

УДК 551.554.7

Обледенение двигателей самолетов в ледяных кристаллах: пути решения проблемы

А.Р. Иванова

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия
ivanova@mecom.ru*

Представлен обзор работ, посвященный «неклассическому» типу обледенения – в ледяных кристаллах. Подобное обледенение происходит вблизи зон активной конвекции, в областях большой концентрации кристаллов льда (HIWC), которые могут попадать внутрь двигателей воздушного судна и нарушать их работу. Описаны механизм обледенения двигателей и атмосферные условия, при которых формируются зоны HIWC. Излагаются пути решения проблемы – инженерный и основанный на стратегии уклонения от встречи с областями HIWC. Прогноз положения зон HIWC формируется на масштабах наукастинга с использованием преимущественно спутниковой информации.

Ключевые слова: обледенение в ледяных кристаллах, конвекция, спутниковая информация, наукастинг

Icing of aircraft engines in ice crystals: ways to solve the problem

A.R. Ivanova

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia
ivanova@mecom.ru*

A review of the works concerned to the "nonclassical" type of icing - ice crystal icing - is presented. Such icing occurs near the zones of active convection, in the area of high ice water concentration (HIWC). Ice crystals can get inside the engines of the aircraft and damage them. Mechanism of engine icing and corresponding atmospheric conditions are described. The ways of solving the problem are outlined - engineering and avoidance strategy of the HIWC areas. HIWC area location is predicted on the scale of nowcasting using mainly a satellite information.

Keywords: ice crystal icing, convection, satellite data, nowcasting

Введение

С начала создания авиации и вплоть до недавнего времени основную опасность для обледенения воздушных судов (ВС) представляли облака и выпадающие из них осадки [1]. Капли переохлажденной влаги облаков или осадков замерзают при контакте с холодным металлом конструкций ВС, на образовавшуюся ледяную корку происходит налипание следующих слоев капель, увеличивающих ее толщину. Эффект обледенения зависит

от времени, проведенного ВС в контакте с переохлажденной влагой, и состоит в увеличении веса и нарушении аэродинамических свойств воздушного судна. Это создает серьезную угрозу безопасности полетов, в ряде случаев приводящую к летным происшествиям и катастрофе [3]. В частности, по этой причине развитие магистральной авиации было направлено на увеличение «потолка» самолетов, которые бы могли быстро подняться выше облачности на значительные высоты и пребывать там в относительной безопасности, не опасаясь проблем, связанных с обледенением. Например, практический потолок Airbus A380 и Boeing 747-8 превышает 13 км, а Dassault Falcon 7X или Gulfstream G500 – 15 км (http://www.aif.ru/dontknows/about/vip-samolety_top-10_samyh_dorogih_biznes-dzhetov).

28 ноября 2005 года, когда произошло заглохание обоих моторов воздушного судна Beechjet, следующего из Индианаполиса во Флориду на высотах 10–12 км (https://www.ntsb.gov/_layouts/ntsb.aviation/brief.aspx?ev_id=20060104X00004&key=1), стало ясно, что кажущаяся безопасность ВС – мнимая. Одновременная остановка обоих двигателей практически в чистом небе была исключительным происшествием и подлежала тщательнейшему расследованию. Ключом к решению этой загадки послужили выводы инженеров по тяге двигателей, которые работали над похожей загадочной проблемой случаев потери мощности турбореактивными двигателями самолетов на региональных авиалиниях США в середине 1990-х гг. [18]. Двигатели испытывали самопроизвольное падение тяги на круизных высотах между 8,5 и 9,5 км вблизи грозовых очагов. Оно выражалось в постепенном уменьшении скорости вращения ротора, увеличении температуры газа в турбине и отказе двигателя реагировать на управляемые пилотом изменения тяги. Причиной оказалось нарастание льда во внутреннем контуре двигателей. К счастью, при снижении до высот 2–3 км двигатель освобождался от блокады льда и пилоты могли осуществлять процесс его перезапуска. Было отмечено, что ряд инцидентов происходил в абсолютно чистом небе, где отсутствовала переохлажденная влага, наличие которой могли бы зафиксировать самолетные радары. Как оказалось, источником обледенения были области ледяных кристаллов (HIWC – High Ice Water Content) настолько малого размера, что даже в высоких концентрациях их невозможно было обнаружить ни визуально, ни с помощью самолетного радара. Значения отражаемости на экране бортового радара были либо ниже пороговых величин (<14–20 dBz), либо находились в «зеленой» зоне (20–30 dBz) – свидетельствовали об отсутствии серьезной опасности [10, 16].

В 2011 году был опубликован обзор NASA TM-2011-217254 «Об исследовании обледенения двигателя в ледяных кристаллах», в котором отмечалось: «Это проблема, повторяемость которой пугающе высока.... Доказано, что инциденты с обледенением двигателей, вызываемые нарастанием льда в их внутренних контурах, продолжают свыше двух десятилетий.» (<file:///D:/PUBLICATIONS/ICING/HAIC/2691.pdf>).

Рабочая группа по гармонизации двигателей (The Engine Harmonization Working Group), включающая экспертов по данной тематике из предприятий авиационной промышленности, правительства и академических институтов США, обнаружила, начиная с 1983 г., свыше 140 случаев потери мощности двигателями разных типов вследствие нарастания льда в их внутренних контурах (file:///D:/PUBLICATIONS/ICING/HAIC/AERO_Q407_article3.pdf). Четырнадцать из них характеризовались заглоханием сразу нескольких двигателей. Пилоты Beechjet в ноябре 2005 г. были единственными, кто не смог осуществить перезапуск в подобной ситуации, но они все же смогли посадить самолет с неработающими двигателями («dead-stick landing»). Другие, к счастью, сумели перезапустить двигатели на более низких высотах. Таким образом, катастроф с человеческими жертвами по причине обледенения в ледяных кристаллах до сих пор удавалось избегать. Однако опасность таких инцидентов нельзя недооценивать. Более того, если раньше они отмечались в основном в тропических широтах, в последнее время их повторяемость вне тропиков увеличилась. Так, в 2013 г. был зафиксирован подобный случай с самолетом, следовавшим рейсом Москва – Гонконг. В [2] показано, что повреждение двигателя самолета могло стать следствием контакта с областью высокой концентрации ледяных кристаллов при обходе мезомасштабного конвективного комплекса в районе Магнитогорска.

Механизм обледенения двигателей воздушных судов в ледяных кристаллах

Как указывалось выше, обледенение конструкций самолета обычно вызывается переохлажденной жидкой влагой, налипающей на холодную поверхность ВС. В случае же мелких ледяных кристаллов они просто отскакивают от металлической поверхности. Механизм накопления льда во внутреннем контуре двигателя до сих пор не до конца ясен, однако специалисты склоняются к следующей последовательности процессов, кратко изложенной ниже.

Несмотря на собственные уникальные особенности конструкций разных двигателей, общие черты их строения следующие (рис. 1). Воздушный поток попадает через вентилятор внутрь, где нагнетается с помощью компрессора. Компрессор втягивает воздух, сжимает его и направляет в камеру сгорания. В ней сжатый воздух смешивается с топливом, образуя воздушно-топливную смесь, воспламеняется и расширяется. Расширенный газ заставляет вращаться турбину, которая расположена на одном валу с компрессором. Остальная часть энергии направляется в сужающее сопло, образуя реактивную тягу, которая является основной движущей силой ВС. Общий признак проблемы проявляется в начальном накоплении ледяных кристаллов в передней части двигателя – компрессоре низкого давления. На относительно теплых поверхностях при таянии ледяных кристаллов

происходит образование водно-ледовой смеси. Эта смесь охлаждает поверхности до 0° , смоченность их помогает льду прилипнуть. Как следствие – происходит нарастание льда. Аккумулируемый лед может блокировать вток воздуха во внутренний контур двигателя или же забрасываться в компрессор высокого давления или камеру сгорания.

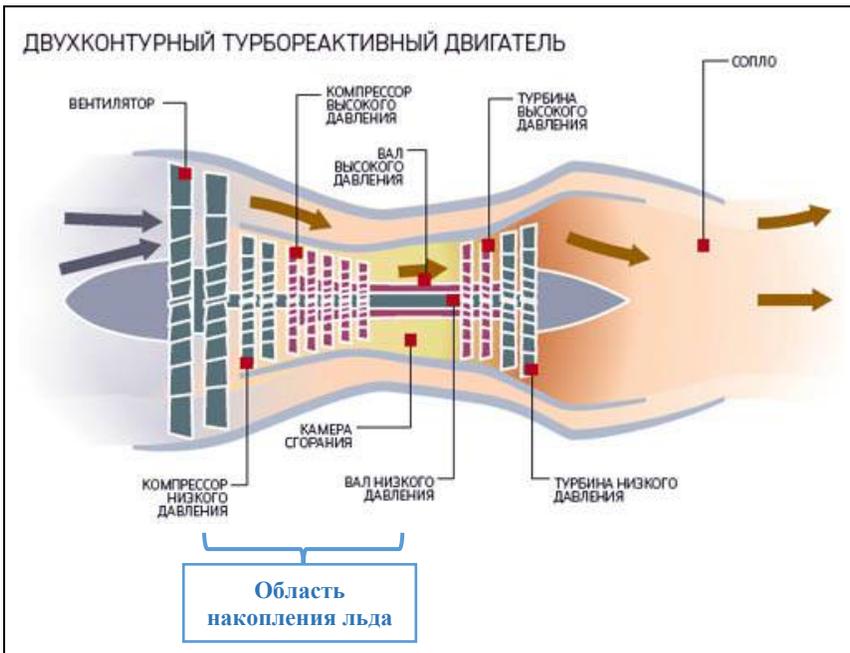


Рис. 1. Принципиальная схема двухконтурного турбореактивного двигателя и области накопления льда.

Fig. 1. Schematic diagram of bypass turbofan engine and area of ice accumulation.

Типы потери мощности, вызванные кристаллическим обледенением, классифицируются как помпаж двигателя (заброс оборотов, остановка), заглохание и повреждение двигателя. Лед, заброшенный в компрессор, может привести к остановке двигателя вследствие комбинированного эффекта различных механизмов (потеря инерциальной и тепловой энергии, неэффективность аэродинамических свойств поверхности со льдом на ней). Это приводит к внезапному обращению входящего потока (помпаж компрессора), за ним следует падение скорости ротора (остановка двигателя), поскольку поток воздуха сокращается вследствие его разделения в ступенях компрессора. Хотя камера сгорания продолжает работать, однако из-за потери воздушного потока обычно быстро возрастает температура выходящих газов. Заглохание имеет место вследствие охлаждения камеры сгорания после попадания льда. Забрасываемый в компрессор лед может повредить лопасти компрессора. Иногда в редких случаях имеет место выброс лопаток. Проведенное моделирование траекторий ледяных кристаллов показало [15], что частицы льда, в зависимости от их размера, оказывают влияние на разные участки лопаток.

Для решения проблемы обледенения в ледяных кристаллах существует два пути. Первый и, как представляется, наиболее эффективный – инженерный, требующий развития новых технологических решений (в том числе создания новых материалов с гидрофобными и льдофобными свойствами для производства двигателей). К сожалению, существующие испытательные установки состоят в основном, из наружных, базируемых на земле средств, которые ограничены в диапазоне внешней температуры и давления. Очень мало испытательных стендов имеют возможность производить испытания на высотах. Одно из инженерных решений, которое является частично эффективным в предупреждении потери мощности из-за кристаллического обледенения, заключается в удалении нарастающего льда из внутреннего контура двигателя, когда он туда попадает [12]. На эффективное удаление льда может работать система отбора горячего воздуха, выходящего из двигателя, но по летно-техническим регламентам и из-за экономии топлива на этапе круизной тяги (при полете на эшелоне) отбор воздуха обычно не производится. При тяге с закрытым отбором происходит втягивание льда, возникает угроза помпажа или заглохания двигателя.

До тех пор, пока не найдется эффективное инженерное решение, пока все двигатели не будут переделаны и заново сертифицированы – есть насущная необходимость следовать второму пути – определению и прогнозированию зон потенциального кристаллического обледенения с использованием информации о термодинамических и микрофизических свойствах атмосферы.

Общие характеристики условий кристаллического обледенения двигателей воздушных судов

Попытки идентифицировать характерные условия полета и состояния атмосферы, в которых происходит обледенение двигателя в ледяных кристаллах, предпринимаются не первый год. В 2006 г. на 44-й конференции Американского института Аэронавтики и Астронавтики был представлен доклад Дж. Мейсон с соавторами [12], где обсуждалось повреждение двигателя ледяными частицами в полете. Согласно их исследованию, 46 случаев (наиболее полно документированных) потери мощности двигателями за счет ледяных кристаллов чаще всего имели место при снижении ВС (28 случаев) и при крейсерском полете (17 случаев). При наборе высоты такой инцидент был зафиксирован лишь однажды. В ситуации снижения, как объясняли исследователи, двигатель работает в режиме малого газа, в ослабленном входе кристаллы льда могут легче накапливаться, к тому же при малой мощности температура металла в зоне компрессии ниже, чем при высокой, что способствует потенциальному накоплению льда. Дальнейшие исследования [7, 11] показали, что случаи кристаллического обледенения наблюдались на высотах от 2,7 до 12 км, при температуре окружающего воздуха от -5 до -55 °С. При этом окружающая среда была теплее стандартной атмосферы примерно на 10–20 °С.

Заметим, что кристаллические облака, согласно [9], покрывают примерно 30 % глобального небосвода, однако обледенение двигателей происходит далеко не во всех таких облаках. Тщательный анализ всех инцидентов показал, что они имели место при обходе воздушным судном района высокой отражаемости, связанного с областью активной конвекции. В работах [7, 11] рассматривалось около сотни случаев происшествий с двигателями, из которых 72 % имели место в пределах мезомасштабных конвективных систем, примерно поровну над сушей

и над морем. Оставшиеся случаи относились к другим типам организации конвективных образований. В исследовании [6] указывалось, что 20 % случаев кристаллического обледенения были зафиксированы непосредственно в зоне ядер глубокой конвекции, остальные 80 % – вне их, но в районе конвективной активности. Дальнейший анализ подтвердил, что все случаи происходили, когда самолет пролетал относительно большую дистанцию вблизи конвективных облаков, так что время экспозиции могло стать решающим и сработать как триггер подобного инцидента. Наибольшая повторяемость инцидентов была отмечена в западной части Тихого океана и юго-восточной Азии.

Согласно анализу, конвекция могла быть представлена облаками любых размеров, от изолированных кумулониimbusов (Cb) или грозовых ядер, до мезомасштабного конвективного комплекса с широкой наковальной или тропического шторма. Пробивающие тропопаузу вершины (протрузии в виде купола из вершины или наковальни облаков) были явным индикатором возможного наличия ледяных кристаллов. Известно, что мощные восходящие потоки в центральной части конвективного облака выносят влагу на большие высоты, где она замерзает. Так могут создаваться локальные области высокого содержания ледяной воды (кристаллов льда), которые распространяются по ветру. Содержание ледяной воды, выносимой восходящими потоками, может достигать 8 г/куб. м (http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_07/article_03_1.html). Для сравнения, количество переохлажденной влаги, достаточной для обледенения ВС, составляет 2 г/куб. м [12]. Наибольший риск контакта с областью высокой концентрации кристаллов имеет место при видимой наковальне, часто фиксируемой пилотами как «пелена». Иногда на лобовом стекле может отмечаться подобие капель дождя (обусловленное таянием ледяных частиц), при этом обледенение корпуса самолета отсутствует (датчики обледенения способны фиксировать последнее только за счет переохлажденной влаги, а не ледяных кристаллов). Данные бортовой регистрационной системы воздушного судна могут также искажаться при попадании ледяных кристаллов через воздухозаборник. Одним из явных признаков служит вызванная попаданием ледяных кристаллов аномалия температуры заторможенного потока воздуха TAT (total air temperature), измеряемой специальным датчиком на поверхности ВС.

Осознание опасности кристаллического обледенения и одновременно – невозможности обнаружить его с помощью самолетных радаров – привели к тому, что в 2012 г. был организован проект HAIC, координируемый Airbus, включающий 34 партнера из 11 стран ЕС и 5 международных партнеров. Общая стоимость проекта в период с 1.08.2012 г. по 31.01.2017 г. составила 23 млн. € (<http://www.haic.eu/>). Основной его задачей является развитие численных методов и тестирующих технологий возможной осведомленности экипажей ВС о зонах высокой концентрации ледяных кристаллов (HIWC). В рамках данного проекта было проведено несколько летних кампаний, которые позволили изучить микрофизику данного явления и проверить возможность его детектирования с помощью средств дистанционного зондирования (спутников, наземных радаров). Для летних экспериментов использовалось исследовательское ВС типа SAFIRE Falcon, оснащенное аппаратурой дистанционного зондирования (многолучевой доплеровский облачный радар, работающий на частоте 95 ГГц), которая обеспечивает 3-х мерное представление с высоким разрешением микрофизических свойств кристаллических облаков, а также современное оборудование для определения

микрофизики in-situ. Были выполнены десятки полетов с баз в Австралии (Дарвин – в 2014 и 2016 гг.), а также во Французской Гвиане (Кайенн), на Мадагаскаре (Реюньон).

В ходе летных экспериментов было, в частности, установлено, что концентрация ледяных частиц, способная приводить к кристаллическому обледенению двигателей, составляет 1,5 г/куб. м (но за нижнюю границу, во избежание пропуска цели, часто принимают 1 г/куб. м [4]). Размеры кристаллов могут варьировать, в зависимости от типа конвекции, их породившей. Часто случаи обледенения фиксировались в областях кристаллов размерами порядка 40 мкм [18]. Однако в случае тропического шторма ледяные частицы чаще всего имеют размеры 400–800 мкм и могут достигать даже 2 мм [15]. В то же время, средний размер ледяных кристаллов в зоне мезомасштабных конвективных комплексов составляет 250–500 мкм. Такие кристаллы вполне могут быть обнаружены при спутниковом зондировании атмосферы в микроволновом диапазоне [19].

Работы по оценке применимости спутниковой информации и данных численного прогноза для идентификации зон HIWC проводятся также в Великобритании, Австралии, США, Канаде, Франции, Нидерландах, Гонконге (Китай), Японии. Очевидна необходимость в большом количестве наблюдений для верификации предлагаемых разработок; они могут быть получены как по результатам летных экспериментов, так и из анализа случаев происшествий со стандартными ВС.

Пути прогноза зон HIWC

В настоящее время при разработке технологий прогнозирования потенциальной опасности обледенения двигателей ВС в ледяных кристаллах особое внимание уделяется спутниковой информации, доступной с высоким временным и пространственным разрешением. Международным сообществом осуществляется разработка схем детектирования зон HIWC на базе средств пассивной радиометрии в видимой, инфракрасной и микроволновой частях спектра, установленных на геостационарных и полярно-орбитальных спутниках [5]. Поскольку время жизни конвекции, как правило, укладывается в масштаб наукастинга, проводится адаптация средств наукастинга для прогноза перемещения облаков, опасных с точки зрения наличия зон HIWC. Усовершенствование и валидация подобных схем осуществляется с использованием данных летных кампаний в рамках проекта НАИС. Главной целью разработчиков является дистанционное обнаружение и средства наукастинга зон высокого содержания ледяных кристаллов. Подобные работы проводятся в Национальных центрах атмосферных исследований США (NCAR) и Франции (CNRS), Королевском метеорологическом институте Нидерландов (KNMI), обсерватории Гонконга и др. Перечислим результаты некоторых подобных разработок.

В NCAR был разработан специальный алгоритм прогноза зон высоких концентраций ледяных кристаллов ALPHA (ALgorithm of Prediction of HIWC Areas) [8]. Эта система использует на входе доступные в оперативном режиме данные и обеспечивает представление так называемого «потенциала HIWC», изменяющегося от 0 (отсутствие обледенения) до 1 (100%-ная вероятность обледенения).

В качестве исходной информации применяются данные спутников, радарной сети и моделей численного прогноза погоды. Данные смешиваются с определенными, установленными экспериментально весами при помощи аппарата нечеткой логики (функции принадлежности).

Спутники находят самые высокие и самые холодные, наиболее тонкие облака с использованием алгоритмов обработки спутниковой информации, таких, как общее содержание воды на единицу площади (Total Water Path), высота вершины облака (Cloud Top Height), температура вершины облака (Cloud Top Temperature). Численное моделирование позволяет обнаружить мощные облачные слои, сильные осадки, высокий конденсат, интенсивные восходящие потоки при температуре ниже -15°C . Рассчитанные поля потенциала зон HIWC представляются в узлах сетки.

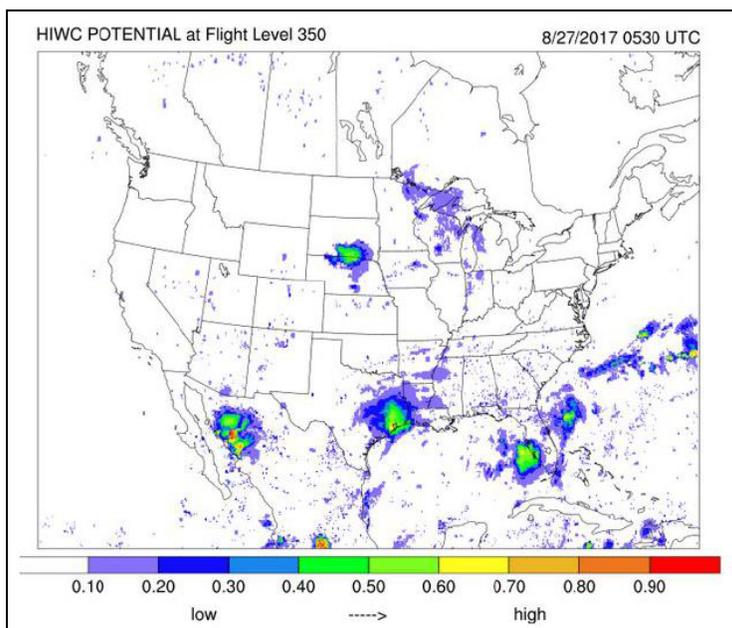


Рис. 2. Пример реализации алгоритма ALPHA – потенциал содержания ледяных кристаллов на эшелоне FL350 (~10, 6 км) 27.08.2017 5.30 UTC [8].

Fig. 2. Illustration of ALPHA algorithm implementation – HIWC potential at Flight Level 350 27.08.2017 5.30 UTC [8].

Алгоритм ALPHA в настоящее время усовершенствуется по результатам летных экспериментов трех кампаний проекта HAIC (Дарвин, Французская Гвинея и Флорида), во время которых были получены изокинетические пробы воздуха и восстановленные профили содержания ледяных кристаллов.

В юго-восточной Азии, где особенно велика повторяемость подобных инцидентов, для постоянного мониторинга ситуации используются RGB-изображения со спутника HIMAWARI-8 [14]. Анализ в зонах глубокой конвекции 14 случаев кристаллического обледенения (сопровожаемых аномалиями TAT) и 19 случаев без обледенения в период с апреля 2015 г. по октябрь 2016 г., проведенный учеными обсерватории Гонконга, позволил разработать представленный ниже алгоритм разделенного окна

(табл. 1). В нем используются сведения о яркостной температуре в основных спутниковых каналах HIMAWARI видимого (B3) и инфракрасного (B7, B9, B12, B13) диапазона.

Таблица 1. Схема определения возможности обледенения в ледяных кристаллах с использованием алгоритма разделенного окна, при значениях яркостной температуры в полосе B13 (10.4 μm) <243 К и соответствующем пороге [14]

Table 1. Split windows (given B13 (10.4 μm) < 243 K) with corresponding cut-off points to determine HIWC occurrence potentiality [14]

Разделенное окно	Порог яркостной температуры, К	Характеристики
B3 (0.64 μm)	> 0.4	Дневное время
B7 (3.9 μm) – B13 (10.4 μm)	>50	Малые ледяные частицы очень холодных вершин облаков в дневное время
B9 (6.9 μm) – B13 (10.4 μm)	>-1.5	Глубокая конвекция
B12 (9.6 μm) – B13 (10.4 μm)	>6.5 и <19	Глубокая конвекция с накопительной (ледяные кристаллы)

Оценка успешности такого подхода, основанная на доступных сообщениях экипажей и данных электронных бортовых регистраторов QAR (quick access recorder) была выполнена для различных алгоритмов разделенного окна, использующих данных разных спутников (табл. 2).

Таблица 2. Сравнение успешности алгоритмов разделенного окна [14]

Table 2. Comparison of skill statistics for different split windows algorithms [14]

Алгоритм	Предупрежденность наличия явления	Отношение ложных тревог	Критерий Пирса-Обухова
Himawari	0.55	0.13	0.42
CIP (NCAR)	0.76	0.33	0.43
SIGMA (Meteo-France)	0.59	0.26	0.33
GDCP (NASA)	0.76	0.67	0.09

Помимо описанного выше алгоритма Гонконга на базе спутника Himawari, в [14] были рассмотрены предложенный в NCAR алгоритм текущего потенциала обледенения (CIP- Current Icing Potential), разработанная в Meteo-France система географической идентификации обледенения в метеорологии для авиации, SIGMA (System of Icing Geographic identification in Meteorology for Aviation) на основе спутниковой информации с METEOSAT, а также эксплуатируемый в NASA алгоритм GDCP (GOES-Derived Cloud Products – облачные продукты по информации спутника

GOES). Наилучшие результаты, согласно критерию Пирса-Обухова, продемонстрировали алгоритмы Обсерватории Гонконга и NCAR. Разработка NASA, хотя отличается высокой предупредительностью, обнаружила значительное количество ложных тревог, что снивелировало ее полезный эффект.

Королевский метеорологический институт Нидерландов (KNMI) представил собственный алгоритм идентификации зон HIWC [4, 5], использующий информацию с спутников METEOSAT второго поколения (MSG), оснащенных датчиком SEVERI, практически в режиме реального времени. SEVERI представляет собой пассивный сенсор, регистрирующий отраженный солнечный свет и излучаемую землей ИК радиацию. Информация поступает каждые 15 мин (в дневное время). Цель предложенного алгоритма CPP (cloud physical parameter) – обнаружить атмосферный сценарий с содержанием ледяных кристаллов больше 1 грамма на кубический метр. Для этого используются спутниковые измерения вертикальных облачных профилей, а также данные из архива облачных сенсоров CLOUDSAT/CALIPSO.

Признаки высоких значений HIWC, определяемые согласно алгоритму, следующие:

- облачная фаза – лед;
- сконденсированная влага в столбе на единицу площади (condensed water path) >100 г/кв. м;
- температура вершины облака < 270 К;
- оптическая толщина облака (величина, которая характеризует ослабление света за счет его поглощения и рассеяния) > 20 .

Во время австралийской кампании проекта HAIC (Дарвин, 2016 г.) была проведена адаптация алгоритма CPP под каналы спутника Himawari. Предупредительность наличия явления составила 60–80 %, однако доля ложных тревог оказалась очень высокой – 80 %.

Одним из признаков потенциальной опасности обледенения воздушных судов является наличие быстро развивающихся гроз – RDT (Rapid Developing Thunderstorm) [13]. В Метео-Франс была разработана система наукастинга RDT в поддержку проекта HAIC. Процесс формирования RDT описывается с помощью информации геостационарных спутников с привлечением данных численного прогноза погоды и, по возможности, дополнительной информации из наблюдений (тип облака, давление на вершине, интенсивность дождя, микрофизика, спутниковый облачный ветер, молнии). Выходная информация содержит подробное описание конвективных объектов: локализацию, характеристики облачной вершины, направление и скорость движения, тренд развития, стадия развития, опасность, активность. В результате проведенных в рамках проекта HAIC летних кампаний был составлен набор продукции для обеспечения технологии выделения зон RDT, потенциально опасных с точки зрения кристаллического обледенения, и передачи этой информации на борт ВС (табл. 3).

Таблица 3. Технологическая основа наукастинга RDT в период кампаний HAIC [13]**Table 3.** Components of RDT nowcasting technique during HAIC campaigns [13]

	Дарвин 2014	Кайенн 2015	Дарвин 2016	Ла Реньюон 2016
Спутник, временное разрешение в мин	MTSAT-1R, 10'	MSG, 15'	Himawari-8, 20'	Meteosat-7, 30'
Версия RDT частота	Версия 2012 Модель ЧПП Arpege	Версия 2013 Модель ЧПП Arpege	Версия 2013 Модель ЧПП Arpege	Версия 2013 Модель ЧПП Arpege
Тропическое вынуждение	Нет	нет	Да (-75°C)	Да (-75°C)
Спутниковые каналы (мкм)	6.7, 10.8	6.2, 7.3, 8.7, 10.8, 12.0 0.6	6.2, 7.3, 8.7, 10.8, 12.0, 0.6	6.2, 7.3, 8.7, 10.8, 12.0, 0.6
Другие продукты NWCSAF (наукастинга спутниковых приложений)	Cloud products	Cloud products	Cloud products	
Сеть грозопеленгаторов	Нет	Starnet (используется для описания конвекции, не для разделения наличия/ отсутствия конвекции)	Нет	ATD (используется для описания конвекции, не для разделения наличия/ отсутствия конвекции)
Основные проблемы	Слоты пропусков Схема выделения RDT не на 100% адаптирована под данные MTSAT-1R	Параллаксный край	Алгоритм RDT Схема выделения RDT не на 100% адаптирована под данные Himawari-8	
Передача на борт исследовательского ВС	Только подготовка	Да	Да	Да

Кроме описанной выше продукции, для анализа привлекалась информация с бортов ВС о ТАТ и о статической температуре воздуха, а также данные изокинетических проб, содержащих информацию о размерах и концентрациях ледяных частиц. По итогам объективной верификации, когда содержание IWC сравнивалось с развитием конвективных ячеек (в тот же временной промежуток или с учетом некоторого предыдущего времени (до 1 ч), чтобы учесть “blinking effect” – эффект мерцания RDT), было

установлено, что выделение зон RDT позволяет довольно успешно обнаруживать зоны высокого содержания ледяных кристаллов (табл. 4).

Таблица 4. Характеристики успешности алгоритма RDT в период кампаний HAIC [13]

Table 4. Skill statistics of RDT algorithm during HAIC campaigns [13]

Кампания HAIC	Предупрежденность наличия явления	Отношение ложных тревог	Число рейсов
Дарвин 2014	0.84	0.69	16
Кайенн 2015	0.71	0.72	16
Дарвин 2016	0.51	0.68	2
Реюнион 2016	0.73	0.32	3

Недостатком такого метода является высокое количество ложных тревог. В предстоящих летных экспериментах технология наукастинга RDT будет совершенствоваться. KNMI в специальных спутниковых приложениях наукастинга будет применять новое описание микрофизики, разработанное в Метео-Франс. В перспективе есть намерение осуществлять работы по выпуску подобной продукции для всего земного шара.

Заключение

Проблема эффективного предупреждения экипажей воздушных судов о попадании в зоны больших концентраций ледяных кристаллов, способных приводить к серьезным проблемам с двигателями, в настоящее время решается в двух направлениях. Первое – это поиск инженерных решений для полного удаления и предотвращения накопления льда внутри двигателя. Второе направление связано с развитием технологий наукастинга зон активной конвекции, преимущественно на основе спутниковой информации, а также данных радарных наблюдений и выходной продукции моделей ЧПП.

До тех пор, пока кардинальное решение задачи не получено, выпускаются рекомендации для пилотов ВС по уклонению от областей с высокой концентрацией малых ледяных частиц [7]. Прежде всего они связаны с эффективной эксплуатацией бортового погодного радара. Высокая отражаемость от капель дождя ниже эшелона самолета, связанная с конвективными ячейками, может быть хорошим индикатором высокой концентрации ледяных частиц наверху, учитывая, что этот дождь часто формируется из падающих частиц льда. На больших высотах пилот должен наклонить радар вниз, чтобы просканировать нижний регион с высокой отражаемостью для определения существования и положения конвективной ячейки и оценить высоту области с высокой отражаемостью. Кроме того, следует предположить, что ледяные кристаллы на больших

высотах могут продолжать свое существование в течение еще некоторого времени после фазы активной конвекции, когда облачность, которая их произвела, уже разгулилась.

Если вершина конвективной ячейки невидима, можно допустить, что она превышает круизную высоту ВС, и ячейку следует обойти по кругу. При этом пилотам советуют не обходить ячейки сверху и избегать районов высокой отражаемости более чем на обычно рекомендованные 20 морских миль (рекомендуется дистанция 50 морских миль). Полет следует выполнять с наветренной стороны ячейки, чтобы избежать распространяющейся с подветренной стороны наковальни и ограничить воздействие высокой концентрации ледяных частиц. В качестве предупредительной меры при полетах в тропиках в период начального снижения с эшелонов на больших высотах рекомендовано использовать режим тяги двигателя выше полетного малого газа для увеличения температуры внутри двигателя и уменьшения возможности накопления льда.

Список литературы

1. Шакина Н.П., Иванова А.Р. Прогнозирование метеорологических условий для авиации. М.: Триада лтд, 2016. 312 с.
2. Шакина Н.П., Горлач И.А., Скриптунова Е.Н., Комасько Н.И. Обледенение двигателей самолета в кристаллических облаках: анализ случая // Метеорология и гидрология. 2014. № 2. С. 85-91.
3. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р. Условия выпадения замерзающих осадков в некоторых аэропортах России и СНГ. I. Аэропорты московского аэроузла // Метеорология и гидрология. 2003. № 6. С. 40-58.
4. Defer E., Calmels A., De Laat J. et al. An overview of High Altitude Ice Crystals (HAIC) satellite and nowcasting activities // Proceedings of the WMO Aeronautical Meteorology Scientific Conference 2017, Toulouse, France, 6-10 Nov 2017, p1-170 – p1-171.
5. Defer E., Delanoë J., Nohra R., Parol F., Protat A., Vanbauce C. Low orbiting spaceborne High IWC retrievals in the framework of the European HAIC project: from case studies to regional and seasonal distribution // Proceedings of the WMO Aeronautical Meteorology Scientific Conference 2017, Toulouse, France, 6-10 Nov 2017, p1-172 – p1-173.
6. De Laat J., Meirink J.F., Defer E. et al. An operational geostationary satellite data product for detection High Ice Water Content (HIWC) // Proceedings of the WMO Aeronautical Meteorology Scientific Conference 2017, Toulouse, France, 6-10 Nov 2017, p. 1-35.
7. Grzych M.L. Avoiding convective weather linked to ice crystals icing engine events. [Электронный ресурс]. URL: <https://skybrary.aero/bookshelf/books/2687.pdf>
8. Haggerty J., Potts R.A. High Ice Water Content (HIWC) nowcasting trial exercise for enhanced situational awareness and decision-making support // Proc. WMO Aeronautical Meteorology Scientific Conference 2017, Toulouse, France, 6-10 Nov 2017, p1-11–p1-15.
9. Ice Formation and Evolution in Clouds and Precipitation: Measurement and Modeling Challenges // AMS Meteor. Monogr. Vol. 58, doi:10.1175/AMSMONOGRAPHS-D-16-0011.1.
10. Leroy D., Fontaine E., Schwarzenboeck A., Strapp J.W. Ice Crystal Sizes in High Ice Water Content Clouds. Part I: On the Computation of Median Mass Diameter from In Situ Measurements // J. Atm. Ocean. Tech. 2016. Vol. 33. P. 2461-2475.
11. Mason J.G., Grzych M. The challenges identifying Weather Associated With Jet Engine Ice Crystal Icing // SAE 2011 International Conference on Aircraft and Engine Icing and Ground Deicing, Chicago, Illinois, June 12–17, 2011.

12. Mason J.G., Strapp J.W., Chow P. The Ice Particle Threat to Engines in Flight // 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 9–12 January 2006, Reno, Nevada, AIAA 2006-206. P. 1-21.
13. Moisselin J-M., Le Bot C., Rieu P. et al. The use of rapidly developing thunderstorm (RDT) in the High Altitude Ice-Crystals (HAIC) project // Proc. WMO Aeronautical Meteorology Scientific Conference 2017, Toulouse, France, 6-10 Nov 2017, p1-16–p1-23.
14. Ng Y-L., Law H.F., Lee J.C.W. et al. Satellite detection and nowcasting High Altitude Ice Crystals // Proc. WMO Aeronautical Meteorology Scientific Conference 2017, Toulouse, France, 6-10 Nov 2017, p1-24–p1-28.
15. Norde E., van der Weide E.T.A., Hoeijmakers H.W.M. Eulerian method for in-engine icing with application to ice crystal trajectories and impact in a generic turbofan compressor // Proc. 30th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, DCC, Daejeon, Korea: ICAS, September 25-30, 2016, p. 222-234.
16. Protat A., Rauniyar S., Kumar V. V., Strapp J. W. Optimizing the Probability of Flying in High Ice Water Content Conditions in the Tropics Using a Regional-Scale Climatology of Convective Cell Properties // J. Appl. Meteorol. Clim. 2014. Vol. 53. P. 2438-2456.
17. Protat A., Delanoë J., Strapp J.W. et al. The Measured Relationship between Ice Water Content and Cloud Radar Reflectivity in Tropical Convective Clouds /. J. Appl. Meteorol. Clim. 2016. Vol. 55. P. 1707-1729.
18. Veillette P.R. High-Altitude Ice Crystal Icing. [Электронный ресурс]. URL: <http://aviationweek.com/bca/high-altitude-ice-crystal-icing>.
19. Wu D.L., Read W.G., Dessler A.E., Sherwood S.C., Jiang J.H. UARS/MLS Cloud Ice Measurements: Implications for H₂O Transport near the Tropopause // J. Atmosph. Sci. 2005. Vol. 62. P. 518-530.

References

1. Shakina N.P., Ivanova A.R. Prognozirovanie meteorologicheskikh uslovii dlya aviatsii [Weather forecasting for aviation]. Moscow: Triada ltd Publ., 2017, 166 p. [in Russ.].
2. Shakina N.P., Gorchach I.A., Skriptunova E.N., Komashko N.I. Icing of aircraft engines in ice crystal clouds: a case study. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2014, vol. 39, no. 2. pp. 121-125.
3. Shakina N.P., Skriptunova E.N., Ivanova A.R. Conditions associated with freezing precipitation at airports of Russia and the CIS. 1. Airports of the Moscow air zone. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2003, no. 6. pp. 28-43.
4. Defer E., Calmels A., De Laat J. et al. Delanoë J., Dezitter F., Gounou A., Huet F., Le Bot C., Meirink J. F., Moisselin J-M., Nohra R., Parol F., Protat A., Rieu P., Turner S., Vanbauce C. An overview of High Altitude Ice Crystals (HAIC) satellite and nowcasting activities. *Proc. 2017 WMO Aeronautical Meteorology Scientific Conference*, Toulouse, France, 6-10 Nov 2017, p1-170-p1-171.
5. Defer E., Delanoë J., Nohra R., Parol F., Protat A., Vanbauce C. Low orbiting spaceborne High IWC retrievals in the framework of the European HAIC project: from case studies to regional and seasonal distribution. *Proc. WMO Aeronautical Meteorology Scientific Conference 2017*, Toulouse, France, 6-10 Nov 2017, p1-172-p1-173.
6. De Laat J., Meirink J.F., Defer E., Delanoë J., Dezitter F., Gounou A., Grandin A., Moisselin J-M, Paril F., Turner S., Vanbauce C. An operational geostationary satellite data product for detection High Ice Water Content (HIWC). *Proc. WMO Aeronautical Meteorology Scientific Conference 2017*, Toulouse, France, 6-10 Nov 2017, pp. 1-35.
7. Grzych M.L. Avoiding convective weather linked to ice crystals icing engine events, available at: <https://skybrary.aero/bookshelf/books/2687.pdf>
8. Haggerty J., Potts R.A. High Ice Water Content (HIWC) nowcasting trial exercise for enhanced situational awareness and decision-making support. *Proc. WMO Aeronautical Meteorology Scientific Conference 2017*, Toulouse, France, 6-10 Nov 2017, p1-11-p1-15.
9. Ice Formation and Evolution in Clouds and Precipitation: Measurement and Modeling Challenges. *AMS Meteor. Monogr.* Vol. 58, doi:10.1175/AMSMONOGRAPHS-D-16-0011.1.

10. Leroy D., Fontaine E., Schwarzenboeck A., Strapp J.W. Ice Crystal Sizes in High Ice Water Content Clouds. Part I: On the Computation of Median Mass Diameter from In Situ Measurements. *J. Atm. Ocean. Tech.*, 2016, vol. 33, pp. 2461-2475
11. Mason J.G., Grzych M. The challenges identifying Weather Associated With Jet Engine Ice Crystal Icing. *SAE 2011 International Conference on Aircraft and Engine Icing and Ground Deicing*, Chicago, Illinois, June 12–17, 2011.
12. Mason J.G., Strapp J.W., Chow P. The Ice Particle Threat to Engines in Flight. *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 9-12 January 2006, Reno, Nevada, AIAA 2006-206, pp. 1-21.
13. Moisselin J-M., Le Bot C., Rieu P., Gounou A., Defer E., De Laat J. The use of rapidly developing thunderstorm (RDT) in the High Altitude Ice-Crystals (HAIC) project. *Proc. WMO Aeronautical Meteorology Scientific Conference 2017*, Toulouse, France, 6-10 Nov 2017, p1-16 – p1-23.
14. Ng Y-L., Law HF., Lee JCW., Hon K-K., Li LO., Li P-W. Satellite detection and now-casting High Altitude Ice Crystals. *Proc. WMO Aeronautical Meteorology Scientific Conference 2017*, Toulouse, France, 6-10 Nov 2017, p1-24-p1-28.
15. Norde E., van der Weide E.T.A., Hoeijmakers H.W.M. Eulerian method for in-engine icing with application to ice crystal trajectories and impact in a generic turbofan compressor. *Proc. 30th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences*, DCC, Daejeon, Korea: ICAS, September 25-30, 2016, pp. 222-234.
16. Protat A., Rauniyar S., Kumar V.V., Strapp J.W. Optimizing the Probability of Flying in High Ice Water Content Conditions in the Tropics Using a Regional-Scale Climatology of Convective Cell Properties. *J. Appl. Meteorol. Clim.*, 2014, vol.53, pp. 2438-2456.
17. Protat A., Delanoë J., Strapp J. W., Fontaine E., Leroy D., Schwarzenboeck A., Lilie L., Davison C., Dezitter F., Grandin A., Weber M. The Measured Relationship between Ice Water Content and Cloud Radar Reflectivity in Tropical Convective Clouds. *J. Appl. Meteorol. Clim.*, 2016, vol.55, pp. 1707-1729.
18. Veillette P.R. High-Altitude Ice Crystal Icing, available at: <http://aviationweek.com/bca/high-altitude-ice-crystal-icing>.
19. Wu D.L., Read W.G., Dessler A.E., Sherwood S., Jiang J.H. UARS/MLS Cloud Ice Measurements: Implications for H₂O Transport near the Tropopause. *J. Atmosph. Sci.*, 2005, vol. 62, pp. 518-530.

Поступила в редакцию 5.05.2018 г.
Received by the editor 5.05.2018.