

На правах рукописи



Шишов Андрей Евгеньевич

**ОБНАРУЖЕНИЕ И НАУКАСТИНГ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ С
ПРИМЕНЕНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ УСЛОВИЙ ОБЛЕДЕНЕНИЯ
ДВИГАТЕЛЕЙ САМОЛЁТОВ НА ВЕРХНИХ УРОВНЯХ В ЗОНАХ
ГЛУБОКОЙ КОНВЕКЦИИ**

1.6.18 – Науки об атмосфере и климате

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации», в отделе численных краткосрочных прогнозов Регионального специализированного метеорологического центра Москва, в лаборатории детализированных численных прогнозов погоды.

Научный руководитель: **Горлач Ирина Андреевна,**
кандидат географических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации»

Официальные оппоненты: **Репина Ирина Анатольевна,**
доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук»

Саворский Виктор Петрович,
кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова»

Защита диссертации состоится 14 октября 2025 г. в 15 часов на заседании Диссертационного совета 26.1.002.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации» (ФГБУ «Гидрометцентр России») по адресу: 123376, Россия, г. Москва, Большой Предтеченский переулок, д. 11.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБУ «Гидрометцентр России» и на сайте <https://meteoinfo.ru>

Автореферат разослан «__»_____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



М.В. Шатунова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Современные исследования свидетельствуют об ускорении темпов потепления климата. Соответственно, наблюдается усиление процессов развития опасных кучево-дождевых облаков и мощных мезомасштабных конвективных систем (МКС). Облачность МКС провоцирует опасные явления - сильный ливень, град, шквал, гроза и торнадо. Необходим поиск эффективных методов диагноза и прогнозирования процессов развития облачности глубокой конвекции (ОГК).

Наблюдаются бурное развитие техники, увеличение числа маршрутов и повышение высот полетов воздушных судов. Необходимость перелетов создает ситуации попадания пассажирских судов в условия полетов в кристаллической части ОГК. При обходе самолетами систем МКС на больших высотах повысилось число случаев обледенения двигателей в ОГК с выбросами опасных скоплений ледяных кристаллов. Наиболее часто обледенение воздушных судов в кристаллической части кучево-дождевых облаков (на верхней границе - ВГО) фиксировалось в тропических широтах, но его повторяемость повысилась, а география стала намного шире – дело скорее в отсутствии регулярных наблюдений. Поэтому проблема остается актуальной и для умеренных широт вместе с необходимостью дальнейших исследований.

Цели и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы является разработка методик распознавания и наукастинга условий обледенения двигателей летательных аппаратов в облачности глубокой конвекции на больших высотах.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Создание метода автоматического распознавания ОГК на основе применения порогового подхода к данным измерений геостационарных МИСЗ за восьмилетний период для выборки “первого приближения”.
2. Создание базы данных характерных признаков и дополнительных параметров, распознанных ОГК как основного условия образования зон высокого риска обледенения, и их анализ.

3. Создание нового алгоритма распознавания зон высокого риска обледенения в слое ВГО ОГК на основе применения методов машинного обучения.
4. Разработка методики прогноза смещения обнаруженных зон ОГК.
5. Разработка системы визуализации комплекса исходных данных и результатов распознавания опасных для полетов условий обледенения.
6. Валидация методик распознавания ОГК по независимым данным.

Научная новизна

1. Разработан оригинальный алгоритм объектно-ориентированного детектирования облачности глубокой конвекции, связанной с повышенным риском обледенения двигателей воздушных судов, над Европейской территорией России (ЕТР) по данным геостационарных спутников с высоким временным разрешением.
2. Впервые для ЕТР и сопредельных государств представлена статистическая оценка распределения характерных масштабов (размеров ВГО) и продолжительности жизни ОГК по спутниковой информации для умеренных широт над сушей.
3. Впервые в РФ применен метод оптического потока для оценки вектора смещения выделенных автоматически объектов облачности глубокой конвекции.

Научная и практическая значимость

1. Разработка метода объектно-ориентированного детектирования облачности глубокой конвекции и связанных с ней рисков обледенения двигателей воздушных судов имеет важное значение для обеспечения безопасности полётов.
2. Мониторинг и динамическая оценка эволюции облачных систем: результаты исследований могут использоваться для оперативного мониторинга и оценки изменений в структуре и положении облачности, что существенно улучшит качество краткосрочного прогнозирования погоды и позволит точнее предсказывать развитие опасных метеорологических явлений.
3. Интеграция спутниковой и синоптической информации: применение современных интерактивных веб-технологий для визуализации спутниковых данных, синоптических наблюдений, радарных измерений и выходных полей численных моделей (например,

COSMO-Ru, ICON-Ru) открывает новые возможности для комплексного анализа метеорологической ситуации.

4. Прогнозирование опасных условий для авиации: создание системы наукастинга опасных условий в зонах облачности глубокой конвекции значительно повышает оперативность реагирования на изменения быстроменяющихся условий в облачности ОГК.
5. Две версии системы СМОГК зарегистрированы в Роспатенте как результаты интеллектуальной деятельности (РИД). Получены соответствующие свидетельства и акты применения программной реализации для работы синоптиков Гидрометцентра РФ (акты внедрения № ПР/202212 от 01.11.2022, № ПР/2024/32 от 18.11.2024). Список свидетельств и актов внедрения подтверждает практическую значимость проведенных исследований.
6. Разработанная система открыта как для интеграции с существующими системами наблюдений и баз данных, так и на возможность использования в различных службах, включая Гидрометцентр, ЦГМС, АМСГ, АМЦ на основе организованных реализаций и использования интернет-технологии.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработана методика автоматического распознавания облачности глубокой конвекции (ОГК) с выделением областей пробивания тропопаузы (ОТ) на верхних уровнях на основе комплекса пороговых методов и методов машинного обучения для определения основных условий высокого риска обледенения двигателей воздушных судов в пределах слоя верхней границы ОГК по информации геостационарных МИСЗ с высоким временным разрешением.
2. Разработана методика наукастинга направления и скорости смещения контуров верхней границы ОГК и областей пробивания тропопаузы на основе спутниковой информации и применения метода оптического потока. Применение методики наукастинга позволяет выбирать своевременно безопасный маршрут полета и быстро реагировать из-за большой изменчивости процессов ОГК.
3. Создана интерактивная Система мониторинга ОГК (СМОГК и новая версия СМОГК-2) для исследований и оперативной оценки условий высокого риска обледенения двигателей. Система включает как комплекс средств, реализующих расчеты по разработанным методикам, так и оперативную версию визуализации на основе web-

технологии при интеграции исходных данных наблюдений МИСЗ, синоптических наземных наблюдений, радарных наблюдений и основных выходных полей моделей ЧПП ICON-Ru6N29, COSMO-Ru6ENA, COSMO-Ru2ETP.

4. Определены статистические особенности распределения характерных масштабов размеров и продолжительности жизни ОГК, выявленной по спутниковой информации на основе предложенных методик как наиболее вероятных условий обледенения двигателей для Европейской территории России и сопредельных государств в умеренных широтах. Представленные результаты сопоставлены с наземными наблюдениями за опасными явлениями погоды.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных семинарах и конференциях: Общеинститутские семинары Гидрометцентра РФ, 20-я Международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2022), Международная конференция «Вычислительно-информационные технологии для наук об окружающей среде» (Москва, 2023), 21-я Международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2023), 22-я Международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2024), Всероссийская конференция с международным участием «Турбулентность, динамика атмосферы и климата» (Москва, 2024).

Достоверность и обоснованность результатов

1. Сравнение с независимыми данными: результаты распознавания (классификации) облачности глубокой конвекции сопоставлялись с данными о неблагоприятных погодных условиях из базы данных сети синоптических наблюдений в формате SYNOP, METAR и Европейской базы данных наблюдений добровольцев (ESWD). Проведена объективная оценка качества прогнозов. Высокие значения показателя предупрежденности при низкой доле ложных тревог свидетельствуют о достаточно высокой успешности применения разработанных методов детектирования.

2. Аналитический обзор научных публикаций, приводимый список источников экспериментальных и концептуальных анализов подтверждают наличие высокого риска обледенения двигателей воздушных судов на верхних уровнях облачности глубокой конвекции, что дополнительно подтверждается в выводах и рекомендациях, сделанных в ходе данного исследования по дистанционным данным.
3. Проведён детальный анализ ряда случаев облачности глубокой конвекции на основе применения методических расчетов. Продемонстрирована эффективность предложенных методик в реальных условиях. Подтверждена корректность используемых подходов и их применимость в практической деятельности.
4. Публикации в рецензируемых журналах: работы, связанные с диссертацией, были опубликованы в ведущих научных изданиях, прошедших процедуру рецензирования.
5. Доклады на научных мероприятиях: результаты исследования были представлены на многочисленных международных и всероссийских научных конференциях, и семинарах, где получили положительную оценку со стороны экспертов и коллег.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 16 работ, в том числе 2 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных в действующем перечне Высшей аттестационной комиссией (ВАК), 6 публикаций в материалах международных, всероссийских, научно-практических и региональных конференций, оформлено 4 свидетельства РОСПАТЕНТА о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад автора

Личный вклад автора в выполнение данной диссертационной работы включает анализ существующих методик распознавания зон высокого риска обледенения двигателей воздушных судов, реализацию и валидацию алгоритмов обнаружения и прогнозирования облачности глубокой конвекции на основе данных метеорологических спутников, а также совместную с соавторами программную реализацию методик для оперативной обработки спутниковых данных. Важным аспектом вклада стало участие в разработке и проведении валидации алгоритма детектирования облачности глубокой конвекции, что обеспечило

высокую точность и надежность предложенных методов. Кроме того, автор активно участвовал в подготовке и написании научных статей, а также в представлении результатов на научных конференциях и семинарах.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы из 97 наименований, списка терминов, списка сокращений и 5 приложений. Общий объем диссертации составляет 146 страниц. Диссертация содержит 34 рисунка и 17 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, аргументирована новизна исследований, показана практическая и научная значимость работы, представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе диссертации представлено описание проблемы обледенения двигателей воздушных судов, рассматриваются характерные метеорологические условия, способствующие развитию данного явления, а также проводится анализ методов автоматизированного детектирования зон высокого риска обледенения в кристаллических облаках по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и модели численного прогноза погоды (ЧПП).

В разделе 1.1 описаны физические основы явления, история наблюдений и исследований. На основе анализа литературных источников установлено, что все случаи обледенения двигателей самолётов связаны в первую очередь с наличием в атмосфере высокой концентрации мелких ледяных кристаллов. Одним из необходимых защитных решений является своевременное предупреждение об опасных условиях полетов, т.е. разработка методики определения и прогноза благоприятных условий образования данного явления.

В разделе 1.2 подробно рассмотрены различные метеорологические условия, связанные с высоким риском обледенения, согласно измерениям бортовых приборов, опросам пилотов и данным лётных экспериментов, проводимым для измерения содержания ледяных кристаллов в атмосфере. Установлено, что зоны высокого риска обледенения самолётных двигателей формируются в мощной ОГК,

особенно в фазе максимального развития и при пробивании верхней границей облака (ВГО) уровня тропопаузы.

В разделе 1.3 представлен обзор методов автоматизированного распознавания зон с высоким риском обледенения. Анализ зарубежных и российских публикаций по теме показал, что существующие методы характеризуются довольно высокой долей ложных тревог при валидации по непосредственным измерениям. Это связано с несовершенством алгоритмов, с отсутствием репрезентативных данных ввиду малого числа зафиксированных случаев обледенения двигателей, их неполнотой в зависимости от географической зоны и времени года. Отсутствуют и регулярные измерения параметров ВГО (включая лёдность). Поэтому, при создании предлагаемых методов вместо отсутствующих измерений лёдности – предпочтение отдаётся дистанционным наблюдениям и делается упор на распознавании и прогнозе основного объекта условий обледенения двигателей - ОГК, и особенно опасных условий при пробивании ВГО ОГК уровня тропопаузы.

Раздел 1.5 более подробно рассматривает возможность оценки пробивания уровня тропопаузы верхней границей конвективной облачности (ОТ) и методы автоматического детектирования ОТ по данным МИСЗ. Подтверждено, что распознавание областей ОТ на изображениях в видимом канале ЭМ в высоком разрешении (~1 км) возможно только в дневное время. Круглосуточное «видение» наиболее оптимально в случае разработки методов распознавания на основе измерений температуры только в ИК диапазонах излучения, доступных в ночное и дневное время.

Вторая глава посвящена разработке алгоритма распознавания ОГК и областей пробивания уровня тропопаузы как зон высокого риска обледенения двигателей над Европейской частью России и сопредельных территорий по данным геостационарного МИСЗ Meteosat-MSG и модели ЧПП COSMO-Ru. Более того, необходимо оценивать и направление смещения, поэтому для мониторинга и наукастинга ОГК с дискретностью 5 или 15 минут (сроки спутниковых наблюдений) разработана методика прогноза смещения ОГК в течение ближайшего часа.

В разделе 2.1 представлен обзор автоматических методов детектирования и мониторинга ВГО ОГК, являющейся основным условием наличия ледяных кристаллов.

В разделе 2.2 рассмотрены методические аспекты автоматизированного распознавания объектов ОГК по спутниковым измерениям радиационной температуры на основе пороговых значений. В работе учтен ряд порогов в первую очередь в соответствии с работами (Maddox, 1980), (Bedka, 2016, 2019), (Matthee, Mecikalski, 2013). Выбраны диапазоны значений: $T_{ij}^t(10,8) < 233$ (характерный порог температуры ВГО), $[T_{ij}^t(6,2) - T_{ij}^t(10,8)] < -4$ (характерные значения для оценки вертикальной мощности облака), $[T_{ij}^t(6,2) - T_{ij}^t(7,3)] < -4$ (дополнительные характерные значения для оценки ВГО). Процедура бинарного представления исходного массива (срока наблюдения), в виде маски, приводит к разбиению массива данных (2312x1000x3 пикселей) условно на два класса: «конвекция» (наличие ОГК) и «не конвекция» (отсутствие ОГК). Для дальнейшего анализа требуется объединить соседние пиксели класса «конвекция» в группы (кластеры) с помощью применения алгоритмов выделения контуров, таких как алгоритм «следования по границе» (Suzuki, 1984). Результат показан на Рисунке 1.

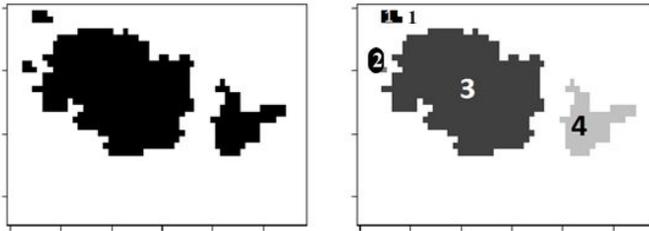


Рисунок 1 – Иллюстрация результата выделения маски ОГК (слева) и объединения в виде отдельных объектов (1,2,3 и 4 справа)

В ряде опубликованных ранее работ отмечалось, что для пороговых методов характерна высокая доля ложных тревог (FAR - False Alarm Rate) – от 50 до 90% в зависимости от методики валидации при значениях предупредённости около 90%. В данной работе предприняты попытки снижения доли ложных тревог с помощью статистического анализа дополнительных параметров верхней границы облака с учётом их динамики.

В разделе 2.3 описана методика трекинга (от англ. tracking – “слежение”), то есть определения связи между объектами, идентифицированными на шаге $t - 1$ и шаге t , для оценки эволюции

ОГК. Методика трекинга заключается в формулировании задачи установления соответствия между объектами в разные моменты времени как оптимизационной с единой целевой функцией и её решении с помощью алгоритма целочисленного программирования (Шишов А.Е, Горлач И.А., 2020).

В разделе 2.4 рассмотрена методика сопоставления данных об опасных явлениях с объектами ОГК с привлечением данных об опасных явлениях (ОЯ) как из стационарных наблюдений в коде КН-01, так и из Европейской Базы Опасных Явлений Погоды (European Severe Weather Database - ESWD). Учитывались сведения из надёжных источников (категория высокого качества QC1) и из научных исследований (категория качества QC2) о следующих типах ОЯ: сильный ветер, смерч, град, сильный ливень, гроза. Учитывая погрешность по пространству в базе ESWD, можно предположить, что k -ое явление могло быть зафиксировано не в самой точке $p_k = (\lambda_k, \phi_k)$, а в некоторой области, в виде окружности заданного радиуса с заданной координатой центра $B_k = \{(\lambda, \phi): (\lambda - \lambda_k)^2 + (\phi - \phi_k)^2 \leq \epsilon_1^2\}$. Величина погрешности по пространству принята равной 30 км. Учитывается погрешность по времени, так как явление могло быть зафиксировано не в момент времени t_k^* , а в интервале времени $[t_k^* - \epsilon_2, t_k^* + \epsilon_2]$, где ϵ_2 - величина погрешности в минутах. В базе ESWD, информация о погрешности по времени была доступна, иногда с точностью до 5-10 минут; а в базе данных SYNOP погрешность выбрана в соответствии с кодом. Объект ОГК считался *подтверждённым* (confirmed, класс ОГКс), если в момент времени t имелось опасное явление с индексом k такое, что выполнялись условия: 1) $|t - t_k^*| \leq \epsilon_2$, 2) $d(C_n^t, p_k) \leq \epsilon_1$, где $d(C_n^t, p_k)$ - расстояние от контура объекта до точки явления. В противном случае, объект ОГК считался *неподтверждённым* (unconfirmed, класс ОГКу). Если условиям удовлетворяло несколько объектов ОГК, то выбирался ближайший по расстоянию $d(C_n^t, p_k)$. Принцип показан на Рисунке 2.

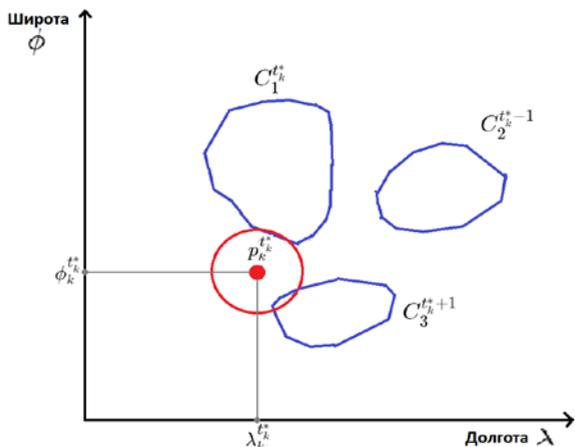


Рисунок 2 – Иллюстрация принципа связи контуров объектов (синие многоугольники) ОГК и опасного явления (красная точка) с учётом погрешности по пространству (красная окружность с радиусом, равным величине погрешности)

В разделе 2.5 перечислены рассчитываемые по завершению процедур распознавания и трекинга ОГК параметры, характеризующие распределение радиационной температуры на ВГО (см. Таблицу 2) и форму (см. Таблицу 3) на каждый срок наблюдения (с дискретностью 15 минут). Далее, для обозначения одной записи в такой базе данных (состояния конкретного объекта на определённый срок наблюдения) будет использоваться термин «наблюдение объекта».

Таблица 2 – Параметры температуры и разностей температуры ВГО ($T_{10.8}$, $(T_{6.2} - T_{10.8})$ и $(T_{6.2} - T_{7.3})$)

Параметр	Интерпретация
Минимальная температура ВГО (К)	Температура шапки или наковальни.
Максимальная температура ВГО (К)	Температура наковальни ОГК.
Средняя температура ВГО (К)	Средняя температура наковальни.
Среднее квадратичное отклонение температуры ВГО (К)	Неравномерность распределения температуры.

Таблица 3 – Параметры формы ВГО: эллипс подбирается с помощью метода наименьших квадратов, моменты Хью рассчитываются по формулам

Параметр	Интерпретация
Площадь (кв. км)	Размер объекта (площадь).
Длина малой оси описывающего эллипса (км)	Размер объекта (диаметр).
Длина большей оси описывающего эллипса (км)	Размер объекта (диаметр).
Угол наклона описывающего эллипса	Вытянутость объекта относительно координаты X.
Эксцентриситет описывающего эллипса	Степень вытянутости объекта.
Момент Хью 1-7-го порядков	Тип формы: окружность, прямоугольник и т.п. (инвариантны относительно перемещения, масштабирования и вращения).

Параметры распределения температуры ВГО и формы контуров объектов были отнесены к категории статических, так как они описывают состояние объекта ОГК в момент измерения. Учитывая большую изменчивость облачных параметров, важно было учитывать характеристики и в предыдущие моменты времени, то есть фиксировать историю изменения статических показателей. С этой целью в выборку добавлены: изменение температуры (в Кельвинах), изменение показателя плотности и моментов Хью (показатели безразмерные), изменение диаметра и площади эллипса, описывающего форму объекта (относительные, в долях), средние значения каждого из трёх предыдущих величин за последний час (скользящее среднее). Перечисленные параметры описывают состояние ОГК и могут быть использованы для уточнения результатов применения пороговых методов счёт введения дополнительных критериев классификации объектов на классы ОГКс и ОГКи. Выбор релевантных пороговых значений для них – задача нетривиальная; необходим подробный статистический анализ. Количество показателей и объём данных велики, поэтому задача распознавания объектов класса ОГКс была решена с помощью методов машинного обучения.

В разделе 2.6 описана методика совершенствования порогового алгоритма распознавания ОГК с помощью машинного обучения. В качестве обучающей выборки используются параметры ВГО ОГК из раздела 2.6 и соотнесённые по времени и пространству наблюдения ОЯ

по методике из **раздела 2.4**. Для решения задачи классификации использовались статистические модели: 1) градиентный бустинг (Gradient Boosting Model), представляющего собой построенный последовательно ансамбль деревьев решений и известного высокой эффективностью в задачах со структурированными (табличными) данными; 2) полносвязная искусственная нейронная сеть (ИНС) с тремя слоями; 3) логистическая регрессии, менее склонная к переобучению ввиду меньшего количества подбираемых параметров (задача минимизации функции потерь проще, риск переобучения ниже). Оценка вклада динамических показателей в качество классификации проводилась по моделям, обученным в двух конфигурациях: динамической (использованы все 122 предиктора, включающих изменения по времени, т.е. динамические) и статической (без динамических предикторов).

В **разделе 2.7** описывается подход к оценке согласованности классов, прогнозируемых моделями классификации, с фактическими классами объектов ОГК. На первом этапе оценка вероятности принадлежности объекта к классу ОГКс преобразовывается с учётом номера класса методом отсечения: если значение коэффициента превышает заданное пороговое значение γ , то объект относится к классу ОГКс (1), иначе – к классу ОГКу (0). Далее, рассчитываются следующие величины по данным каждой из двух выборок (обучающей и контрольной): TP (True Positive) – количество объектов ОГК, верно классифицированных как ОГКс; TN (True Negative) – количество объектов ОГК, верно классифицированных как ОГКу; FP (False Positive) – количество объектов ОГК, ошибочно классифицированных как ОГКс; FN (False Negative) – количество объектов ОГК, ошибочно классифицированных как ОГКу. На основе вычисленных значений рассчитаны относительные показатели качества: доля ложных тревог $FAR = \frac{FP}{TN+FP}$ и вероятность распознавания $POD = \frac{TP}{TP+FN}$. Для выбора оптимального порога γ по данным обучающей выборки рассчитывалась J-статистика Юдена (Youden, 1950), учитывающая разность этих показателей при заданном пороговом значении: $J(\tau) = POD(\tau) - FAR(\tau)$. Считаем, что, низкие значения POD недопустимы, так как ложное распознавание объекта класса ОГКс на практике наносит меньше ущерба, чем его не распознавание. Поэтому, мы усложнили задачу поиска оптимального порогового значения дополнительным

условием: вероятность распознавания (POD) должна быть не ниже 60%, в то время как доля ложных тревог (FAR) – не выше 30%. Для характеристики успешности метода прогнозов относительно случайных прогнозов (случайных попаданий) рассчитан показатель надежности Н.А.Багрова (=критерий качества Хайдке) *HSS*, который учитывает природную повторяемость явления. Также, в качестве интегрального показателя качества детектирования при разных пороговых значениях рассчитан показатель *AUC* (area under the curve) площадь под ROC-кривой.

В разделе 2.8 представлена предлагаемая методика детектирования областей ВГО, пробивающих тропопазу, как зон наиболее высокого риска обледенения двигателей воздушных судов по данным распознанных объектов ОГК класса ОГКс. Для детектирования областей ВГО ОГК, пробивающих тропопазу введён дополнительный критерий, учитывающий разности температуры в интервале ИК 10,8 и температуры динамической тропопазы для каждого пикселя, в соответствии с рекомендациями зарубежных исследователей. Температура тропопазы определена на основе потенциального вихря Эртеля (Борисова В. В., Шакина Н. П., 2006), для расчёта которого в составе СМОГК используются прогностические поля температуры, и скорости ветра на уровнях 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600 гПа по модели ЧПП с заблаговременностью 6 часов. Затем, с помощью линейной интерполяции вычисляются значения температуры на изэнтропической поверхности 4 рвч.

В разделе 2.9 предлагается способ оценки направления и скорости смещения ОГК (в первом приближении зон метеорологических условий для обледенения двигателей) в течение следующего часа с учётом постоянного изменения формы, размера и температуры ВГО. На первом этапе отбираются наиболее характерные (с наибольшими градиентами) пиксели с помощью метода Ши-Томаси (Shi J., Tomasi C., 1994). со следующими условиями: расстояние между ними должно быть не меньше 3 пикселей, общее количество таких пикселей не должно превышать 100. В каждый следующий момент времени оценивается смещение каждого пикселя из этого набора с помощью пирамидального алгоритма Лукаса-Канаде (Lucas B.D., Kanade T., 1981), чтобы получить набор векторов оптического потока для каждого. За итоговый вектор смещения принимается усреднённая величина. Для примера на Рисунках 3.А и 3.Б показаны вектора смещения МКС и небольших конвективных

ячеек над территорией Турции. Визуализация подготовлена в интерфейсе СМОГК. Дополнительно на карту нанесены изолинии геопотенциала и вектора ветра на уровне 500 гПа из прогностических полей модели ICON DWD Global с заблаговременностью 3 часа. Визуальный анализ показал, что в данном примере направление построенных векторов близко к модельному направлению ветра на уровне 500 гПа и совпадает с направлением фактического смещения облачности за 1 час.

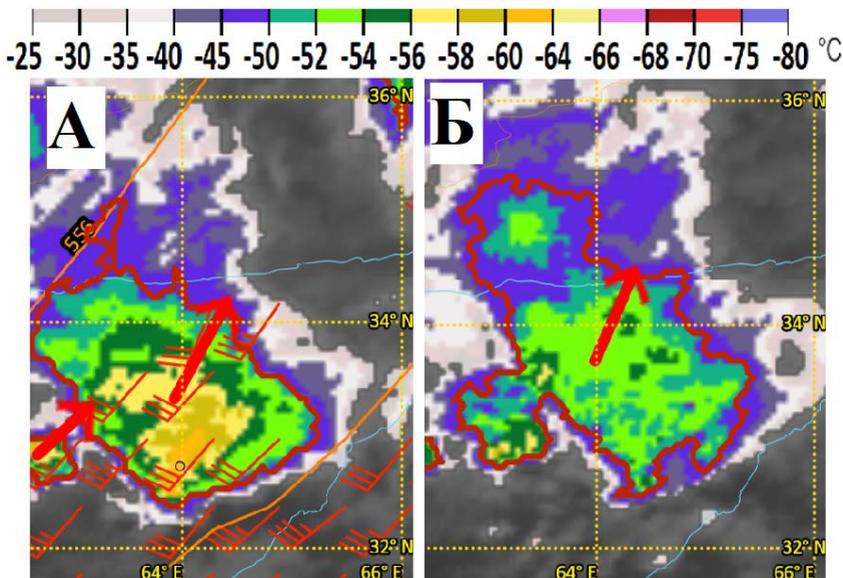


Рисунок 3 – Смещение контуров облачности глубокой конвекции (длинный вектор-стрелка красным цветом) (т.е. УсОД) в срок А) 03:00 ВСВ и Б) 04:00 ВСВ 14.04.2024. Комплекс данных измерений радиационной температуры (диапазоны темп-ры - в соответствии со шкалой) в диапазоне излучения ИК 10,8 мкм МИСЗ Meteosat MSG, изолинии геопотенциала (оранжевый цвет) и векторы ветра (вектор с оперением - бордовый цвет) на уровне 500 гПа по модели ICON DWD Global

Для оценки качества рассчитанных векторов смещения были рассчитаны: средний угол между текущим вектором \vec{a}_n^t и предыдущим \vec{a}_n^{t-1} : $R = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{\vec{a}_n^t * \vec{a}_n^{t-1}}{\|\vec{a}_n^t\| \|\vec{a}_n^{t-1}\|}$, среднее абсолютное отклонение скорости

смещения (км/ч) в последовательные моменты времени $MAE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left| \left\| \overline{d_n^t} \right\| - \left\| \overline{d_n^{t-1}} \right\| \right|$. По результатам валидации алгоритма на данных за июнь-сентябрь 2024 года значения показателей R и MAE составили 0,88 и 0,37 км/ч соответственно, то есть наблюдается высокая корреляция между последовательными векторами смещения одного и того же объекта (практическая «ровная» траектория) и незначительные колебания скорости смещения.

В разделе 2.10 представлено описание реализованных интерактивного веб-интерфейса и комплекса вспомогательных сервисов для представления результатов применения описанных в предыдущих разделах методик. Коротко система названа как СМОГК (Система мониторинга ОГК).

Третья глава посвящена анализу результатов применения методов распознавания условий обледенения двигателей воздушных судов (глубокой конвекции).

В разделе 3.1 представлен анализ исходной выборки после применения порогового метода распознавания объектов УсОД в ОГК и алгоритма трекинга, описанных в разделах 2.1, 2.2, 2.3, и расчёта параметров ВГО по методике, описанной в разделе 2.5. Выборка была ограничена: не учитывались объекты с неполной историей (исключено 146 571 объектов с ограничением сроков наблюдений), что соответствовало 268 497 наблюдениям. В результате общее количество наблюдений ОГК составило 13 005 226, количество уникальных объектов – 10 683 356. Далее проведена синхронизация данных разного типа по методике из раздела 2.4. Контуры ОГК были соотнесены с наблюдениями опасных явлений погоды из базы данных ESWD (90 259 случаев) и наблюдений в коде КН-01 (561 620 случаев) для получения двух категорий: подтверждённые (ОГКс) и неподтверждённые (ОГКу).

В разделе 3.2 описаны результаты расчётов и анализа следующих характеристик: *продолжительности жизни объекта (часы)* – длительности наблюдений за объектом; *максимального размерар (кв. км)* – максимальной площади ВГО за всё время наблюдений.

Результаты анализа распределения по градациям продолжительности жизни свидетельствовали о преобладании в выборке короткоживущих, объектов – то есть тех, которые наблюдались менее часа (см. Рисунок 4). При этом, такие объекты характеризовались небольшой площадью: чаще всего – до 25 кв. км, и отдельные случаи

выявления объектов площадью около 100 000 кв. км. Для короткоживущих доля объектов класса ОГКс составила лишь 0,12%, для ОГКи-8,4%. В целом, среди всех объектов с продолжительностью жизни до 1 часа доля объектов класса ОГКс была очень низкой – всего 0,29%. Следует отметить, что объекты с продолжительностью жизни более 6 часов, как правило, достигали размеров более 700 кв. км, нередко и более 100 тыс. кв. км. Согласно работам Maddox (1980), такие характеристики ВГО характерны для МКК в тропических зонах.

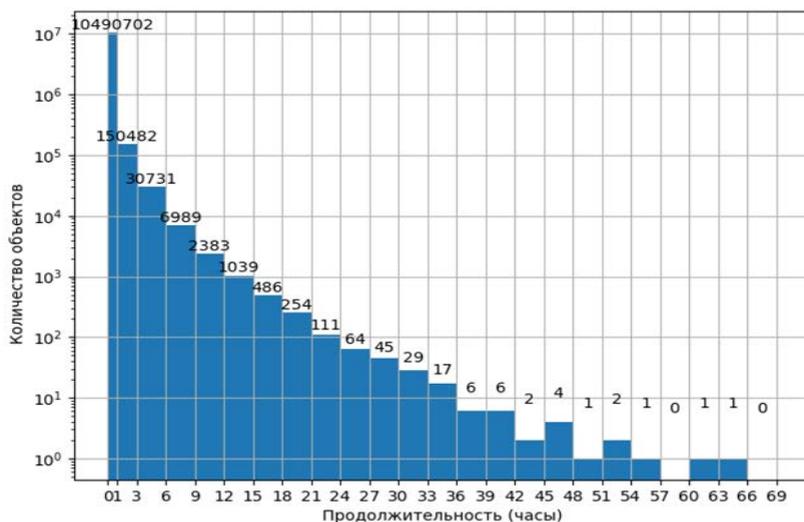


Рисунок 4 – Повторяемость числа объектов ОГК в зависимости от продолжительности жизни (подтверждённых объектов ОГК – класса ОГКс)

Динамику размера объекта на протяжении жизненного цикла (от инициации до распада) важно изучать с помощью распределения площади ВГО с диапазонами температуры ниже заданной (внутри изотерм). Пример показан на Рисунке 5 для случая мощного МКК, наблюдавшегося с 15:30 10.06.2019 по 04:30 11.06.2019 над Восточной Европой. Видна асимметрия относительно скорости роста и распада МКК, т.е площадь с низкими диапазонами температуры возрастает до максимума (250 тыс.кв.км) от 15:00 до 22:00, затем резко падает в 04:00, и через 4 часа площадь падает до 50 тыс. кв. км и менее.

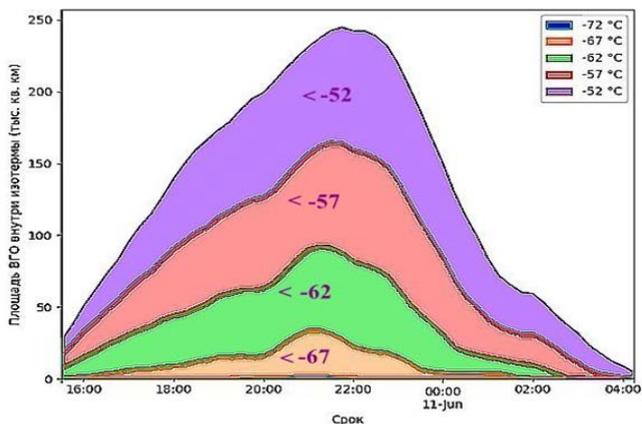


Рисунок 5 – Динамика площади внутри контуров диапазонов температур ВГО МКК, наблюдавшегося с 15:30 10.06.2019 по 04:30 11.06.2019 над Восточной Европой

Ещё один важный вывод можно сделать на основе представленных данных – подтверждается малая природная повторяемость ОГК, т.е. количество объектов во всей описанной выборке выделено очень мало – всего 49 814 (0,47%); что соответствует 424 831 наблюдений объектов ОГК (3,34%). Соответственно, можно предположить, что пороговый метод выделяет большее число объектов, включая и облачность с высотами менее 5 км, и короткоживущую, быстро разрушающуюся ОГК.

В разделе 3.3 рассмотрены результаты расчётов показателей качества детектирования наиболее вероятных условий обледенения на ВГО ОГК по данным за 2020 год (контрольной выборки). Модели машинного обучения были предварительно обучены на наблюдениях за период с 2013 по 2019 гг. для исключения временной зависимости между обучающей и контрольной выборками. Далее, из множества объектов класса ОГКи обучающей выборки с продолжительностью жизни менее 1 часа и максимальной площадью менее 100 000 кв. км было исключено еще 70% объектов (отобранных случайным образом). Такие объекты составляют большую часть выборки (имеют наибольшую повторяемость и наблюдаются заметно чаще) и тем самым сильно занижают долю объектов класса ОГКс в обучающей выборке, что, в свою очередь, затрудняет процесс обучения. В результате, количество объектов, исключённых из выборки, составило 6 263 686, что соответствовало 6

511 402 наблюдениям объектов. Таким образом, стало возможным сократить объём обучающей выборки с 10 892 767 до 4 381 365, а долю наблюдений за объектами класса ОГКс в обучающей выборке увеличить с 3,42 до 8,5%. Ниже представлено детальное описание.

Таблица 4 – Описание выборок для обучения и тестирования

	Обучение	Тестирование
Период (годы)	2013-2019	2020
Кол-во объектов ОГК	2 874 772	1 544 918
Кол-во объектов класса ОГКс	43 645	6 169
Кол-во сроков наблюдений объектов ОГК	4 381 365	1 843 962
Доля наблюдений класса ОГКс	8,5%	2,83%

В Таблице 5 представлены показатели качества распознавания объектов из контрольной выборки для всех статистических моделей. Модели с динамическими предикторами показали лучшие результаты по сравнению со статистическими моделями, обученными лишь на статических предикторах, так как значения всех показателей для них оказались выше. При этом, ИНС с динамическими предикторами продемонстрировала более высокие значения POD и FAR по сравнению с градиентным бустингом (ГБ) и логистической регрессией (ЛР).

Таблица 5 – Результаты валидации на контрольной выборке моделей: значения показателей POD (предупреждённость), FAR (доля ложных тревог), HSS (критерий Багрова-Хайдке), ROC AUC (площадь под ROC-кривой), ETS (критический индекс успешности)

Модель	POD	FAR	HSS	ROC AUC	ETS
ИНС с динамическими предикторами	91,17	12,72	0,42	0,95	0,40
ГБ с динамическими предикторами	91,05	12,77	0,41	0,95	0,39
ЛР с динамическими предикторами	90,82	13,25	0,39	0,94	0,37
ИНС со статическими предикторами	91,08	15,82	0,37	0,92	0,35
ГБ со статическими предикторами	91,01	15,95	0,36	0,92	0,35
ЛР со статическими предикторами	90,56	16,39	0,32	0,90	0,31

Видим, что при высокой предупреждённости (91,17%) доля ложных тревог (12,72%) значительно ниже, чем для аналогичных алгоритмов, имевших значения FAR порядка 50-70% и предложенных

другими исследователями. На Рисунке 6 показаны рассчитанные на обучающей (зелёным цветом) и контрольной (красным) выборках ROC-кривые для А) ЛР со статическими предикторами, обученной на полной выборке (худшей модели) и Б) ИНС с динамическими предикторами, обученной на усечённой выборке (лучшей модели). Значение показателя AUC (площади под кривой ROC) для лучшей модели составило 0,95, в то время как для худшей модели – 0,87. Все показатели качества свидетельствуют о лучшей модели ИНС.

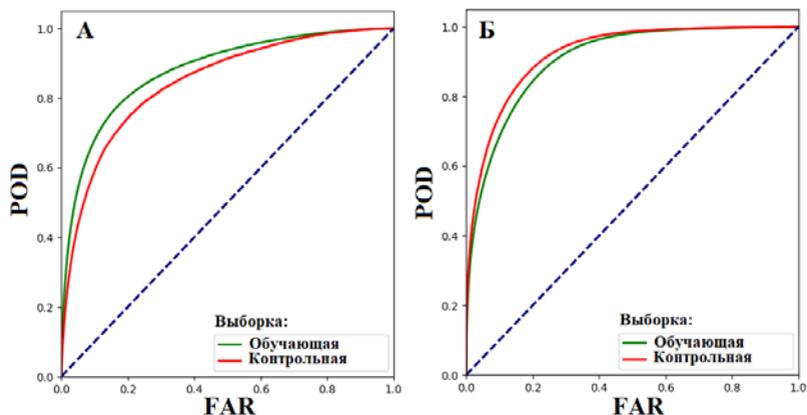


Рисунок 6 – Рассчитанные на обучающей (зелёным цветом) и контрольной (красным) выборках ROC-кривые для А) ЛР со статическими предикторами, обученной на полной выборке (худшей модели) и Б) ИНС с динамическими предикторами, обученной на усечённой выборке (лучшей модели)

В разделах 3.4-3.5 описаны результаты практического применения системы СМОГК для анализа случаев мезомасштабных конвективных комплексов (МКК), развивавшихся: 1) над Чёрным морем, вблизи Стамбула, с 05:00 до 11:20 ВСВ 31.08.2022 г.; 2) над Москвой и Московской областью с 10:20 до 22:50 ВСВ 7.07.2022 г. В качестве исходных данных для детектирования ОГК использовались измерения радиационной температуры прибора SEVIRI спутника Meteosat MSG и выходные поля модели COSMO-Ru6ENA. Для валидации дополнительно привлекались измерения радиолокационной отражаемости сети доплеровских радаров ДМРЛ-С. Разработанные методики и интерактивная система СМОГК позволили автоматически

распознать рассматриваемые МКК и проследить их эволюцию. В начальный момент диаметр в первом случае составил 305 км, во втором – 33 км, но в момент максимального развития он достигал 508 и 1370 км соответственно. Минимальная температура ВГО в первом случае опускалась до -64 °С, во втором – до -69 °С. Максимальная интенсивность осадков, при этом, в первом случае достигала 23,5 мм/ч, во втором – 52 мм/ч. Важно отметить, что стадии максимального развития МКК достигли за 3 и 6 часов соответственно, то есть их можно считать быстро развивающимися.

В разделе 3.6 представлены результаты применения системы СМОГК для анализа случая быстроразвивающейся мощной тропической ОГК над городом Кайенна во Французской Гвиане 10 мая 2015 года с привлечением измерений на борту общего влагосодержания (лёдности), полученных с помощью самолётного зондирования в рамках экспериментальных полетов кампании «НАИС НИВС 2015». Благодаря разработанной методике удалось распознать и проследить за эволюцией ОГК, в которой измерена высокая концентрация ледяных кристаллов (более 1,5 г/м³). Выявлено, что высокая концентрация ледяных кристаллов наблюдалась 1) вблизи “купола” ВГО, пробивающего тропопаузу, и 2) в период уменьшения интенсивности ОГК, то есть при росте температуры ВГО и быстром уменьшении площади (распадом). Эти условия хорошо согласуются с описанными в литературе «неклассическими» случаями высокой концентрации ледяных кристаллов в ОГК.

В заключении сформулированы основные результаты работы и перспективы дальнейших исследований.

К основным результатам и выводам работы относится следующее:

1. Установлено и подтверждено экспериментальными зарубежными исследованиями, что опасное обледенение двигателей самолётов на верхних уровнях атмосферы связано с накоплением высоких концентраций ледяных кристаллов вблизи ВГО областей глубокой конвекции по экспериментальным.
2. Разработан новый метод распознавания зон высокого риска обледенения двигателей самолётов в слое ВГО ОГК на основе данных геостационарных МИСЗ за период 2013–2020 годов. Метод сочетает классические пороговые подходы и современные алгоритмы машинного

обучения, обеспечивая высокое качество детектирования (91,17% предупредённости при 12,72% ложных тревог).

3. Применён метод оптического потока для наукастинга направления и скорости смещения ОГК как зон возможного обледенения двигателей. Валидация метода на данных за июль–сентябрь 2024 года подтвердила высокую корреляцию между расчётными и фактическими смещениями.

4. Создана и запатентована в двух версиях система мониторинга облачности глубокой конвекции (СМОГК и СМОГК-2) с интерактивным веб-интерфейсом. Система обеспечивает оперативный мониторинг комплекса данных МИСЗ и опасных явлений с учётом результатов распознавания и наукастинга смещения ОГК.

5. В результате анализа данных за 2013-2020 гг. для ЕТР установлено наличие долгоживущих (более суток) МКС и МКК (175 объектов в пределах выборки), сопровождающихся опасными явлениями по наземным наблюдениям, и наиболее долгоживущих (30 объектов). Характеристики распознанных ОГК (размеры и динамика их изменения, температура ВГО) сходны с типичными для тропических ОГК.

Работы, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях из перечня ВАК:

1. Шишов А. Е., Горлач И. А. Алгоритм распознавания и мониторинга облачности глубокой конвекции по данным МИСЗ на основе целочисленного программирования // Труды Гидрометцентра России. – 2020. – Т. 376, № 2. – С. 39–59.
2. Шишов А. Е. Способ объектно-ориентированного распознавания облачности глубокой конвекции на основе данных геостационарного МИСЗ с применением машинного обучения // Метеорология и гидрология. – 2023. – № 4. – С. 78–90.

Содержание диссертации также отражено в следующих публикациях:

1. Горлач И. А., Шишов А. Е., Смирнов А. В. Сравнение спутниковых (МИСЗ Метеосат-10) оценок интенсивности конвективных осадков с данными ДМРЛ на примере случаев теплого периода на территории ЕТР // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли

- из космоса : Материалы 20-й Междунар. конф. – Москва : ИКИ РАН, 2022. – С. 411. – DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a.
2. Шишов А. Е., Горлач И. А. Способ автоматического детектирования облачности глубокой конвекции по данным МИСЗ и COSMO-Ru // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса : Материалы 20-й Междунар. конф. – Москва : ИКИ РАН, 2022. – С. 475. – DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a.
 3. Шишов А. Е., Горлач И. А. Оптимизация интерактивной системы мониторинга облачности глубокой конвекции на основе данных МИСЗ и моделей численного прогноза погоды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса : В книге Материалы 21-й Междунар. конф. – Москва : Ин-т косм. иссл. Рос. акад. наук, 2023. – С. 200.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

1. Шишов А. Е., Горлач И. А. База данных случаев глубокой конвекции над европейской территорией Российской Федерации : свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2022622650 ; зарегистрировано 27 окт. 2022 г. / ФГБУ «Гидрометцентр России». – 2022.
2. Шишов А. Е., Горлач И. А. Система мониторинга облачности глубокой конвекции (СМОГК) : свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2022680485 ; зарегистрировано 1 ноя. 2022 г. / ФГБУ «Гидрометцентр России». – 2022.
3. Шишов А.Е., Горлач И.А. Система мониторинга облачности глубокой конвекции 2.0 (СМОГК-2) : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024687371 ; зарегистрировано 18 ноя. 2024 г. / ФГБУ «Гидрометцентр России». – 2024.
4. Шишов А.Е., Горлач И.А. Система обработки и визуализации сводок о фактической погоде НМС-AWDP) : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024687402 ; зарегистрировано 18 ноя. 2024 г. / ФГБУ «Гидрометцентр России». – 2024.