

ОТЗЫВ

официального оппонента Репиной Ирины Анатольевны о диссертационной работе Шишова Андрея Евгеньевича «Обнаружение и наукастинг по спутниковым данным условий обледенения двигателей самолетов на верхних уровнях в зонах глубокой конвекции с применением машинного обучения», представленной к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.18- Науки об атмосфере и климате.

Диссертационная работа Шишова Андрея Евгеньевича посвящена исследованию условий обледенения двигателей летательных аппаратов при наличии мощной конвективной облачности, разработке методик их распознавания и прогноза. В работе решались следующие задачи: разработка метода автоматического распознавания облачности глубокой конвекции на основе применения порогового подхода к данным измерений геостационарных спутников за восьмилетний период; создание базы данных распознанной облачности как основного условия образования зон высокого риска обледенения и её анализ; разработка алгоритма распознавания зон высокого риска обледенения в слое верхней границе облачности на основе применения методов машинного обучения; разработка методики прогноза смещения обнаруженных зон конвективной облачности и системы визуализации комплекса исходных данных и результатов распознавания опасных для полетов условий обледенения; валидация методик распознавания по независимым данным.

Актуальность темы диссертации

Представленная диссертационная работа посвящена решению важной научно-практической проблемы, связанной с обеспечением безопасности авиаполетов. Явление обледенения авиационных двигателей в зонах высокой концентрации ледяных кристаллов на верхних уровнях в облачности глубокой конвекции (ОГК) представляет серьезную угрозу, что подтверждается рядом зафиксированных инцидентов. В условиях наблюдаемых климатических изменений и роста интенсивности конвективных процессов данная проблема приобретает особую значимость.

Автор обоснованно указывает на отсутствие в Российской Федерации оперативных систем прогнозирования данного опасного явления, что делает разработку соответствующих методик и алгоритмов востребованной. Использование спутниковых данных, обладающих глобальным охватом и высоким временным разрешением, в сочетании с современными методами машинного обучения является перспективным и актуальным направлением.

Научная новизна

Научная новизна работы убедительно продемонстрирована в тексте и заключается в следующем:

Впервые для Европейской территории России разработан комплексный объектно-ориентированный подход к автоматическому детектированию области глубокой конвекции (ОГК) и связанных с ней зон высокого риска обледенения двигателей по данным геостационарных спутников.

Разработана и реализована методика, комбинирующая классические пороговые методы с алгоритмами машинного обучения, что позволило существенно повысить качество распознавания по сравнению с существующими аналогами.

Впервые для указанного региона получена и проанализирована статистика характеристик ОГК (размеры, продолжительность жизни), что имеет самостоятельную ценность для наук об атмосфере.

Впервые в отечественной практике применен метод оптического потока для наукастинга (краткосрочного прогноза) смещения выделенных объектов ОГК, что является ключевым для оперативного предупреждения экипажей.

Создана и внедрена в оперативную практику Гидрометцентра России интегрированная экспертная система мониторинга (СМОГК и СМОГК-2), зарегистрированная в качестве результатов интеллектуальной деятельности.

Достоверность результатов подтверждается публикациями в авторитетных профессиональных изданиях, регистрацией результатов интеллектуальной деятельности, выступлениями автора на научных конференциях.

Личный вклад автора адекватно представлен в тексте диссертации и реферата, где отражено участие соавторов и даны корректные ссылки на предыдущие исследования. Все вынесенные на защиту положения и научные результаты, представленные в диссертационной работе, получены лично автором. Автору принадлежит ведущая роль в постановке задач, подготовке научных публикаций и докладов на конференциях, симпозиумах, семинарах и т.д.

Во **Введении** обосновывается актуальность работы, формулируются её цели и задачи, кратко излагается содержание диссертации.

В первой главе представлен всесторонний аналитический обзор проблемы обледенения авиационных двигателей в зонах с высокой концентрацией ледяных кристаллов. Рассмотрены физические основы процесса, метеорологические условия, способствующие обледенению, а также существующие методы и алгоритмы дистанционного обнаружения опасных зон по спутниковым данным. Автор делает вывод о том, что наиболее вероятные условия обледенения формируются в кристаллической части облачности глубокой конвекции (ОГК), особенно в областях пробивания тропопаузы, и обосновывает необходимость разработки собственного алгоритма для территории России ввиду отсутствия отечественных аналогов и репрезентативных данных прямых измерений.

Вторая глава является методическим ядром работы, в которой детально описана разработанная автором комплексная технология автоматического детектирования и мониторинга ОГК. Методика включает: объектно-ориентированный пороговый метод первичного выделения конвективных ячеек по данным геостационарных спутников, алгоритм трекинга для отслеживания их жизненного цикла, а также применение методов машинного обучения для классификации объектов на подтвержденные и неподтвержденные опасными явлениями с

использованием большого набора статических и динамических параметров верхней границы облаков. Также представлены методы детектирования областей пробивания тропопаузы и наукастинга смещения ОГК с помощью оптического потока, и дано описание созданной экспертной веб-системы (СМОГК).

В третьей главе представлены результаты практической апробации разработанных методик на обширном массиве данных за 2013-2020 годы. Проведен статистический анализ характеристик ОГК (размеры, продолжительность жизни) для Европейской территории России, показавший преобладание короткоживущих объектов, но и наличие мощных долгоживущих мезомасштабных систем. Оценка качества работы моделей машинного обучения на независимой выборке показала высокую предупредительность (около 91%) при относительно низкой доле ложных тревог (около 13%), что превосходит многие зарубежные аналоги. На примере нескольких детально разобранных случаев (включая случай с данными натурных измерений) продемонстрирована эффективность системы СМОГК для анализа эволюции ОГК и идентификации зон, где наблюдались условия, благоприятные для обледенения двигателей.

В **Заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертации. Результаты диссертации изложены в 16 работах автора, 2 из которых – статьи, опубликованные в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, 6 публикаций в материалах международных, всероссийских, научно-практических и региональных конференций, оформлено 4 свидетельства РОСПАТЕНТА о государственной регистрации программ для ЭВМ

Основные замечания к работе:

Ряд замечаний носят скорее редакционный характер.

В диссертации отсутствуют сведения, в каких публикациях отражены основные выводы диссертации и материалы её глав.

Формулировка положений, выносимых на защиту, предполагает четкую формулировку собственно результата. Слова «разработана», «создана», «определены» применяться не должны. «Представленные результаты сопоставлены с наземными наблюдениями за опасными явлениями погоды» - это процесс работы, но не результат.

Замечания по существу:

1. В работе обоснованно констатируется отсутствие в России репрезентативной базы данных прямых измерений содержания ледяных кристаллов в ОГК, аналогичной базам, созданным в рамках зарубежных проектов (HAIC-HIWC, NASA HIWC). В связи с этим, валидация алгоритмов производилась опосредованно, через связь с приземными опасными явлениями (ОЯ). Возникает вопрос: насколько надежна такая косвенная валидация для непосредственной цели работы – детектирования именно условий обледенения двигателей на больших высотах, которые могут не всегда сопровождаться ОЯ у земли? Не приводит ли это к недооценке числа опасных для авиации ситуаций?
2. В работе представлены высокие показатели корреляции последовательных векторов смещения. Однако не в полной мере освещена оценка абсолютной точности наукастинга положения ОГК на

упреждение 60-90 минут. Каковы ошибки прогноза положения контуров через 1-2 часа по сравнению с фактическими данными? Как эти ошибки могут повлиять на практическую ценность рекомендаций для обхода опасных зон?

3. Автор указывает, что разработанные методики адаптированы для данных спутников «Электро-Л» и «Арктика-М». В то же время, основное обучение и валидация моделей машинного обучения проводились на архиве данных Meteosat SEVIRI. Насколько результаты, полученные на данных российских спутников, сопоставимы по качеству с результатами для Meteosat? Требуют ли российские данные дополнительной калибровки или дообучения моделей ввиду возможных различий в характеристиках приборов? Представленный на рис. 10 пример визуализации с использованием данных российских спутников дает только качественную информацию.

4. В работе использованы сложные модели, такие как градиентный бустинг и нейронные сети, которые часто являются «черными ящиками». Были ли проанализированы ключевые предикторы (параметры ВГО), вносящие наибольший вклад в классификацию? Это помогло бы не только лучше понять физические процессы, но и упростить модель для оперативного использования.

5. Случай 10.05.2015. В анализе данного случая показано, что высокая концентрация ледяных кристаллов наблюдалась в т.ч. на стадии распада ОГК. Как созданная система отличает такие «неклассические» опасные зоны от безопасной перистой облачности, которая также может иметь схожие температурные характеристики на ВГО?

Представленные замечания не влияют на общее положительное впечатление от работы. В работе проведен анализ обширного материала спутниковых измерений. Разработан и верифицирован новый алгоритм для определения и прогноза зон обледенения двигателей летательных аппаратов.

Диссертационная работа Шишова А.Е. является законченной научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно на хорошем научном и техническом уровне. В работе приведены интересные и важные с практической точки зрения исследования зон образования ледяных кристаллов в кучевой облачности. В работе приведены научные результаты, позволяющие квалифицировать её как законченное и значимое научное исследование. Полученные автором результаты имеют новый уровень, являются достоверными, а выводы и заключения обоснованными.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертационного исследования.

Диссертационная работа Шишова Андрея Евгеньевича «Обнаружение и наукастинг по спутниковым данным условий обледенения двигателей самолетов на верхних уровнях в зонах глубокой конвекции с применением машинного обучения» является самостоятельной работой. Содержание диссертации полностью соответствует паспорту специальности 1.6.18 – «Науки об атмосфере и климате» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определённым Положением о присуждении учёных степеней, утверждённым постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 года.

Официальный оппонент:
Репина Ирина Анатольевна

Доктор физико-математических наук по специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы, профессор РАН, главный научный сотрудник, заместитель директора по научно-техническому развитию Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук,
119017, г. Москва, Пыжевский пер. 3
e-mail. repina@ifaran.ru
Тел. +7(495)951-85-49

Выражаю свое согласие на обработку моих персональных данных и включение их в аттестационные документы соискателя ученой степени кандидата физико-математических наук Шишова А.Е.

«25» сентября 2025 г.

Подпись И.А. Репиной заверяю:

Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института физики атмосферы им. А.М. Обухова
Российской академии наук (ИФА им. А.М. Обухова РАН)

Киселева Юлия Викторовна

