

МЕТЕОРОЛОГИЯ, КЛИМАТОЛОГИЯ

УДК 551.574.7; 551.501.86

ДЕТЕРМИНИРОВАНИЕ ЗОН ОБЛЕДЕНЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ НА ЮГО-ВОСТОКЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

М.А. Волкова¹, И.В. Кужевская¹, Н.К. Барашкова¹, О.Е. Нечепуренко^{1,2},
К.Н. Пустовалов^{1,2}, В.В. Чурсин¹



¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

²Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

Представлены характеристики обледенения воздушных судов, по данным бортовой погоды, в районе аэродрома Томск. Были использованы каналы 0,8; 3,9; 11,03 мкм спектрорадиометров MODIS, профили температуры и удельной влажности радиометров ATOVS. Применение спутниковой информации в комплексе с расчетными методами обнаружения зоны обледенения позволило создать карты-схемы в двух-, трехмерном представлении самого слоя обледенения и интенсивности явления. Совместный анализ материалов подтвердил успешную идентификацию зон обледенения по данным спутникового зондирования температуры и влажности.

Ключевые слова: обледенение воздушных судов, бортовая погода, спутниковое зондирование, микрофизика облаков

Введение

Совершенствование транспортной системы Томской области, создание регулярных сообщений внутри региона невозможны без ускоренного развития воздушного транспорта, в том числе малой авиации. Данное обстоятельство предполагает предоставление аэронавигационным службам качественной и детальной информации о метеорологических условиях, в том числе опасных для авиации явлений и их прогноза. Глобальный аэронавигационный план ИКАО (International Civil Aviation Organization – ICAO), сформулированный на период до 2028 г. [Global Air Navigation Plan..., 2013], предусматривает в будущем полную автоматизацию обеспечения метеорологической информацией в любой точке на любой высоте в каждый момент времени. Для этого предполагается усовершенствование сверхкраткосрочного прогнозирования и наукастинга, использование численного прогноза, дистанционных измерений (радаров и спутников), данных частой сети наземных станций, самолетных измерений и передачи метеорологической информации с бортов [Bernstein, 2005; Шакина, Иванова, 2016; Kalinka et al., 2017].

Одним из наиболее опасных явлений для авиации является отложение льда на поверхности воздушного судна (ВС) во время полета. При обледенении фиксируются потеря подъемной силы, снижение скорости полета и, в некоторых случаях, полного контроля над ВС. Все это может привести к авиационным происшествиям, в том числе с человеческими жертвами [Авиационные происшествия..., 2020].

Изучению обледенения всегда уделялось повышенное внимание как в России, так и за рубежом [Schultz, Politovich, 1992; Vivekanandan et al., 1999; Smith et al., 2002; Шакина, Иванова, 2016]. Климатические и погодные условия юга Западной Сибири, а именно наблюдаемые сочетания температуры и влажности воздуха, облачности и переохлажденных осадков, способствуют высокой вероятности возникновения обледенения в пограничном слое атмосферы.

В этой связи изучение особенностей обледенения воздушных судов и разработка методов их диагноза и прогноза являются актуальной задачей для обеспечения безопасного взлета и посадки на аэродромах Томской области. В рамках решения этой задачи в Томском государственном университете разработан и апробирован алгоритм прогноза обледенения с заблаговременностью до 36 ч на основе данных гидродинамического моделирования [Sitnikov et al., 2015; Volkova et al., 2016]. Для реализации алгоритма использовалась мезомасштабная метеорологическая модель TSU-NM3 [Старченко и др., 2019].

Кроме того, для территории Томского аэропорта предложен дистанционный метод мониторинга и прогноза обледенения ВС с использованием данных измерений метеорологического температурного профилемера МТР-5РЕ, универсальной метеостанции Vaisala WXT520 и АМИС-РФ [Зуев и др., 2015] с высоким пространственно-временным разрешением, которое невозможно достигнуть методами радиозондирования. В настоящей работе акцент сделан на использовании доступной спутниковой информации для обнаружения обледенения, подробном анализе метеорологических условий, синоптических

процессов. Исследовательская работа в подобном ключе проводится для данной территории впервые.

С целью увеличения успешности использования представленных разработок и дальнейшего развития методических основ диагноза и прогноза обледенения в настоящей статье продемонстрированы возможности привлечения спутниковой информации для обнаружения фактических и потенциальных зон обледенения в районе международного аэропорта Томск (Богашёво). Аэродром относится к зоне ответственности Новосибирского укрупненного центра Единой системы организации воздушного движения [Инструкция..., 2018], а над его районом проходят воздушные трассы всех типов (международные, региональные, внутренние).

Материал и методы исследования

Для диагноза и прогноза обледенения воздушных судов с начала 1990-х гг. используется информация с геостационарных и полярно-орбитальных метеорологических спутников, особенно активно в США и Европе. Экспертные системы по обледенению, такие как ADWICE (DLR, Deutscher Wetterdienst и IMuK) [Kalinka et al., 2017], SIGMA (Meteo France) [Le Bot, 2003] и CIP/FIP (NCAR) [Bernstein, et al., 2005] адаптированы к региону, для которого они применяются. Система CIP/FIP (США) построена на двух перекрестных геостационарных спутниках GOES, которые предоставляют информацию с частотой 5–30 мин. Разработка аналогичных продуктов для диагностики и прогноза обледенения с использованием спутниковых данных ведется и для территории РФ [Волкова и др., 2015; Чукин и др., 2015].

Для европейской территории России разработан и внедрен специализированный программный комплекс (SCP), который в автоматическом режиме круглогодично попиксельно классифицирует данные SEVIRI/Meteosat-10 и AVHRR/NOAA для извлечения характеристик облачности, осадков и погодных условий над поверхностью земли, воды и снега/льда. SCP определяет тип осадков на поверхности земли (13 классов) и опасные явления погоды (гроза, град и обледенение (вероятность/интенсивность)), температуру и высоту верхней границы облаков, мгновенную максимальную интенсивность осадков (I_{\max} , мм/ч) и др.

Для территории Западной Сибири в настоящее время оперативные гидрометеорологические данные поступают с геостационарного спутника «Электро-Л» № 3, выведенного на орбиту в декабре 2019 г.; мониторинг ведется в трех каналах видимого диапазона и одном тепловом. Информации, необходимой для диагностики влагосодержания и, в частности, выделения переохлажденной воды, пока в выходной продукции не представлено. Поэтому в данной статье использовалась доступная над исследуемой террито-

рией информация с полярно-орбитальных спутников. В работе продукты MOD021KM и ATML2 использованы для диагноза текущих условий, благоприятных для обледенения. Для этого применен принцип синтеза изображения для анализа микрофизики по методике Европейского космического агентства. На основе данных ATOVS были восстановлены температурно-влажностные профили.

Материалом исследования послужили данные бортовой погоды (PIREPs) в районе аэродрома Томск (в радиусе 150–200 км) за период с 2011 по 2018 г. и сводки кода METAR о фактической погоде на аэродроме. Для оценки пространственно-временной структуры зон обледенения с использованием спутникового зондирования привлекались данные спектральных каналов 0,8; 3,9 и 11,03 мкм (водяной пар в атмосфере и температура земной поверхности и облаков) спектрорадиометров MODIS (продукт MOD021KM) и продукт второго уровня ATML2, который содержит наборы комбинаций спектральных каналов, отражающих значения ключевых параметров облачности, в частности, интегральное содержание воды (CWP) в облаке. Работа со спутниковыми изображениями проводилась с использованием программного обеспечения VISAT (<https://earth.esa.int/web/sentinel/-/beam>) на платформе BEAM.

Для трехмерной пространственной оценки обледенения использовались профили температуры и удельной влажности радиометров ATOVS, обработанные с помощью авторских алгоритмов, реализованных в MATLAB для отдельно выбранных случаев. Из 42 возможных уровней вдоль профиля зондирования в исследовании использованы 10 нижних уровней от поверхности земли до высоты 500 гПа в узлах сетки с разрешением $1,25 \times 1,25^\circ$. Согласно данным [Щукин и др., 2013], точность восстановления метеорологических данных радиометра ATOVS составляет: для удельной влажности 1 г/кг, температуры воздуха 1 °С. Подобная точность соответствует требованиям Всемирной метеорологической организации к спутниковому зондированию [Руководство..., 2018] и сопоставима с погрешностью измерений метеопараметров аэрологических радиозондами, а значит, подходит для использования при составлении физико-статистических прогнозов.

Результаты и обсуждение

За период 2011–2018 гг., по данным бортовой погоды, было зафиксировано 315 дней/392 случая с обледенением. Наибольшее число случаев наблюдалось с октября по декабрь – в среднем по 6–7 дней в месяц (8–9 случаев), с максимальным количеством в декабре 2015 г. (14 дней/17 случаев). Чаще всего отмечалось обледенение умеренной (52 %) и слабой

(42 %) интенсивности. Дни с сильным обледенением регистрировались с октября по май с максимумом в ноябре (8 случаев).

Более чем в половине случаев обледенение отмечалось в слоях толщиной до 1 000 м, лишь в одной четверти она превышала 1 500 м, в отдельных случаях достигала более 3500 м (таблица). Нижняя

граница слоя в 75 % случаев фиксировалась от подстилающей поверхности до 1 500 м, в некоторых случаях обледенение наблюдалось от 3 000 м и выше. Самый высокий слой с умеренным обледенением (до 8 000 м) был зафиксирован 22.07.2015 г., самый мощный по вертикали (5 900 м) – 5.09.2012 г.

Повторяемость толщины слоя обледенения в зависимости от его нижней границы, %

Repeatability of thickness of icing layer depending on its lower boundary, %

Толщина слоя, м	Нижняя граница слоя обледенения, м							Итого
	0–500	600–1 000	1 100–1 500	1 600–2 000	2 100–2 500	2 600–3 000	3 100–3 500	
0–500	10,3	3,9	6,3	3,0	1,0	0,5	0	25,0
600–1 000	9,4	11,8	4,4	5,4	2,0	1,0	0	34,0
1 100–1 500	6,4	4,9	2,0	1,5	0,5	2,4	1,5	19,1
1 600–2 000	3,9	3,0	1,0	0	0	0	0	7,9
2 100–2 500	1,5	2,0	1,0	0	1,0	0,5	0	6,0
2 600–3 000	2,5	0,5	0	0,5	0	0	0	3,5
3 100–3 500	1,5	0,5	0	1	0	0	0	3,0
≥3 600	1,0	0	0	0	0	0	0,5	1,5
Итого	36,5	26,6	14,7	11,3	4,5	4,4	2,0	100

Обледенение самолетов возникает при наличии комплекса метеорологических характеристик, из которых наибольшее значение имеют водность и спектр размеров капель облака. Вероятность умеренного и сильного обледенения существенно зависит от содержания жидкой воды в облаке и несколько различается в зависимости от формы облаков. Наибольшей водностью обладают хорошо развитые кучевые и кучево-дождевые облака (*Cu cong.*, *Cb*), образующиеся в результате значительных восходящих конвективных движений воздуха; вероятность обледенения в них значительно больше, чем в облаках других формах. Проведенное исследование показало, что обледенение в большинстве случаев (62 %) сопровождалось различными видами атмосферных явлений, преимущественно осадками (снег, ливневый снег, дождь, ливневый дождь, морось, переохлажденная морось, снежные зерна), а также переохлажденным туманом и дымкой. Осадки в 75 % случаев выпадали в виде ливневых снега или дождя.

Анализ синоптических процессов, способствовавших формированию зон с обледенением, показал, что более половины случаев обледенения разной интенсивности наблюдалось при прохождении атмосферных фронтов, и одна треть случаев может быть отнесена к внутримассовой облачности. Около 24 % случаев пришлось на фронты окклюзии, 35 % – на холодные фронты и 41 % – на теплые. Полученное распределение повторяемости относительно типов фронтов, в целом, согласуется с ранее полученными результатами авторов [Шакина, Иванова, 2016], но следует отметить на юго-востоке Западной Сибири большую повторяемость обледенения на облачных

системах теплых фронтов (на 7 %) и фронтов окклюзии (на 5 %), уменьшение доли холодных фронтов (на 8 %). Случаи с сильной интенсивностью обледенения связаны исключительно с фронтальной облачностью. Обледенение, преимущественно слабое, отмечалось в однородных воздушных массах, из них в 20 % случаев – в антициклональном поле и барических гребнях.

Далее рассмотрен пример возможного комплексного использования методик обнаружения зон обледенения на территории юго-востока Западной Сибири (в районе аэродрома Томск) за 5–6 января 2017 г. По данным бортовой погоды, в 23:54 UTC 4 января было зафиксировано умеренное обледенение в слое 1 000–3 700 м, которое перешло в сильное с 00:00 UTC 5 января и продолжалось до 00:52 UTC 6 января. Метеорологические и синоптические условия образования обледенения в первой декаде января 2017 г. сложились в результате активизации циклонической деятельности и выхода южных циклонов на фоне ослабления Сибирского антициклона. В рассматриваемый период наблюдались ливневой снег различной интенсивности, поземка и метели с порывами ветра до 15–17 м/с южного и юго-западного направлений, отмечалось ухудшение видимости до 400 м. Синоптические условия 5 января определялись прохождением фронта окклюзии и наличием преимущественно кучевых форм облачности (*Cb*, *Sc*, *Frn*, *Ac*).

Для определения пространственной локализации полей облачности с наблюдавшимися и потенциальными зонами обледенения и оценки содержания воды любого фазового состояния было составлено цветосинтезированное изображение (рис. 1) по дан-

ным продукта MOD021KM. Синтезирование изображения для анализа микрофизики облаков в каналах 0,8; 3,9; 11,03 мкм позволяет распознавать сверхохлажденные капельные облака и обеспечивает хороший цветовой контраст между облаками с малыми каплями воды и снегом на земной поверхности (<http://eumetrain.org>).

Канал 0,8 мкм отражает оптическую плотность облаков. На длине волны 3,9 мкм капли воды отражают больше солнечной радиации, чем кристаллы льда, т.е. сигнал сильно зависит от фазы облаков и размера частиц (большие капли воды или кристаллы льда отражают меньше солнечной радиации, чем

малые капли воды или кристаллы льда). Температура земной поверхности и верхней границы облаков содержится в канале 11,03 мкм.

На рис. 1 хорошо прослеживается выраженная валовая (грядовая) структура облачности преимущественно кучево-дождевых и слоисто-кучевых форм облачности с высокой водностью. В районе аэродрома Томск, где наблюдалось обледенение, располагаются оптически плотные кристаллические облака, с кристаллами льда малых размеров на верхней границе облачности и оптически плотные капельные облака нижнего и среднего ярусов, состоящие из частиц малых размеров.

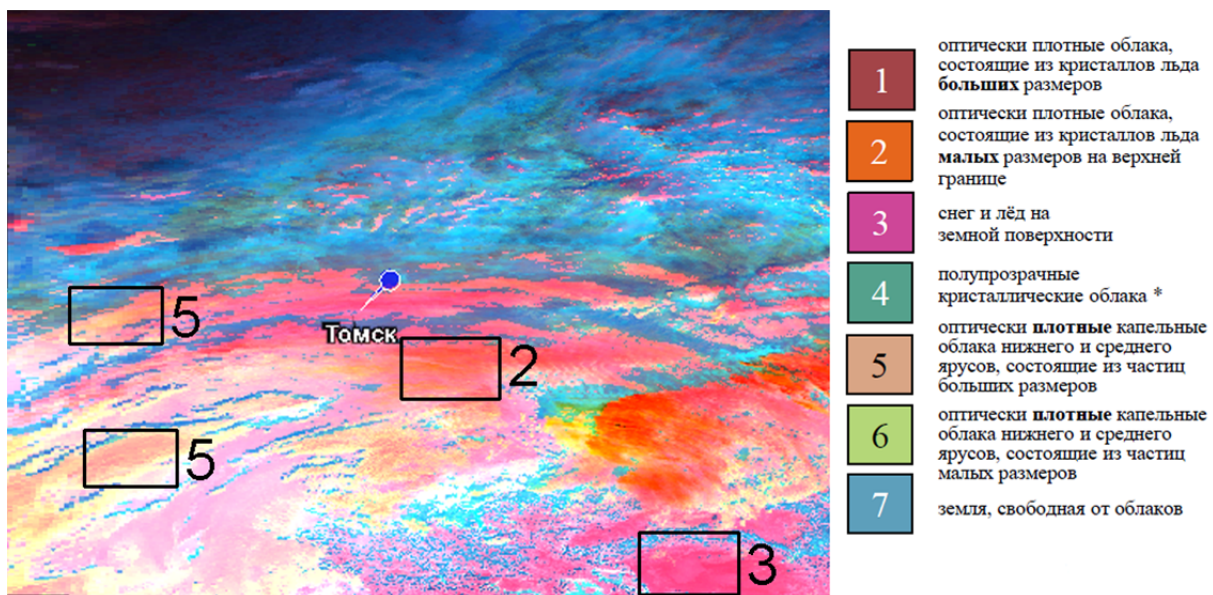


Рис. 1. Цветосинтезированное изображение (0,8; 3,9; 11,03 мкм) для анализа микрофизики облаков в дневное время: 5 января 2017 г. 04:55 UTC. Координаты Томска – 56,5° с.ш., 84,92° в.д.

Fig. 1. A false-color image (0.8; 3.9; 11.03 μm) presented a cloud microphysics analysis (daytime) on January, 5, 2017 at 04:55 UTC. Tomsk coordinates – 56.5N, 84.92E

Интегральное содержание облачной влаги (в $\text{г}/\text{м}^2$), которое выражает содержание жидкой воды или льда в вертикальном столбе единичного сечения от основания до вершины облака, доступно для анализа из продукта MODATML2 спектро радиометра MODIS/Terra [MODIS..., 2019]. Значения интегрального содержания облачной влаги в 06:35 ВСВ за 05.01.2017 г. имеют высокую степень очаговости, характерную для слоисто-кучевой облачности с вкраплениями кучево-дождевой, которая обнаруживается при значениях свыше $1\,500\text{ г}/\text{м}^2$. При использовании данных спектро радиометра MODIS, согласно ATML2 [Joint..., 2019], наиболее точными являются измерения при отсутствии облачности или при наличии разрывов в плотном слое облаков и т.д. В то же время в работе [Щукин и др., 2013] показана возможность применения радиометров для проведения непрерывных измерений и при других метеоуслови-

ях, в частности при внутримассовой облачности. Применение продукта ATML2 целесообразно в качестве вспомогательного источника информации.

В связи с этим более результативным будет использование данных системы микроволнового зондирования, которые не зависят от облачности.

В настоящее время Центром спутниковых приложений и исследований NOAA/NESDIS (STAR) разработан программный комплекс MIRS [Microwave..., 2016]. Комплекс предназначен для восстановления вертикальных профилей, входными данными являются микроволновые измерения приборов AMSU/MHS космических аппаратов (КА) серии NOAA, MetOp и прибора ATMS KA Suomi NPP. Поскольку программный комплекс находится в стадии усовершенствования, в настоящей работе использованы доступные данные зондирования ATOVS, точность которых подтверждена в большом количестве публикаций.

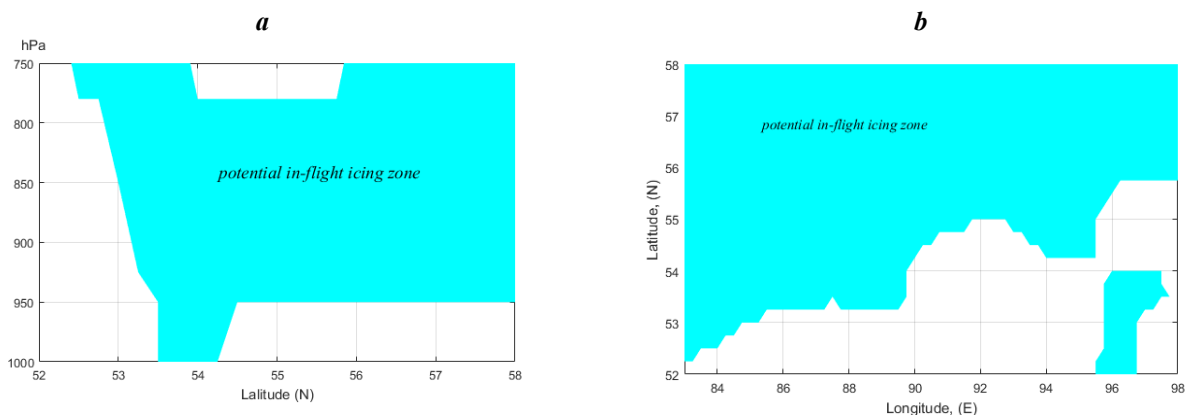


Рис. 2. Пространственная зона обледенения (голубой цвет), по данным ATOVS, на основе алгоритма К. Годске. Время пролета – 07:34 UTC за 05.01.2017 г. *a* – вертикальный разрез зоны обледенения вдоль 86° в.д.; *b* – границы горизонтальной зоны обледенения на уровне 850 гПа

Fig. 2. Spatial icing zone (cyan color) computed with the Godske formula, ATOVS data. The pass time is 07:34 UTC, 05.01.2017: *a* – vertical section of the icing zone along 86 E; *b* – boundaries of the horizontal icing zone at 850 hPa

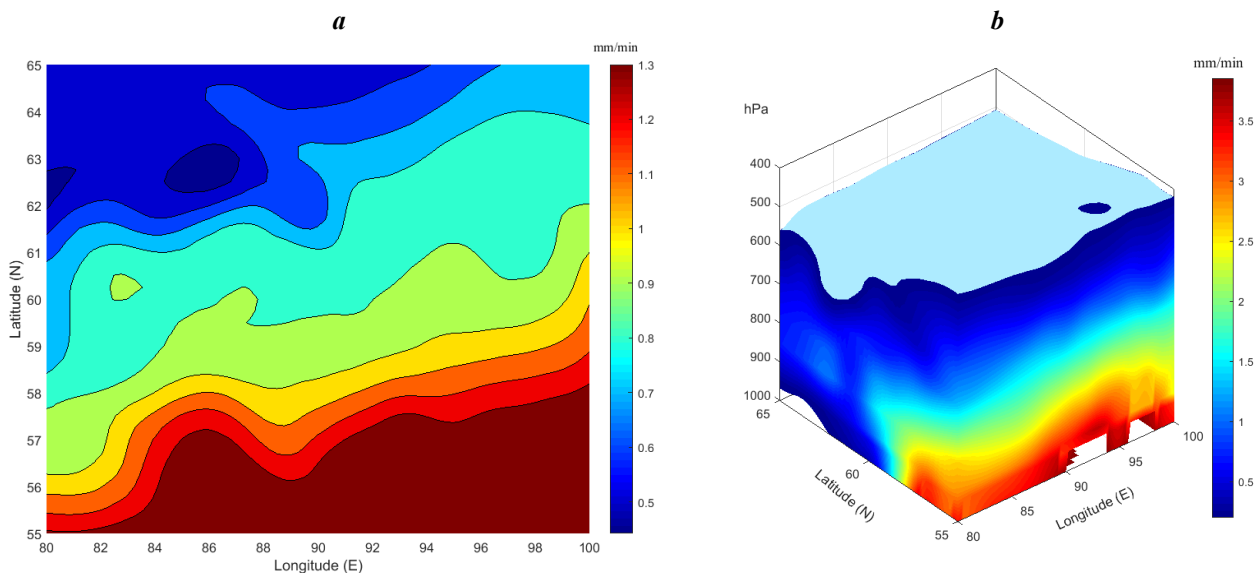


Рис. 3. Карта-схема распределения интенсивности обледенения (I) при заданных параметрах: суммарный (интегральный) коэффициент захвата 0,25; плотность льда $0,9 \text{ г/см}^3$; скорость полета 250 км/ч. Время пролета – 07:34 ВСВ за 05.01.2017 г. *a* – изолинии I на изобарической поверхности 1 000 гПа; *b* – трехмерное распределение I

Fig. 3. Map-scheme of icing intensity distribution (I) at given parameters: total (integral) capture coefficient 0,25; ice density $0,9 \text{ g/cm}^3$; flight speed 250 km/h. The pass time over study area is 07:34 UTC, 05.01.2017: *a* – I isolines at 1000 hPa; *b* – 3D-distribution of I

Преимущество данных, на основе которых восстанавливают вертикальные профили метеопараметров, заключается в том, что с их помощью возможно адаптировать существующие методики, разработанные в свое время для аэрологического зондирования. Профили температуры и влагосодержания не только в пограничном слое, но и во всей толще тропосферы применимы для составления сверхкраткосрочного

прогноза зон обледенения с использованием существующих физико-статистических закономерностей, например, метода К. Годске [Руководство..., 1985], основанного на формуле

$$T \leq -8 \times D, \quad (1)$$

где T – это температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$); D – дефицит точки росы.

При условии $T \leq -8D$ обледенение считается возможным. Расчет по формуле (1) производился для всех уровней зондирования от 2 000 м до поверхности земли.

Использование данных восстановленных вертикальных профилей в методе позволило выявить зону обледенения (см. рис. 2) во всей расчетной области вдоль 86° в.д., распространяющейся по вертикали до уровня 750 гПа. У поверхности земли эта зона занимает около 70 % площади расчетной области, покрывая азимут любого курса взлета-посадки воздушного судна в аэропорту Томск (56.5° с.ш., 84.92° в.д.).

Карта-схема распределения интенсивности обледенения, рассчитанной по формуле (2) на изобарической поверхности 1 000 гПа и нижнем слое тропосферы до 5 км, приводятся на рис. 3:

$$I = \frac{1,67 \times 10^{-2}}{\rho_i} u \omega \tilde{E} \beta, \quad (2)$$

где I , мм/мин; ρ_i – плотность льда, г/см³; u – скорость полета, км/ч; ω – водность облака, г/м³; \tilde{E} – суммарный (интегральный) коэффициент захвата; β – коэффициент намерзания [Руководство..., 1985].

Видно, что интенсивность обледенения изменялась от умеренной до сильной и могла отразиться на режиме полета (уменьшение скорости полета на 20–70 км/ч), и в виде вибраций – от небольших до сильных. Зона обледенения относилась к условиям фронтального обледенения в слоисто-кучевой и кучево-дождевой облачности, обладающей высокой водностью. Воздушное судно при взлете или посадке на аэродром Томск попадает в зону обледенения, что и подтверждается данными PIREPs.

Заключение

Исследование показало, что в районе аэродрома Томск возникновение условий обледенения воздушных судов в процессе их снижения с высоты 8 000 м возможно практически круглогодично. Максимальная повторяемость дней с обледенением в районе исследования наблюдается с октября по декабрь и

составляет в среднем 20 % дней в месяц с максимумом до 45 % дней в декабре.

Обзор синоптических процессов показал, что около 65 % случаев обледенения разной интенсивности фиксировалось во фронтальных облачных системах, из них около 24 % пришлось на фронты окклюзии, 35 % – на холодные фронты и 41 % случаев – на теплые. Все случаи с сильной интенсивностью обледенения связаны с фронтальной облачностью. Слабое обледенение отмечалось преимущественно в однородных воздушных массах, из них в 20 % случаев – в антициклональном поле и барических гребнях.

Впервые для данной территории был реализован комплексный подход с применением спутниковой информации первого уровня обработки, данных восстановленных вертикальных профилей метеопараметров в совокупности с расчетными методами, позволяющий на выходе получать карты-схемы слоя обледенения и интенсивности явления в двух и трехмерном представлении.

Использование данного подхода наиболее целесообразно для территорий, не охваченных сетью аэрологического зондирования. Учитывая высокую вероятность возникновения условий для обледенения ВС, полученную в результате синоптико-статистического анализа, предложенные методические основы с позиции применения спутниковой информации могут быть использованы при разработке системы наукастинга и сверхкраткосрочного прогнозирования для территории Западной Сибири.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Томской области в рамках научного проекта № 18-45-700010 р_а и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания НИ ТГУ (проект № 0721–2020–0041).

ЛИТЕРАТУРА

- Авиационные** происшествия и инциденты в 2012–2019 гг. URL: <http://www.aviamettelecom.ru/> (дата обращения: 03.04.2020).
- Волкова Е.В., Успенский А.Б., Кухарский А.В.** Специализированный программный комплекс получения и валидации спутниковых оценок параметров облачности и осадков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 3. С. 7–26.
- Зуев В.В., Нахтигалова Д.П., Шелехов А.П., Шелехова Е.А., Павлинский А.В., Баранов Н.А., Кижнер Л.И.** Применение метеорологического температурного профилера МТР-5РЕ в аэропорту для определения пространственных зон возможного обледенения воздушного судна // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28, № 11. С. 1029–1034.
- Инструкция** по метеорологическому обеспечению полетов воздушных судов на аэродроме Томск, 2018. 21 с.
- Руководство** по приборам и методам наблюдений. Т. IV: Космические наблюдения. Женева : Изд-во ВМО, 2018. 278 с.
- Руководство** по прогнозированию метеорологических условий для авиации / под ред. К.Г. Абрамович, А.А. Васильева. Л. : Гидрометеиздат, 1985. 301 с.
- Старченко А.В., Кузевская И.В., Кижнер Л.И., Барашкова Н.К., Волкова М.А., Барт А.А.** Оценка успешности численного прогноза элементов погоды по мезомасштабной модели атмосферы высокого разрешения TSUNM3 // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32, № 1. С. 57–61. DOI: 10.15372/AOO20190108.

Чукин В.В., Мельникова И.Н., Нгуен Т.Т., Никулин В.Н., Садыкова А.Ф., Чукина А.М. Диагностика ледяных ядер в облаках по данным прибора SEVIRI // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 4. С. 133–142.

Шакина Н.П., Иванова А.Р. Прогнозирование метеорологических условий для авиации. М. : Триада, 2016. 312 с.

Щукин Г.Г., Чичкова Е.Ф., Караваев Д.М. Микроволновый радиометр для валидации спутниковых данных температурно-влажностного зондирования атмосферы // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013. № 1. С. 28–31.

Bernstein B.C., McDonough F., Politovich M.P., Brown B.G., Ratvasky T.P., Miller D.R., Wolff C.A., Cuning G.C. Current icing potential: algorithm description and comparison with aircraft observations // J. Appl. Meteorol. 2005. V. 44. P. 969–986.

Global Air Navigation Plan 2013–2028. URL: https://www.icao.int/WACAF/Documents/edocs/9750_cons_en.pdf (дата обращения: 15.09.2019).

Joint Atm. (ATML2). URL: <https://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/products/joint-atm> (дата обращения: 23.12.2019).

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 // Meteorol. Z. 2017. V. 26. No. 4. P. 441–455.

Le Bot C. SIGMA System of Icing Geographic identification in Meteorology for Aviation // SAE Technical Paper 2003-01-2085. 2003. DOI: 10.4271/2003-01-2085.

Microwave Integrated Retrieval System (MIRS). User Manual // NOAA / NESDIS (STAR). 2016. V. 1.13. 87 p.

MODIS atmospheric profile retrieval algorithm theoretical basis document. URL: <http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov> (дата обращения: 23.12.2019).

Schultz P., Politovich M.K. Toward the improvement of aircraft icing forecasts for the continental United States // Weather and Forecast. 1992. V. 7. No. 9. P. 491–500.

Sitnikov G.I., Starchenko A.V., Terenteva M.V., Barashkova N.K., Volkova M.A., Kuzhevskaya I.V., Kizhner L.I. Forecast of extreme weather conditions that promote aircraft icing during take-off or landing // Proc. of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2015. V. 9680. P. 1–7.

Smith W.L., Minnis Jr.P., Bernstein B., Heck P.W. Supercooled liquid water cloud properties derived from GOES: Comparisons with in-situ aircraft measurements. Preprints // 10th Conf. on Aviation, Range and Aerospace Meteorology, Portland, OR, Amer. Meteor. Soc., 2002. P. 89–92.

Vivekanandan J., Ellis S.M., Oye R., Zrnich D.S., Ryzhkov A.V., Straka J. Cloud microphysics retrieval using Sband dual-polarization radar measurements. // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1999. V. 80. P. 381–388.

Volkova M.A., Starchenko A.V., Kuzhevskaya I.V., Bart A.A., Kizhner L.I., Barashkova N.K. Forecast of icing zones using possibilities of hydrodynamic simulation for the atmospheric boundary layer // Proc. of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2016. V. 10035. P. 1–7.

Авторы:

Волкова Марина Александровна, кандидат географических наук, доцент, кафедра метеорологии и климатологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.
E-mail: mv2101@mail.ru

Кузевская Ирина Валерьевна, кандидат географических наук, доцент, кафедра метеорологии и климатологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.
E-mail: ivk@ggf.tsu.ru

Барашкова Надежда Константиновна, кандидат географических наук, доцент, кафедра метеорологии и климатологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.
E-mail: nkbar@sibmail.com

Нечепуренко Ольга Евгеньевна, кандидат физико-математических наук, ассистент, кафедра метеорологии и климатологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия; ведущий инженер, лаборатория геосферно-биосферных взаимодействий, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия.
E-mail: o.e.nechepurenko@gmail.com

Пустовалов Константин Николаевич, кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра метеорологии и климатологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия; научный сотрудник, лаборатория физики климатических систем, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия.
E-mail: const.pv@yandex.ru

Чурсин Владислав Вячеславович, инженер, кафедра метеорологии и климатологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.
E-mail: skriptum@mail.ru

M.A. Volkova¹, I.V. Kuzhevskaya¹, N.K. Barashkova¹, O.E. Nechepurenko^{1,2}, K.N. Pustovalov^{1,2}, V.V. Chursin¹

¹National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

²Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

DETERMINATION OF IN-FLIGHT ICING ZONES IN THE SOUTHEAST OF WESTERN SIBERIA

The research was funded by RFBR and Tomsk region, project number 18-45-700010

The paper presents icing parameters based on actual weather conditions taken from pilot reports (PIREPs) in the Tomsk aerodrome and shows the feasibility of using satellite information to identify possible in-flight icing zones (by example). From 2011 to 2018, the icing was regularly observed during the period from October to December, averaging 6–7 days per month with a maximum in December 2015 (14 days). The most frequent icing occurred with moderate (52 %) and light (42 %) intensity. Days with severe accumulation of aircraft ice were observed in all seasons, excluding summer, with a maximum of November (8 cases). In more than half of the cases, icing was observed in layers up to 1,000 m thick, just 25 % exceeded 1,500 m and in some cases reached more than 3,500 m. In 75 % of cases, the lower boundary of the icing layer was reported directly from the underlying surface up to 1,500 m, and in some cases, icing was observed from 3 km and above. An analysis of synoptic processes on icing days revealed that approximately 65 % of cases of icing of different intensities were recorded in frontal cloud systems, of which 24 % were on occluded fronts, 35 % on cold fronts, and 41 % on warm fronts. All cases with severe icing intensity were linked to frontal cloud systems. In homogeneous air masses, 20 percent of which are in the anticyclonic field and baric ridges, light icing was primarily observed. To identify the spatial and temporal localization of potential icing, vertical profiles of temperature and humidity are needed. Usually, these profiles are collected at most sounding stations on the basis of twice-a-day upper-air observations. The number of passes of polar-orbiting satellites over western Siberia's south-east territory ranges from 8 to 16 times a day. Schematic maps of the 2D and 3D-representation of the icing layer itself and its intensity at the same frequency can also be mapped on the basis of first-level satellite processing information and retrieved meteorological parameters in combination with computed methods of icing zone detection. The research was implemented by employing 0.8, 3.9 and 11.03 μm of MODIS and temperature and specific humidity profiles of ATOVS radiometers. Joint study material analysis confirms identification of icing zones using by satellite remote sensing (temperature and humidity). The approach is most relevant for territories in the absence of the upper-air sounding. Given the high probability of aircraft icing conditions obtained by synoptic and statistical analysis, the proposed approach based on the involvement of satellite information will serve as an essential component in ultra-short-term forecasting and nowcasting for the territory of Western Siberia.

Key words: *In-flight icing, pilot reports (PIREPs), satellite remote sensing, cloud microphysics*

References

- Aviatsionnyye proisshestviya i intsidenty v 2012–2019 gg.* [Aviation accidents and incidents in 2012–2019]. Available at: <http://www.aviamettelecom.ru/> (Date of accessed 03.04.2020). In Russian
- Volkova E.V., Uspenskiy A.B., Kukharskiy A.V. Specialized complex of programs for retrieving and validating satellite estimates of cloud and precipitation // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2015. V. 12. No 3. pp. 7–26.
- Zuyev V.V., Nakhtigalova D.P., Shelekhov A.P., Shelekhova E.A., Pavlinskiy A.V., Baranov N.A., and 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*. 2015. V. 28. No 11. pp. 1029–1034.
- Instruktsiya po meteorologicheskomu obespecheniyu poletov vozdushnykh sudov na aerodrome Tomsk* [Instructions for meteorological support of aircraft flights at the Tomsk aerodrome]. 2018. 21 p. In Russian
- WMO-No.8: Guide to Instruments and Methods of Observation Volume IV – Space-based Observations. Geneva, WMO. 2018, 278 p.
- Rukovodstvo po prognozirovaniyu meteorologicheskikh usloviy dlya aviatsii* [Guide to Forecasting Meteorological Conditions for Aviation]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985. 301 p. In Russian
- Starchenko A.V., Kuzhevskaya I.V., Kizhner L.I., Barashkova N.K., Volkova M.A., Bart A.A. *Otsenka uspekhov chislennogo prognoza elementov pogody po mezomasshtabnoy modeli atmosfery vysokogo razresheniya TSUNM3* [Evaluation of the TSUNM3 high-resolution mesoscale NWP model] // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2019. V. 32. No 1. pp. 57–61. DOI: 10.15372/AOO20190108. In Russian
- Chukin V.V., Mel'nikova I.N., Nguyen T.T., Nikulin V.N., Sadykova A.F., Chukina A.M. Diagnosis of ice nuclei in the clouds by SEVIRI data // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2015. V.12. No 4. pp. 133–142. In Russian
- Shakina N.P., Ivanova A.R. *Prognozirovaniye meteorologicheskikh usloviy dlya aviatsii* [Weather forecasting for aviation]. Moscow : Triada, 2016. 312 p. In Russian
- Shchukin G.G., Chichkova Ye. F., Karavayev D.M. *Mikrovolnovyy radiometr dlya validatsii sputnikovykh dannykh temperaturno-vlazhnostnogo zondirovaniya atmosfery* [Microwave radiometer for validation of satellite data of the temperature-humidity sounding of the atmosphere] // *RTS journal*. 2013. No 1. pp. 28–31. In Russian
- Bernstein B.C., McDonough F., Politovich M.P., Brown B.G., Ratvasky T.P., Miller D.R., Wolff C.A., Cuning G.C. Current icing potential: algorithm description and comparison with aircraft observations // *J. Appl. Meteorol.* 2005. V. 44. pp. 969–986.
- Global Air Navigation Plan 2013–2028. Available at: https://www.icao.int/WACAF/Documents/edocs/9750_cons_en.pdf (Date of accessed 15.12.2019).
- Joint Atm. (ATML2) Available at: <https://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/products/joint-atm> (Date of accessed 23.12.2019).
- 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 // *Meteorol. Z.* 2017.V. 26. No 4. pp. 441–455.

Le Bot C. SIGMA System of Icing Geographic identification in Meteorology for Aviation // SAE Technical Paper 2003-01-2085. 2003. doi.org/10.4271/2003-01-2085.

Microwave Integrated Retrieval System (MIRS). User Manual. / NOAA / NESDIS (STAR) // 2016. V. 1.13. 87 p.

MODIS atmospheric profile retrieval algorithm theoretical basis document. Available at: <http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov> (Date of accessed 23.12.2019).

Schultz P., Politovich M. K. Toward the improvement of aircraft icing forecasts for the continental United States // Weather and Forecast. 1992. V. 7. No 9. pp. 491–500.

Sitnikov G.I., Starchenko A.V., Terenteva M.V., Barashkova N.K., Volkova M.A., Kuzhevskaya I.V., Kizhner L.I. Forecast of extreme weather conditions that promote aircraft icing during take-off or landing // Proc. of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2015. V. 9680. pp. 1–7.

Smith W.L., Minnis Jr.P., Bernstein B., Heck P.W. Supercooled liquid water cloud properties derived from GOES: Comparisons with in-situ aircraft measurements. Preprints // 10th Conf. on Aviation, Range and Aerospace Meteorology, Portland, OR, Amer. Meteor. Soc., 2002. pp. 89–92.

Vivekanandan J., Ellis S.M., Oye R., Zrnich D.S., Ryzhkov A.V., Straka J. Cloud microphysics retrieval using Sband dual-polarization radar measurements // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1999. V. 80. pp. 381–388.

Volkova M.A., Starchenko A.V., Kuzhevskaya I.V., Bart A.A., Kizhner L.I., Barashkova N.K. Forecast of icing zones using possibilities of hydrodynamic simulation for the atmospheric boundary layer // Proc. of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2016. V. 10035. pp. 1–7.

Author's:

Volkova Marina A., Cand. Sci. (Geography), Associate Professor, Department of Meteorology and Climatology, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: mv2101@mail.ru

Kuzhevskaya Irina V., Cand. Sci. (Geography), Associate Professor, Department of Meteorology and Climatology, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: ivk@ggf.tsu.ru

Barashkova Nadezhda K., Cand. Sci. (Geography), Associate Professor, Department of Meteorology and Climatology, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: nkbar@sibmail.com

Nechepurenko Olga E., Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assistant Professor, Department of Meteorology and Climatology, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia; Lead Engineer, Laboratory of Geosphere-Biosphere Interactions, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia.

E-mail: o.e.nechepurenko@gmail.com

Pustovalov Konstantin N., Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department of Meteorology and Climatology, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia; Researcher, Laboratory of Physics of Climatic Systems, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia.

E-mail: const.pv@yandex.ru

Chursin Vladislav V., Engineer, Department of Meteorology and Climatology, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: skriptym@mail.ru