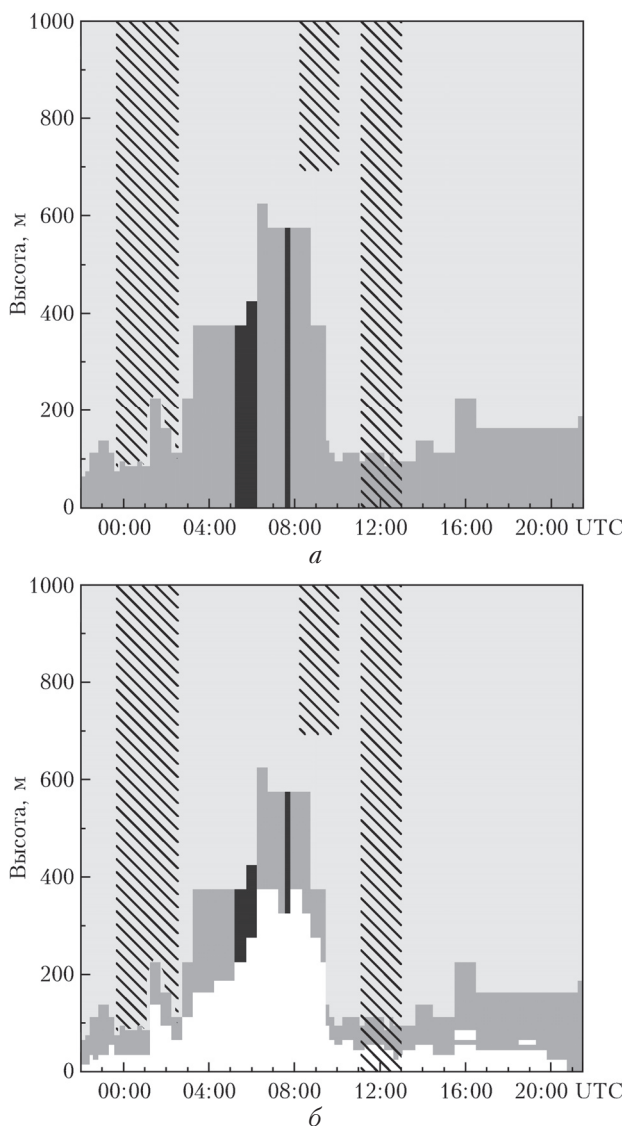


Рис. 4. Пространственные зоны возможного обледенения воздушного судна в аэропорту г. Томска на 17.03.2013 г.: а — RAP-алгоритм; б — формула Годске

странственные зоны фактического обледенения, информация о которых поступала с бортов самолетов в течение рассмотренного периода времени.

Анализ представленных на рис. 4 данных показывает, что RAP-алгоритм и формула Годске дают схожие результаты по расположению пространственных зон возможного обледенения воздушного судна. Однако результат, полученный по RAP-алгоритму, более близок к фактическим данным об обледенении, информация о котором поступала с бортов воздушных судов.

Заключение

Проведены исследования пространственных зон возможного обледенения воздушного судна в аэропорту г. Томска 17.03.2013 г., рассчитанных по RAP-алгоритму и формуле Годске. Анализ синоптических и метеорологических условий показал, что состояние атмосферы в этот день соответствовало возникновению обледенения воздушных судов, а по данным, которые поступали с бортов самолетов, наблюдалось умеренное обледенение.

Пространственные зоны определялись путем измерения динамики температурного поля с помощью техники дистанционного зондирования, а именно метеорологического температурного профилера МТР-5РЕ. Профиль влажности восстанавливался с использованием данных аэродромной метеорологической системы АМИС-РФ. Показано, что RAP-алгоритм и формула Годске дают схожие результаты по расположению пространственных зон возможного обледенения воздушного судна. Однако результат, полученный на основе RAP-алгоритма, более близок к фактическим данным об обледенении, информация о котором поступала с бортов воздушных судов.

Известно [2–4], что профилимер МТР-5РЕ позволяет измерять профиль температуры до высоты 1000 м с пространственным разрешением 10, 25 и 50 м и с периодичностью 5 мин. Разрешение по времени на аэродроме по регламенту производится через 30 мин, однако в зависимости от изменения погодных условий и запросов службы движения аэропорта возможны учащенные метеорологические наблюдения. Таким образом, использование метеорологического температурного профилера МТР-5РЕ совместно с данными аэродромной метеорологической системы АМИС-РФ позволяет осуществлять мониторинг метеорологических условий, которые могут привести к обледенению, с высоким пространственно-временным разрешением.

1. Иванова А.Р. Опыт верификации численных прогнозов влажности и оценка их пригодности для прогноза зон обледенения воздушных судов // Метеорол. и гидрол. 2009. № 6. С. 33–46.
2. Westwater E.R., Han Y., Irisov V.G., Leuskiy V., Kadygrov E.N., Viazankin A.S. Remote sensing of boundary layer temperature profiles by a scanning 5-mm microwave radiometer and RASS: Comparison experiments // J. Atmos. Ocean. Technol. 1999. V. 16, iss. 7. P. 805–818.
3. Kadygrov E.N., Pick D.R. The potential for temperature retrieval from an angular-scanning single-channel

- microwave radiometer and some comparisons with *in situ* observations // Meteorol. Appl. 1998. V. 5, N 4. P. 393–404.
4. Кадыгров Е.Н., Ганьшин Е.В., Миллер Е.А., Точилкина Т.А. Наземные микроволновые температурные профиломеры: потенциал и реальность // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 6. С. 521–528.
 5. Зуев В.В., Шелехов А.П., Шелехова Е.А., Старченко А.В., Барт А.А., Богословский Н.Н., Проханов С.А., Кижнер Л.И. Измерительно-вычислительный комплекс для мониторинга и прогноза метеорологической ситуации в аэропорту // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 8. С. 695–700.
 6. Thompson G., Bruintjes R.T., Brown B.G., Hage F. Inter-comparison of in-flight icing algorithms. Part 1: WISP94 real-time icing prediction and evaluation program // Weather Forecast. 1997. V. 12. P. 848–889.
 7. Баранов А.М., Солонин С.В. Авиационная метеорология. Изд. 2-е. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 384 с.
 8. Lawrence M.G. The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air: A simple conversion and applications // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2005. V. 86, iss. 2. P. 225–233.
 9. Наставление по службе прогнозов: раздел 2: служба метеорологических прогнозов: часть 1 и 2: составление и оформление анализа карт погоды, аэрологических диаграмм, вертикальных разрезов, радиолокационных карт и представление информации с метеорологических искусственных спутников земли. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 150 с.

V.V. Zuev, D.P. Nakhtigalova, A.P. Shelekhov, E.A. Shelekhova, A.V. Pavlinsky, N.A. Baranov, L.I. Kizhner. **The application of meteorological temperature profiler MTP-5PE at the airport for determining spatial zones of the potential aircraft icing.**

The results of using the MTP-5PE meteorological temperature profiler for determining the spatial zones of potential aircraft icing in Tomsk airport on March 17, 2013, are presented. To determine the spatial zones the RAP-algorithm, the Godske method, and the AMIS-RF data to retrieve humidity profile were used. It is shown that the RAP-algorithm and the Godske method gave similar results on location of spatial zones of potential aircraft icing. However, the results obtained from the RAP-algorithm are closer to the actual icing reports received from the aircraft crews.