

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации»

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

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
старший научный сотрудник, кандидат географических наук
Горлач Ирина Андреевна

Москва - 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМА ОБЛЕДЕНЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ И МЕТОДЫ ЕГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ.....	15
1.1 Обзор исследований обледенения двигателей воздушных судов.....	15
1.2 Метеорологические условия обледенения двигателей	20
1.3 Обзор дистанционных методов распознавания зон с высоким содержанием ледяных кристаллов на верхних уровнях	29
1.4 Обзор методов распознавания зон с высоким содержанием ледяных кристаллов.....	32
1.5 Способы выделения областей пробивания тропопаузы мощной облачностью глубокой конвекции с высокой концентрацией ледяных кристаллов	41
Выводы по Главе 1:.....	45
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЛАЧНОСТИ ГЛУБОКОЙ КОНВЕКЦИИ И ОБЛАСТЕЙ ПРОБИВАНИЯ ТРОПОПАУЗЫ ПО ДАННЫМ ГЕОСТАЦИОНАРНОГО МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ИСКУССТВЕННОГО СПУТНИКА ЗЕМЛИ И МОДЕЛИ ЧИСЛЕННОГО ПРОГНОЗА ПОГОДЫ ДЛЯ ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ	47
2.1 Обзор автоматических способов выделения и мониторинга облачности глубокой конвекции, являющейся основным условием наличия высоких концентраций ледяных кристаллов.....	47
2.2 Методические аспекты распознавания облачности глубокой конвекции по спутниковым измерениям радиационной температуры на основе пороговых значений	48

2.3 Методика автоматического расчёта трекинга (смещения) облачности глубокой конвекции по данным метеорологических искусственных спутников Земли.....	57
2.4 Методология сопоставления данных об опасных явлениях с объектами облачности глубокой конвекции, распознанными пороговым методом.....	59
2.5 Оценка параметров формы и распределения температуры на верхней границе облачности глубокой конвекции.....	62
2.6 Применение методов машинного обучения для алгоритма распознавания объектов облачности глубокой конвекции, зон высокой угрозы обледенения двигателей	65
2.7 Оценка результатов применения методов машинного обучения для выбора оптимального метода классификации.....	69
2.8 Способ детектирования куполов верхней границы облака, пробивающих уровень тропопаузы, как наиболее опасных условий обледенения двигателя ..	71
2.9 Методика наукастинга направления смещения выделенных автоматически объектов облачности глубокой конвекции.....	73
2.10 Краткое описание созданной экспертной системы, необходимого инструмента для исследования метеорологических условий образования и мониторинга облачности глубокой конвекции, наглядной оценки качества работы алгоритмов выделения зон высокого риска обледенения двигателей ...	79
Выводы Главе 2:	85
ГЛАВА 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ РАСПОЗНАВАНИЯ УСЛОВИЙ ОБЛЕДЕНЕНИЯ (ОБЛАЧНОСТИ ГЛУБОКОЙ КОНВЕКЦИИ).....	86
3.1 Формирование исходных выборок.....	86
3.2 Анализ распределения характерных масштабов размеров и продолжительности жизни облачности глубокой конвекции	87

3.3 Результаты расчётов показателей качества детектирования наиболее вероятных условий обледенения на верхней границе облачности глубокой конвекции.....	91
3.4 Применение созданных методик и алгоритмов для детального анализа случая условий обледенения в кристаллической части облачности глубокой конвекции 31.08.22.....	95
3.5 Применение созданных методик и алгоритмов для детального анализа случая условий обледенения в кристаллической части облачности глубокой конвекции на примере случая 07.07.22	100
3.6 Применение созданных методик и алгоритмов для детального анализа условий обледенения в кристаллической части облачности глубокой конвекции на примере случая 10.05.2015	108
Выводы по Главе 3:.....	117
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	119
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	122
СПИСОК ТЕРМИНОВ	125
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	128
ПРИЛОЖЕНИЕ	139
Рисунок 1. Схема работы системы мониторинга ОГК.....	139
Таблица 1. Описание обработчиков в составе Системы мониторинга облачности глубокой конвекции (СМОГК)	140
Таблица 2. Описание статических параметров верхней границы облака, используемых при обучении моделей машинного обучения.....	141
Таблица 3. Описание динамических параметров верхней границы облака, используемых при обучении моделей машинного обучения.....	143
Таблица 4. Описание исходной выборки с учетом повторяемости случаев ОГК (как объектов), размера и продолжительности жизни	146

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Современные исследования в области изучения климата Земли [9] показывают, что последние три десятилетия можно считать самыми тёплыми за всю историю метеорологических наблюдений на территории Северной Евразии. С этим напрямую связано усиление процессов конвекции в атмосфере, являющимися основополагающими в развитии опасных скоплений кучево-дождевых облаков и мощных мезомасштабных конвективных систем (МКС). Именно облачность мезомасштабных конвективных систем провоцирует такие опасные явления как сильный ливень, град, шквал, гроза и торнадо. Есть все основания ожидать продолжения роста повторяемости подобных явлений, что мотивирует учёных на поиск эффективных методов прогнозирования процессов развития облачности глубокой конвекции.

Перечисленный выше ряд опасных явлений не включает слабо изученное, но весьма опасное для авиации явление – обледенение двигателей воздушных судов (ice crystal icing). Опасность в том, что при дальних перелетах на больших высотах, на маршрутах полетов пассажирской авиации происходит частичная или полная потеря работоспособности двигателей при полёте в кристаллической части облачности глубокой конвекции (ОГК), в том числе и вне зоны её максимального развития. Полёты в кучево-дождевой облачности запрещены, но для безопасных и своевременных полетов коммерческой авиации самолет может подняться на высоту, выше верхней границы облачности (ВГО), минуя скопления гидрометеоров и турбулентных участков, мощных вертикальных движений при больших скоростях полётов. Однако, потолок полета воздушных судов может быть ограничен, и возникает вероятность попадания в области скопления ледяных кристаллов, особенно при пробивании тропопаузы (в виде небольших куполов и шлейфов), над наковальной в стратосфере с большими скоростями сноса кристаллов в условиях стратосферы.

Таким образом, наличие скоплений переохлажденных капель воды или кристаллов при больших скоростях полетов воздушных судов, отрицательная температура – это основные условия обледенения воздушных судов. В атмосфере такие условия могут наблюдаться в облачности различных типов, в тумане, при сублимации водяного пара на Земле. В кристаллических слоистообразных облаках верхнего яруса на эшелонах полетов реактивных самолетов обледенение практически не наблюдалось. Повышение плотности трафика полетов гражданской авиации включая, множество маршрутов, пересекающих экватор и ВЗК привело к необходимости полетов в условиях скоплений мощной кучево-дождевой облачности и повышения высот полетов над ВГО. Поэтому появились сообщения об обледенении двигателей воздушных судов при полетах в условиях скоплений кристаллов на больших высотах. Появились такие сообщения и в случаях смещения тропических воздушных масс на север в умеренные широты, где также существует вероятность образования скоплений кучево-дождевых облаков в виде мезомасштабных систем и комплексов.

Обледенение двигателей воздушных судов в области ВГО ОГК впервые зафиксировано в тропических широтах и описано в работе [89], но, впоследствии оказалось, что повторяемость этого явления достаточно высока, а география намного шире – дело скорее в отсутствии систематических наблюдений таких явлений. Учитывая тенденции ускорения темпов климатических изменений, следует ожидать, что риск обледенения двигателей воздушных судов на больших высотах на ВГО ОГК тоже будет расти. Регулярные измерения интенсивности обледенения, водности и ледности облачности для российской авиации отсутствуют, результаты экспериментальных зарубежных полетов практически мало доступны.

Актуальность задач распознавания, диагноза и прогнозирования условий обледенения вблизи верхней границы ОГК не вызывает сомнений, остаются актуальными и необходимыми исследования по детализации таких условий,

повышения качества анализа и прогноза опасных явлений, особенно учитывая бурное развитие авиационной техники и расширение географии полетов.

Наилучшим образом наблюдать регулярно за состоянием и эволюцией верхней границы облачности на больших высотах возможно, в первую очередь, с помощью дистанционных спутниковых наблюдений, поэтому они выбраны как основной источник для исследований, создания методики прогнозирования, создания рабочего места для оценки результатов исследований и визуализации комплекса наблюдений как наземных, так и дистанционных данных одновременно для контроля информационного обеспечения и мониторинга условий, благоприятных для обледенения воздушных судов.

Цели и задачи диссертационной работы

Цель данной работы – представить новый алгоритм автоматического использования метеорологических искусственных спутников Земли (МИСЗ), выходных данных модели численного прогноза погоды и применения методов машинного обучения (градиентного бустинга, логистической регрессии, оптического потока) для идентификации и наукастинга областей глубокой конвекции, в окрестности которых велика вероятность обледенения двигателей самолетов в зонах повышенной концентрации ледяных кристаллов.

Достижение данной цели потребовало выполнения нескольких задач. Во-первых, необходимо было определить объект исследования и провести анализ публикаций, посвящённых физике процессов образования и отложения льда. Во-вторых, необходимо уточнить эксплуатируемые существующие системы наукастинга условий погоды, благоприятных для обледенения двигателей, в первую очередь при развитии глубокой конвекции, в скоплениях кучево-дождевых облаков, мезомасштабных конвективных системах (МКС) или мезомасштабных конвективных комплексах (МКК). В-третьих, решалась задача создания метода распознавания метеорологических условий обледенения на верхних уровнях в кристаллической части мощной кучево-дождевой облачности на основе дистанционных методов наблюдений, и, соответственно, необходимо было описать

разработанную методику с учетом отличий от аналогов, созданных ранее другими исследователями. Задача оценки созданных методик распознавания опасных ситуаций обледенения двигателей решалась на последнем этапе и включала проверку качества работы системы при использовании массивов данных независимой выборки при детальном анализе на примере конкретных случаев наблюдений мезомасштабных конвективных комплексов (МКК).

Научная новизна

Научная новизна представленной диссертационной работы заключается в следующем.

1. Разработан оригинальный алгоритм объектно-ориентированного детектирования облачности глубокой конвекции, связанной с повышенным риском обледенения двигателей воздушных судов, над Европейской территорией России. Метод позволяет эффективно быстро в реальном режиме времени выявлять опасные метеорологические условия, влияющие на безопасность полётов в кристаллической части облачности глубокой конвекции.
2. Впервые для Европейской территории России и сопредельных государств представлена статистическая оценка распределения характерных масштабов (размеров) и продолжительности жизни облачности глубокой конвекции по спутниковой информации для умеренных широт над сушей. Впервые использован комплекс данных о неблагоприятных погодных условиях как из базы данных синоптических явлений в формате SYNOP, так и Европейской базы данных наблюдений добровольцев (ESWD) с учетом возможности достоверного учета.
3. Впервые в РФ применен метод оптического потока для оценки вектора смещения выделенных автоматически объектов облачности глубокой конвекции. Вектор смещения ОГК – важный параметр при прогнозировании вероятного направления смещения опасных условий обледенения

двигателей самолетов в ближайшие 60-90 мин для обхода опасных условий и обеспечения безопасности полетов.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая и практическая значимость выполненной диссертационной работы определяется следующими аспектами.

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. Автоматизация процесса выявления опасных метеоусловий позволит повысить точность прогнозов и снизить вероятность аварийных ситуаций.
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. Это способствует повышению точности прогнозов и улучшению качества принятия решений.
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. Такие прогнозы особенно важны для предотвращения возможных инцидентов, связанных с обледенением двигателей воздушных судов.

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.

Таким образом, представленные результаты имеют высокую прикладную ценность и могут внести значительный вклад в повышение уровня безопасности и эффективности функционирования авиационного транспорта, а также в развитие методов прогнозирования и мониторинга метеорологических условий.

Методология и методы исследования

Методология исследования основана на обработке данных метеорологических геостационарных спутников методами компьютерного зрения, дальнейшей классификации конвективных ячеек и систем на основе использования машинного обучения (нейронные сети, градиентный бустинг, логистическая регрессия), а также применении метода оптического потока для наукастинга смещения объектов. Результаты распознавания (классификации) сравнивались с данными о неблагоприятных условиях погоды как из базы данных синоптических стандартных наблюдений в коде КН-01 (SYNOP), так и из Европейской базы данных наблюдений добровольцев (ESWD) за 2020 год, выступавшими в роли независимой контрольной выборки, с учётом погрешности по пространству и времени. Степень соответствия прогнозов фактическим наблюдениям оценивалась с помощью классических показателей качества, включая предупреждённость и долю ложных тревог.

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.

Степень достоверности результатов

Достоверность полученных результатов и обоснованность выводов подтверждаются следующим.

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.

Все перечисленные аспекты в совокупности подтверждают надежность и обоснованность полученных результатов, а также их соответствие требованиям современной науки и практики.

Апробация результатов

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях и семинарах: 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).

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, создание, 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 и условий обледенения двигателей, 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.

Благодарности

Автор выражает благодарность своему научному руководителю, к.г.н. с.н.с. Горлач Ирине Андреевне за постановку темы и задач исследования, всестороннюю поддержку на исследования и в работе над диссертацией. Автор выражает благодарность сотрудникам Отдела численных краткосрочных прогнозов Регионального специализированного метеорологического центра Москва и лично д.ф.-м.н проф. Наталье Павловне Шакиной, д.ф.-м.н. Гдалию Симоновичу Ривину и к.ф.-м.н. Инне Адольфовне Розинкиной, к.ф.-м.н. Марине Владимировне Шатуновой, д.ф.-м.н. Анне Рудольфовне Ивановой, за конструктивные замечания и консультации по теме диссертационной работы. Автор благодарит свою жену Марию, родителей Елизавету Евгеньевну и Евгения Викторовича за всестороннюю поддержку, особенно в период работы над диссертацией.

ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМА ОБЛЕДЕНЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ И МЕТОДЫ ЕГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ

1.1 Обзор исследований обледенения двигателей воздушных судов

Проблема обледенения самолётов известна давно – она активно исследовалась учёными с 30-ых годов XX века. Обледенением называют отложение льда на поверхности воздушного судна, характеризующееся скоростью нарастания льда (интенсивность обледенения) и толщиной нарастания льда - степенью обледенения.

Аналитические расчеты показали, что интенсивность обледенения (мм/мин) зависит от водности ω (г/м³), воздушной скорости самолёта V (км/ч), плотности льда $\rho_{\text{л}}$ (г/см³), коэффициента захвата $E(r)$, коэффициента намерзания β :

$$I = 1,67 * 10^{-2} \omega V E(r) \beta / \rho_{\text{л}}. \quad (1.1)$$

Коэффициент захвата – это отношение фактически осевшей на данном профиле массы воды к массе воды, содержащейся в невозмущенном потоке по отношению к определенному заданному сечению. Коэффициент намерзания представляет собой отношение массы нарастающего льда к массе воды, осевшей за то же время на ту же поверхность [8].

Соответственно, наиболее важными метеорологическими величинами, влияющими на вероятность и степень обледенения, являются отрицательная температура воздуха, наличие капельной влаги в атмосфере, водность (содержание жидкой воды) и спектр размеров капель облаков, которые, в свою очередь, зависят от сезона года и географических особенностей данного района [8]. Водность облака определяется микрофизическими особенностями распределения температуры и вертикальными движениями в облаках – в частности, было замечено, что восходящие вертикальные токи способствуют образованию новых капель жидкой влаги в облаке, поддерживая или увеличивая его водность; нисходящие токи, наоборот, приводят к испарению капель и размыванию облаков.

Уникальный эксперимент по измерениям природных облачных образований по всей России в период 1957–1963 гг. на основе данных самолётного зондирования атмосферы позволил изучить 12 807 случаев обледенения. Прежде всего, была проанализирована повторяемость нескольких градаций температуры (см. Таблицу 1). Чаще всего обледенение наблюдалось при температуре воздуха от 0 до -24, -25°C. Причем наиболее часто при T от 0 до -10, -12°C, что характерно для наличия преимущественно капельных облаков (влага в жидкой фазе) [8].

Таблица 1 – Повторяемость (%) основных диапазонов температуры воздуха (°C) при обледенении самолётов по данным самолётного зондирования атмосферы за период 1957–1963 гг. [8]

	Диапазоны температуры, °C		
Месяц	0...-12	-12...-24	< -24
январь	63,2	30,6	6,2
февраль	64,2	29,9	5,9
март	73,8	23,5	2,7
апрель	79,6	19,6	0,8
май	76,6	22,2	1,2
июнь	82,6	16,6	0,8
июль	86,5	13,2	0,3
август	88,6	11,4	-
сентябрь	78,8	19,1	2,1
октябрь	71,5	25,9	2,6
ноябрь	72,1	23,6	4,3
декабрь	67,1	27,9	3,5
Итого за год	72,3	24,2	3,5

Легко заметить, что повторяемость преобладающего диапазона температур (от -12 до 0°C) слабо менялась от месяца к месяцу, но очевидна существенная изменчивость высоты нулевой изотермы. Об этом также свидетельствуют

полученные во время самолётного зондирования в 1957–1963 гг. повторяемости высот обледенения (см. Таблицу 2).

Таблица 2 – Годовой ход повторяемости (%) высот обледенения самолётов (км) по данным самолётного зондирования атмосферы за 1957–1963 гг. [8]

Месяц	Диапазоны высот		
	0-3 км	3-6 км	6-7 км
январь	80,4	19,0	0,6
февраль	80,6	19,4	0,0
март	80,3	19,7	0,0
апрель	69,4	30,0	0,6
май	41,3	58,3	0,4
июнь	25,1	73,7	1,2
июль	8,8	87,3	3,9
август	15,9	82,9	1,2
сентябрь	48,1	50,7	1,2
октябрь	67,5	32,1	0,4
ноябрь	72,2	24,0	0,8
декабрь	79,0	20,3	0,7
год	67,4	31,9	0,7

Важно обратить внимание на максимальную высоту обледенения в Таблице 2 – она не превышает 7 км, потому что соответствует потолку полета используемого тогда для измерений самолёта-зондировщика Ли-2.

До середины 90-ых годов 20-го века под обледенением воздушного судна принималось во внимание преимущественно лишь обледенение корпуса (или передней кромки крыла), но позднее были выявлены случаи обледенения двигателей самолётов, пролетающих на высотах более 7 км, над или вблизи облачности глубокой конвекции. В результате, наблюдалась потеря устойчивости,

мощности, характеризующаяся временной потерей тяги в одном, нескольких или во всех двигателях. Сами явления потери мощности могут быть кратковременными, требующими лишь ручного перезапуска двигателя, а в некоторых случаях может потребоваться временное снижение самолета для того, чтобы добиться удаления (таяния) льда, необходимого для перезапуска двигателя.

После 90-х годов прошлого века зафиксировано не менее 170 случаев потери тяги двигателей пассажирских и грузовых самолётов, связанных с обледенением в ледяных кристаллах [12]. И хотя лишь единичные случаи привели к катастрофе, потенциальная угроза жизни пилотов и пассажиров существует. Более того, стоимость ремонта повреждённых двигателей очень высока [89].

После выявления нескольких случаев обледенения самолетов на больших высотах верхней границы мощных скоплений кучево-дождевых облаков, были проведены также и первые исследования предполагаемых метеорологических условий обледенения [61,68]. В 2003 году была создана рабочая группа для анализа и создания согласованных мероприятий и регламентов с целью минимизации воздействий опасных условий обледенения двигателей при полетах (The Engine Harmonization Working Group). Рабочая группа включала представителей самолетостроения, производителей двигателей, органов управления движением и представителей государственных организаций с целью изучить предлагаемые дополнения в правила сертификации авиационных двигателей, касающиеся устойчивости к воздействию капель переохлаждённой влаги и ледяным кристаллам. Было изучено около 100 случаев потери тяги двигателей, предположительно связанных с обледенением, часть из которых произошли в окрестностях облачности глубокой конвекции. Исследования включали информацию как для лёгких самолётов местных авиалиний, так и для тяжёлых магистральных самолётов, и разных типов двигателей [68].

Рабочей группой был сделан вывод о том, что все случаи потери тяги были вызваны не столько наличием в атмосфере переохлаждённых капель, как считалось

ранее, а скорее наличием высоких концентраций мелких ледяных кристаллов (High Ice Water Content – HIWC), ранее считавшихся безопасными для полетов, так как не вызывали обледенения внешних поверхностей. Впоследствии исследования показали [61,68], что ледяные частицы способны образовывать ледяные отложения на внутренней поверхности двигателя, сначала растаивая, а затем вновь замерзая. Предположительно, образующийся таким образом лёд затем втягивается в компрессор, нарушая его работу.

Одним из возможных защитных решений можно считать разработку устойчивых к обледенению двигателей, поэтому предлагалась разработка и публикация новых инженерных стандартов в области авиастроения. Безусловно это было необходимо, но применимо только к новым воздушным судам, которые еще только будут проектироваться в соответствии с новыми стандартами, а большая часть эксплуатируемых сегодня самолётов останется незащищенной, так как установка на них новых двигателей потребует огромных финансовых затрат [89]. Наконец, предлагаемое решение, вероятно, не позволит полностью защитить двигатели от обледенения – целиком риск нивелировать не получится, так как, опять же, исчерпывающих знаний о микрофизических особенностях процесса пока нет. В соответствии с вышеперечисленными причинами наиболее оптимальным выходом можно считать, в первую очередь, определение опасных условий погоды, формирование мощной облачности, научиться их прогнозировать и своевременно информировать пилотов о пути обхода, без попадания в опасные условия.

Результатом долгих дискуссий был разработан технический план для накопления знаний о данном явлении [89]. Одна из четырёх содержащихся в нём задач заключалась в проведении лётных испытаний для описания областей с высокой концентрацией ледяных кристаллов (HIWC) – в частности, было решено уделить особое внимание сбору информации об угрозе HIWC в пределах и окрестностях облачности глубокой конвекции, а также о характерных размерах ледяных частиц в этих облаках. Точные данные о содержании влаги в атмосфере

(водности) и размере частиц были необходимы для моделирования работы двигателей и их наземного тестирования для дальнейшей сертификации.

Следующий этап предусматривал совместные работы исследовательского центра Glenn при NASA, центра Environment Canada и Австралийского Метеорологического Бюро по совершенствованию измерительных приборов и подготовке самолётов-лабораторий для измерения содержания ледяных кристаллов в конвективной облачности [89]. Была сформирована технологическая основа и впервые проведены экспериментальные лётные исследования в австралийском городе Дарвин в 2014 году. Рассмотрим результаты этого и последующего исследования, представленные в следующем разделе.

1.2 Метеорологические условия обледенения двигателей

Эффективные решения для защиты от обледенения невозможны без понимания наблюдаемых процессов. Именно по этой причине метеорологические условия, связанные с высоким риском обледенения, являются предметом активных исследований.

В статье [68] представлена информация об измерениях бортовых приборов и опроса пилотов. Согласно сведениям опросов, случаи обледенения возникали при полётах в кучево-дождевых облаках или непосредственно над ними при следующих условиях:

1. Высоты более 3,5 км (8-10 км для самолётов местных линий и 3,5-12 км для магистральных самолётов);
2. Низкие температуры (от -37°C до -20°C для самолётов местных линий и от -15°C до -55°C для магистральных самолётов);
3. Полеты вблизи облачности глубокой конвекции при наличии или отсутствии грозových разрядов.
4. Наблюдались перепады температуры. Отмечались условия, когда воздух намного теплее стандартной атмосферы (превышение на $7-16^{\circ}\text{C}$ для самолётов

местных линий, а для магистральных самолётов – менее 5°C в 5 случаях, 6-10°C в 11 случаях, 11-23°C в 13 случаях);

5. Интенсивность турбулентности не достигала градации сильной (лишь слабой до умеренной);
6. Видно было таяние отдельных ледяных кристаллов при столкновении с лобовым стеклом;
7. Наблюдалась аномалия температуры заторможенного потока воздуха (ТАТ), измеряемой специальными датчиками на поверхности воздушного судна;
8. Сильное обледенение корпуса не наблюдалось;
9. Значения отражаемости на экране бортового радара были ниже пороговых величин (<14-20 dBz).

В основном, случаи потери тяги были зафиксированы в тропических широтах – как над океанами, так и над континентами. Однако в настоящее время отмечается рост повторяемости этого явления вне тропиков. Вынос тропических воздушных масс в умеренные широты все чаще способствует образованию мезомасштабных комплексов и систем.

Например, в 2013 году с явлением обледенения компрессора столкнулись пилоты самолёта “Боинг-747”, следовавшего рейсом Москва-Гонконг (Шакина Н.П., Горлач И.А. и др. [11]). Во время полета по заданному маршруту воздушное судно уклонялось от зон грозовой активности. В частности, оно отклонилось от курса на 92,6 км для обхода мезомасштабного конвективного комплекса (МКК), расположенного вблизи Магнитогорска. Самолет отклонился от полета в верхней кристаллической части, находившейся на высоте 11900 метров. Позднее, пролетая над районом Ченгду (Китай), между 17:51 и 18:22 ВСВ, самолет сблизился с другой областью грозовой активности и вновь сместил траекторию вправо, чтобы обойти эту зону. Согласно показаниям бортового радиолокатора, полёт проходил на расстоянии 55-74 км от засветок снизу. В 18:00 ВСВ, достигнув точки ХУО (28,10° с.ш., 104,25° в.д.), самолет пересекал полупрозрачную облачность, которую экипаж

описал как «слоистую пелену». В 18:02 ВСВ было зафиксировано повышение температуры окружающего воздуха приблизительно на 20°C, затем чуть позже температура понизилась. Система противообледенительной защиты самолета не зарегистрировала отложений льда (сигнал «обледенение» не активировался). В 18:22 ВСВ возникли сбои в работе двигателей. После приземления были выявлены недопустимые повреждения лопасти первой ступени компрессоров высокого давления первого и второго двигателей, а также деформированная лопасть первой ступени компрессора высокого давления четвертого двигателя. Авторы исследования [11] отмечают, что это могло быть связано с пересечением самолётом восходящего воздушного потока, в котором из-за стремительного охлаждения при подъёме концентрация ледяных кристаллов была очень высокой. “Слоистую пелену” связали с перистыми (кристаллическими облаками), над МКК.

Макро- и микрофизические процессы, обуславливающие условия образования высокой лёдности, до сих пор недостаточно изучены. Следует отметить наибольший вклад компании Боинг при сборе и хранении информации о случаях обледенения, возможно из-за конструктивных особенностей самолетов этой компании. Один из последних отчётов [30], подготовленный в 2015 году, касался облачности над океанами, вблизи которой наблюдались случаи обледенения над Юго-Восточной Азией; следующий за ним отчёт [29], выпущенный в 2019 году, фокусируется в облачности тропиков в континентальных районах Южной Америки и Африки и заявляет о высокой повторяемости случаев обледенения при полётах над сушей, в местах плотного авиатрафика.

Более надёжным и объективным источником фактических измерений содержания ледяных кристаллов являются данные исследовательских полётов, совершённых либо в рамках проекта HAIC-HIWC, либо NASA и партнёрами. Всего проводилось семь лётных экспериментов [45], согласно Таблице 3

Таблица 3- Лётные эксперименты по измерению содержания ледяных кристаллов

Год	Название	Локация
16-18 февраля 2014	HAIC-HIWC 1	Дарвин, Австралия
5-29 мая 2015	HAIC-HIWC 2	Кайен, Французская Гвиана
1-31 января 2016	HAIC-HIWC 3	Ла Реюньон
12-28 августа 2015	NASA HIWC-RADAR	Мексиканский залив, Карибский бассейн
2-20 августа 2018	NASA HIWC-RADAR 2	Мексиканский залив, Восточная часть Тихого океана
8-30 июля 2022	NASA HIWC	Джексонвилл, Флорида (США)
29 августа – 2 октября 2022	NASA Convective Processes Experiment - Cabo Verde (CPEX-CV)	Кабо-Верде

Они показали, что полёты внутри или ниже облаков с температурой ВГО ниже температуры тропопаузы, при наличии оптически плотной кристаллической облачности, или в слое с пробиванием тропопаузы (ОТ - overshooting top) могут с высокой вероятностью попасть в области с высокими значениями лёдности или, редко, водности [95]. В частности, в работе [55] была установлена обратная связь между расстоянием от центра ближайшей ОГК и содержанием ледяных кристаллов [55]. Поэтому был сделан вывод о том, что зоны высокого риска обледенения самолётных двигателей формируются вблизи или внутри облачности глубокой конвекции (ОГК).

На основе этих данных, в работе Leroу (2017, [63]) проанализированы измерения микрофизических параметров облачности в областях с высокой концентрацией ледяных кристаллов, полученных на основе данных специального измерительного комплекса, установленного на исследовательские самолёты. Наблюдения показали, что преобладали области с высокой концентрацией кристаллических частиц, превышающих значения $1,5 \text{ г/м}^3$. Медиана диаметра ледяных кристаллов

наблюдалась в интервале от 320 до 690 мкм при температуре от -50°C до -10°C . В исследовании Protat (2016, [77]) была сделана попытка установить статистическую зависимость между водностью облака и отражаемостью радара, работающего с частотой 95 ГГц, с целью создания алгоритма оценки водности/ледности по данным о радарной отражаемости; относительная ошибка регрессии составила $\sim 30\%$.

Особое внимание в исследованиях уделялось тому факту, что радарная отражаемость в зонах высокого содержания ледяных кристаллов в ряде случаев была низкой (менее 14 dBZ). В журнале AERO [44], публикуемом компанией Boeing, отмечается, что высокое содержание крупных ледяных кристаллов характерно не только для мощных МКС и МКК (“классических” случаев ОГК, Рисунок 1), которые обладают высокой радарной отражаемостью и поэтому с высокой точностью распознаются бортовыми приборами. Более сложными являются случаи менее мощной кучево-дождевой облачности в стадии распада или при слиянии отдельных конвективных ячеек (Рисунок 2), так как, ввиду слабых восходящих движений, в верхней части таких облаков может вовсе не быть крупных ледяных кристаллов, обладающих большой радарной отражаемостью, но, при этом, содержание мелких кристаллов (размерами в диапазоне от 100 до 500 мкм) может быть очень высоким. В работе Fridlind (2015, [41]) описываются результаты воспроизведения несколько случаев подобных условий с помощью моделирования на основе численной модели облака и измерений спектров размеров ледяных частиц [41].

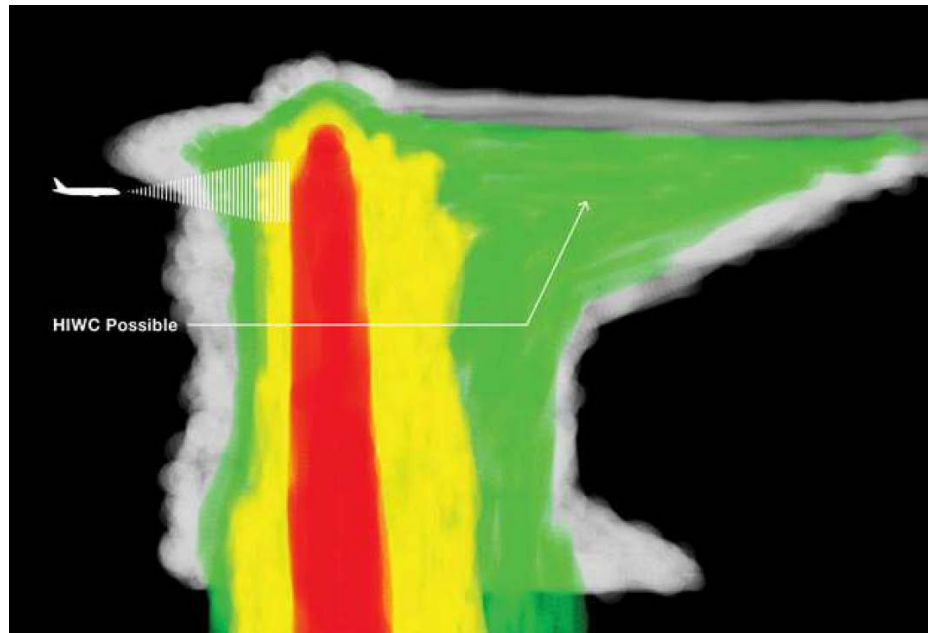


Рисунок 1 – Пример профиля радарной отражаемости для МКС и МКК, цвет области соответствует уровню радарной отражаемости: зелёный – низкие значения, жёлтые – средние (умеренные) значения, красный – высокие значения более 50 ГГц [44]

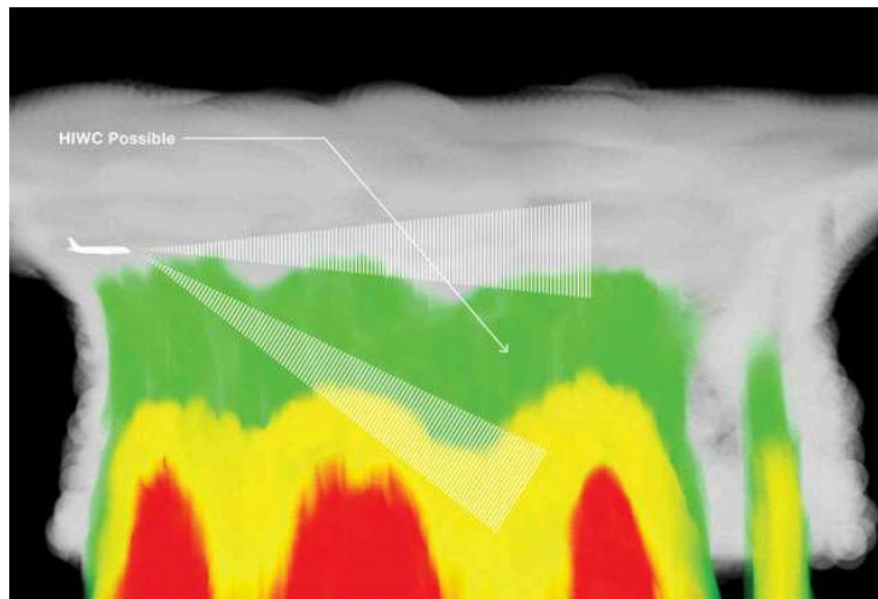


Рисунок 2 – Пример профиля радарной отражаемости для слабой (распадающейся) ОГК, цвет области соответствует уровню радарной отражаемости: зелёный – низкие значения, жёлтые – средние (умеренные) значения, красный – высокие значения (выше 50 ГГц).

В 2017 году была опубликована работа Proctor (2017, [76]), в которой описывались результаты трёхмерного моделирования эволюции МКС: подтвердилось, что области с концентрацией ледяных кристаллов выше 2 г/м^3

могут существовать и рядом, вне зоны наиболее мощных восходящих потоков и наибольшей радарной отражаемости.

Моделирование использовалось и в ряде других работ (например, в Franklin (2016, [40]), Stanford (2017, [87]), Qu (2018, [78]), Huang (2021, [56])). В перечисленных выше статьях результаты показали, что попытки описать и воспроизвести формирование зон высокой концентрации ледяных кристаллов с помощью моделей численного прогноза погоды не увенчались особым успехом. В первую очередь, из-за недостаточного объёма непосредственных измерений. Например, в статье Huang Y. (2021, [56]) проанализированы результаты моделирования развития облачности глубокой конвекции в условиях, наблюдаемых 26 мая во время кампании HAIC-HIWC 2, с помощью модели WRF (Weather Research and Forecasting) с шагом 1 км и различными параметризациями микрофизических процессов. В результате, при сравнении с фактическими наблюдениями, радарная отражаемость оказалась сильно завышенной, в то время как концентрация ледяных кристаллов – заниженной.

В 2024 году Королёв А. [60] представил концептуальную модель образования зон высокой концентрации ледяных кристаллов в ОГК (иллюстрация представлена на Рисунке 3), опираясь на непосредственные измерения ледности облака приборами самолёта Convair-580, количества и размера облачных капель в рамках кампании HAIC HIWC 2015 вблизи города Кайенна во Французской Гвиане. Предполагается, что на начальном этапе (инициации) конвективной системы формируется слой таяния кристаллов, из которого капли выносятся на более высокие уровни, где крупные переохлаждённые капли формируют благоприятные условия для вторичного замерзания и образования ледяных частиц (SIP - Secondary Ice Production). Наибольшей интенсивности этот процесс достигает выше слоя таяния на 1-1,5 км над слоем таяния при температуре от -5°C до -8°C . Замерзание капель и быстрый рост большого числа ледяных частиц сопровождается повышенным выделением скрытого тепла и усилением конвективных процессов. Дальнейший подъём ледяных частиц восходящими потоками приводит к

снижению уровня пересыщенного водяного пара, увеличивая лёдность и, тем самым, формируя зоны высокой концентрации ледяных кристаллов (HIWC). В этих условиях небольшое количество водяного пара, что ограничивает рост ледяных кристаллов. Поэтому они сохраняют малый размер (с диаметром менее 100 мкм). Восходящие конвективные потоки периодически выносят эти частицы на верхние уровни, поддерживая их высокую концентрацию. При этом процессе ввиду низкой скорости падения небольших кристаллов, происходит накопление содержания малых кристаллов из-за их задержки на верхних уровнях длительное время. В целом, зоны высокой концентрации ледяных кристаллов рассматриваются как динамические объекты внутри облака, формирующиеся благодаря балансу между седиментацией частиц и ростом лёдности в соответствии с конвективными потоками.

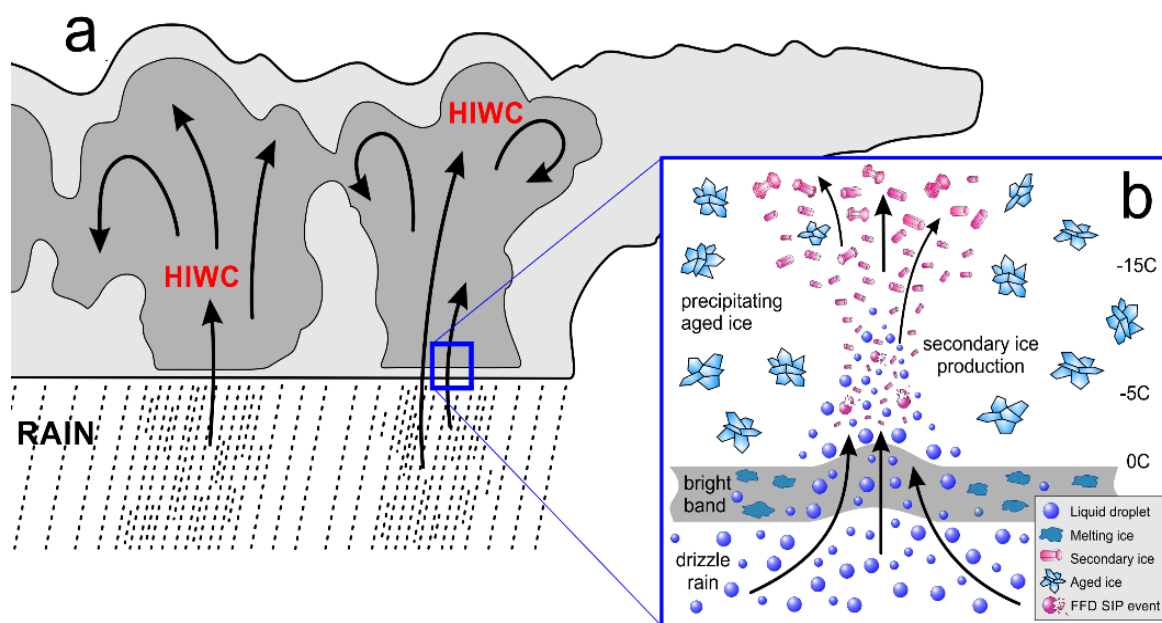


Рисунок 3 – Иллюстрация концептуальной модели образования зон высокой концентрации ледяных кристаллов в тропических МКС (Королёв А., [60])

Для подтверждения концептуальной модели была сделана попытка воспроизвести развитие мощной МКС с помощью глобальной мультимасштабной

численной модели GEM (Global Environmental Multiscale) с пространственным разрешением 250 м и разными микрофизическими схемами, параметризующими процесс вторичного образования ледяных частиц. Результаты оказались близки к непосредственным измерениям, однако отмечается, что имеющейся в распоряжении исследователей базы данных непосредственных измерений лёдности и различных микрофизических параметров недостаточно для обобщения данной теории. Требуются дальнейшие исследования для оценки вклада и других механизмов образования ледяных кристаллов. Более того, существенным ограничением данной модели является рассмотрение случаев ОГК только над океаном.

Важно отметить, что для облачности, исследуемой в рамках проектов НАИС HIWC и NASA HIWC в 2014-2018 годах, была характерна низкая концентрация антропогенных аэрозолей. Исследователями, работающими с собранными данными, была вскоре выдвинута гипотеза о том, что содержание аэрозолей может оказывать значительное влияние при накоплении ледяных кристаллов в ОГК. Для учета дополнительных параметров и увеличения массива имеющихся данных в 2022 году NASA совместно с Федеральным Авиационным Агентством США (FAA) проведено 10 исследовательских полётов близ города Джэксонвилл штата Флорида, в рамках которых были получены измерения содержания не только ледяных кристаллов, но и антропогенных аэрозолей. Установлено, что для ОГК, развивающейся над сушей в условиях высокой концентрации антропогенных аэрозолей, характерно: формирование большего объёма снежной крупы и града; большего размера ледяных кристаллов; более высокая радарная отражаемость [60]. Поэтому следует ожидать, что высокая концентрация ледяных кристаллов может поддерживаться в таких условиях меньшее время.

Предполагается, что новые лётные эксперименты и повышение временного и пространственного разрешения моделей позволят улучшить понимание микрофизических процессов, связанных с формированием зон высокой

концентрации ледяных кристаллов, и повысить качество прогнозов этого явления для обеспечения безопасности авиации.

Появление регулярных, доступных повсеместно под эгидой ВМО данных геостационарных МИСЗ, с пространственным и временным разрешением, сопоставимым с разрешением региональных и мезомасштабных моделей позволяют также применить еще один подход к решению вопроса об обнаружении условий обледенения двигателей на верхних уровнях при полетах в кристаллической части мощной кучево-дождевой облачности. Комплексное использование учащенных измерений со спутников и численного моделирования позволят своевременно обеспечить безопасность условий полетов. Ниже рассмотрим далее предлагаемый подход с учетом характерных особенностей дистанционных измерений.

1.3 Обзор дистанционных методов распознавания зон с высоким содержанием ледяных кристаллов на верхних уровнях

Метеорологические спутники в последние годы активно используются для наблюдений за погодой в дистанционном режиме, так как измерения, полученные с их помощью, представляют собой один из важнейших источников данных. Приборы, установленные на МИСЗ, измеряют параметры состояния атмосферы с различным разрешением. Данные собираются в наземных приёмных центрах, где они обрабатываются, анализируются и передаются для решения различных задач. Преимущество метеорологических спутников состоит в том, что зона их наблюдений охватывает практически всю поверхность планеты, в то время как традиционные методы сетевых наблюдений способны охватить не более 20-500 км в зоне обзора наблюдателей или радаров. Для многих труднодоступных территорий их использование незаменимо (например, для океанов, или высокогорных территорий) [66].

Чаще всего используются измерения именно геостационарных спутников ввиду их высокого временного разрешения (от 5 до 30 минут), что важно для наблюдения

за быстроменяющимися атмосферными процессами. Располагаются спутники на экваториальной орбите с высотой около 36 тыс. км над поверхностью Земли [66] и смещаются с угловой скоростью Земли. Период обращения вокруг Земли равен звёздным (сидерическим) суткам – 23 часа 56 мин 4,09 сек. Пространственное разрешение составляет 1-10 км в зависимости от спутника и измерительного прибора, менее, чем у полярно-орбитальных ИСЗ (~1 км), и зона обзора геостационарных МИСЗ ограничена лишь 70° параллелями, они не «видят» полюсов. Тем не менее, предоставляемой ими информации вполне достаточно для решения большинства метеорологических задач. Один спутник способен наблюдать за 40% Земной поверхности, а система из 5-8 таких спутников предоставляет полный охват Земного шара [66]. Геостационарные метеоспутники, работающие для решения задач Всемирной Метеорологической Организации: EUMETSAT (серия Meteosat- 2 спутника), США (серия GOES, восточный и GOES-западный), Япония (серия Himawari), Китай (серия Feng-Yun), Россия (серия ЭЛЕКТРО) и Индия (INSAT).

Наиболее часто для метеорологических исследований используется информация измерений МИСЗ в видимом и инфракрасном каналах электромагнитного излучения. Каждый из каналов предоставляет собой важную информацию о разных характеристиках атмосферы.

Измерения в видимом канале служат для получения данных о солнечной радиации, отражённой поверхностью планеты и её облачным покровом. В целом, облака обладают большей отражательной способностью, чем поверхность планеты и поэтому на снимках мы видим их в виде более светлых, ярких оттенков. Данные в видимом канале предоставляют информацию о размере, форме, текстуре, глубине и динамике облаков. Более яркие облака имеют большую оптическую толщину, более высокое содержание воды и льда и меньший средний размер облачной капли. Недостаток - данные видимого канала недоступны ночью, т.е. их можно получить только в дневное время суток; и не всегда можно различить облачность нижнего,

среднего и верхнего ярусов, подстилающую поверхность при схожих значениях альбедо.

Информация инфракрасного канала – это измерения радиации, излучаемой Земными поверхностями в диапазоне от 6 до 12 мкм (это тепловой канал). В результате данные позволяют оценить температуру поверхности планеты или верхней границы облачного покрова. Температура понижается с высотой в тропосфере, инфракрасная радиация наименьшей интенсивности излучается самыми высокими облаками (расположенными дальше всего от поверхности Земли). Таким образом, тёмные области свидетельствуют о наличии мощной конвективной облачности. Важным преимуществом измерений инфракрасного (ИК) канала является его доступность в любое время суток и существенны измерения в окне прозрачности атмосферы. Данные ИК канала имеют худшее разрешение по сравнению с измерениями видимого канала, поэтому с его помощью не всегда можно исследовать текстуру и микрофизический состав облаков.

Часть приборов на МИСЗ настраивается и на множество других диапазонов электромагнитного спектра. Например, выбираются данные длины волны в инфракрасном спектре, чтобы радиация была поглощена одним или несколькими газами в атмосфере. Так, при длине волны около 6,2 мкм она и поглощается, и излучается водяным паром в атмосфере. Поэтому информация в канале водяного пара, позволяет распознавать водяной пар на высоте от 3000 метров до 12000 метров над поверхностью Земли. По уровню яркости измерений на снимках можно оценить количество влаги в атмосфере. Радиация, излучаемая нижним слоем водяного пара, поглощается верхними слоями, большая часть излучаемой радиации измеряется со спутника от среднего слоя тропосферы. В результате, области с высоким содержанием водяного пара соответствуют на снимках оттенкам белого цвета или оттенкам серого; более сухие области соответствуют тёмно-серым оттенкам, самые сухие – чёрному цвету. Как правило, холодные области имеют высокое содержание водяного пара, низкую температуру и визуализируются соответственно в светлые тона. Простые расчеты значений разностей каналов

позволяют оценить скопления капельной части на ВГО, преимущественно крупнокапельной, или мелкокапельной части, крупнокристаллической или скоплений мелкокристаллической части на ВГО. Более точные алгоритмы распознавания областей кристаллической части ВГ кучевой облачности требуют разработки соответственно более сложных алгоритмов.

1.4 Обзор методов распознавания зон с высоким содержанием ледяных кристаллов

Современные автоматизированные методы распознавания и наукастинга зон с высоким содержанием кристаллов (HIWC) и ОГК, как правило, основаны на комбинациях измерений МИСЗ и выходных полей моделей численного прогноза погоды.

Например, один из таких методов был разработан в исследовательском центре Langley при NASA (LaRC - Langley Research Center) Кристофером Бедка [25]. Он заключается в двухэтапном анализе инфракрасного канала измерений геостационарного МИСЗ GOES-14 с пространственным разрешением 4 км для получения вероятных объектов-кандидатов, где каждый объект представляет собой кластер пикселей, относящихся к выделяемой верхней части облака. “Рейтинг” каждого объекта затем корректируется на основе результатов анализа видимого канала того же спутника, но с более высоким разрешением – 1 км.

Первоначальной целью данного алгоритма являлось распознавание вершин и куполов конвективных облаков, пробивающих тропопаузу (ОТ), которые связаны с опасными явлениями погоды, такими как сильный ливень, гроза, турбулентность, обледенение, разрушительный ветер, крупный град и торнадо. Предупрежденность распознавания таких областей при прогнозировании по описанному выше алгоритму составила 69% при доле ложных тревог 18%, где за истину принимались отмеченные синоптиками случаи ОТ на спутниковых снимках, а за прогноз (сигнал) – превышение расчётного по модели коэффициента вероятности появления ОТ выше критического значения 0,7.

В 2015 году Melissa Bravin и J. Strapp (2015, [30]) сделали вывод, что высокая концентрация ледяных кристаллов бывает в потоках воздуха вблизи ОТ, на подветренной стороне облака, считавшейся пилотами безопасной для полёта ввиду низких значений отражаемости на бортовых радарах. Впоследствии космонавт Кристофер Бедка и его коллеги разработали продукт «dOT», оценивающий расстояние каждого пикселя на спутниковом снимке от ближайшего купола с определенной сигнатурой (формой) ОТ для установления статистической зависимости между расстоянием «dOT» и концентрацией ледяных кристаллов (IWC – ice water content-соответствующей ледности облачности). Анализ данных, собранных во время полётов 17-18 февраля 2014 года, показал, что часто используемая в задачах распознавания облачности глубокой конвекции разность между яркостной температурой (яркостная=радиационной) при измерениях на средней длине волны 6,5 мкм и яркостной температурой на средней длине волны 10,7 мкм (Brightness Temperature Difference - BTD) в сочетании с разностью между измерениями яркостной температуры на длине волны 11 мкм и модельной температурой тропопаузы (ΔBTW) позволяют выделить опасные области пробивания тропопаузы и область наковальни верхней границы облачности глубокой конвекции. Однако продукт с расчетами BTD не был использован в последующем анализе, так как, во-первых, он не давал никакой новой информации по сравнению с ΔBTW и, во-вторых, обнаружилась зависимость измерений радиационной температуры на средней длине волны 6,5 мкм от типа используемого на спутнике прибора измерений. В то же время, продукты dOT и “оптическая толщина облака” (COD – Cloud Optical Density) предоставляют информацию о подробных деталях структуры верхней границы, сильно коррелирующих с изменчивостью показателя общего влагосодержания (TWC - total water content) [95]. Скомбинированные с помощью методов нечёткой логики продукты ΔBTW , COD, dOT легли в основу алгоритма оценки вероятности высокого содержания ледяных кристаллов (PHIWC – probability of high ice water content) [95]. Принимая за факт наличия превышение значения водности $0,5 \text{ г/м}^3$, авторы получили

предупреждённость на уровне 75% днём и 62% ночью при доле ложных тревог на уровне 35% независимо от времени суток.

Затем, в августе 2018 года NASA было организовано 7 полётов над Мексиканским Заливом и Тихим Океаном для получения информации о водности и ледности облачности глубокой конвекции. Исследуемые облака также наблюдались с нового на тот момент спутника GOES-16 (дискретностью наблюдений 1 и 5 минут). Кристоферу Бедка в 2019 году представил анализ продукта PHWC по новым данным и подтвердил предыдущие выводы [21]. Было отмечено, что пространственное распределение общего влагосодержания на верхней границе облака существенным образом зависит от направления воздушных потоков (сноса). В частности, результаты свидетельствуют о том, что высокую концентрацию ледяных кристаллов следует ожидать не только вблизи области ОТ, но и на некотором расстоянии, на подветренной или наветренной стороне верхней границы облака.

Похожий подход был избран в NCAR при разработке другого известного алгоритма – ALPHA (Algorithm for Prediction of HIWC Areas), описанного в работе Haggerty (2020, [45]). Его основное отличие от алгоритма NASA LaRC состоит в использовании большего количества исходных данных: выходных данных двух прогностических моделей, большего числа продуктов спутниковых измерений, кроме того дополнительно радарных данных. Краткое описание представлено в Таблице 4.

Таблица 4 – Перечень исходных параметров алгоритма ALPHA [45]

Спутниковые продукты	Данные радаров	Параметры Модели WRF	Параметры Модели ACCESS
Температура ВГО	Отражаемость	Относительная влажность	Относительная влажность
Высота ВГО	Максимальная высота при отражаемости >10 dBZ	Потенциальная энергия конвективной неустойчивости (CAPE)	Конвективные осадки с периодом в 1 час
Разность темп-ры BTD (6,8 – 10,8) мкм	Толщина облака (при пороговом значении >18 dBZ)	Температура	Балл облачности верхнего яруса
Измерения радиационной темп-ры ИК 6,8 мкм	Масса ледяных частиц		Балл облачности среднего яруса
	Volume-averaged height-integrated radar reflectivity (VAHIRR)	Температура	Балл облачности нижнего яруса
			Температура

Для обучения алгоритма [45] использовалась часть исходных данных всех лётных экспериментов, перечисленных в Таблице 1. Остальная часть использовалась для валидации, в ходе которой алгоритм продемонстрировал предупреденность на уровне 86% при доле ложных тревог на уровне 51%, причём за фактический сигнал (факт наличия) также принималось превышение общего влагосодержания $> 0,5 \text{ г/м}^3$. Комментируя высокую долю ложных тревог, авторы предположили, что она может быть связана с нерепрезентативностью данных, их неоднородностью в зависимости от географической зоны и времени года. Они также отметили необходимость учёта в алгоритме поправки на географическое положение облачной системы.

Геостационарный МИСЗ Himawari-8 использовался для территории Юго-Восточной Азии, где повторяемость явлений Ice Crystal Icing крайне высока, но данные американского спутника GOES недоступны, Учёными обсерватории Гонконга были собраны сведения о 14 случаях обледенения (Ice Crystal Icing) и 19 случаев без обледенения за период с апреля 2015 г. по октябрь 2016 г, которые были сопоставлены с данными радиационной температуры Himawari-8 в инфракрасном канале и отражаемостью в видимом канале [45]. Их метод основывался на алгоритме случайного леса, то есть ансамбле деревьев решений, каждое из которых использовало свою комбинацию критериев, описанных в Таблице 5.

Таблица 5 – Критерии алгоритма для МИСЗ Himawari-8 [45]

Диапазоны излучения	Порог радиационной температуры, К	Свойства
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 наковальной (ледяные кристаллы)

Простота данного метода оправдана малым объёмом выборки. Тем не менее, он показал себя лучше многих других методов. В частности, авторы статьи [45] сравнили свой алгоритм с действовавшими в 2020 году аналогами:

- алгоритмом расчёта потенциала обледенения (CIP – Current Icing Potential), разработанным в NCAR;
- системой «географической» идентификации и привязки к метеорологическим условиям обледенения для авиации SIGMA (System of Icing Geographic Identification in Meteorology for Aviation), разработанная в

Meteo-France для измерений прибора SEVIRI спутника Meteosat MSG второго поколения;

- использовавшимся ранее в NASA алгоритмом GDCP (GOES-Derived Cloud Products), комбинирующего несколько выходных продуктов на основе измерений МИСЗ GOES.

Соотношения полученных значений предупреждённости и доли ложных тревог представлены в Таблице 6. Согласно результатам, наилучшим по критерию Пирса-Обухова оказался алгоритм CIP при высокой предупреждённости. Однако он существенно проигрывает алгоритму для МИСЗ Himawari по показателю отношения ложных тревог. Необходимо отметить несопоставимость этих результатов с результатами алгоритмов LaRC и ALPHA, так как выборки для их валидации принципиально разные.

Таблица 6 – Показатели качества алгоритма для МИСЗ Himawari в сравнении с другими алгоритмами [45]

Алгоритм	Предупрежденность	Доля 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

В Королевском Метеорологическом институте - KNMI (Нидерланды) был разработан еще один европейский алгоритм – CPP (Cloud Physical Parameter) – с целью выделения областей высокой лёдности, характеризующихся концентрацией ледяных кристаллов больше 1 г/м^3 . Помимо видимого и инфракрасного каналов измерений геостационарного спутника Meteosat MSG алгоритм включал измерения

облачных радаров полярно-орбитальных спутников CLOUDSAT и CALIPSO [34,35]. Перечень использованных параметров включает:

- признак наличия ледяной фазы;
- интегральное влагосодержание, т.е. сконденсированная влага в столбе на единицу площади (выше 100 г/м^2);
- температуру верхней границы облака (ниже 270 K);
- оптическую толщину облака (более 20).

Позднее, этот алгоритм был адаптирован для данных спутника Himawari-8 при валидации на более репрезентативной выборке. Результаты адаптации не привели к достоверному повышению качества и выявили крайне высокую долю ложных тревог – она оказалась равной почти 80% при уровне предупреждённости от 60 до 80%, что нельзя назвать удовлетворительным результатом [4].

Более известный и широко применяемый продукт Meteo-France под названием RDT (Rapid Development Thunderstorm) использует в основном измерения радиационной температуры прибора SEVIRI спутника Meteosat MSG и выходные данные численного прогноза погоды.

Программный комплекс рассмотренный в работе Moisselin J.-M. [73], предоставлял пользователям различную информацию о конвективной облачности: стадию развития, морфологические характеристики, температуру, вероятность гроз, направление и скорость движения. Он сыграл важную роль во время исследовательских полётов в рамках проекта HAIC: локации для полётов выбирались на основе распознанных им зон формирования облачности глубокой конвекции. Рассмотрим технические детали настройки и последующего использования данного алгоритма, которые представлены в Таблице 7.

Таблица 7 – Краткие особенности систем идентификации зон высокого содержания ледяных кристаллов на основе алгоритма RDT

Пункты экспериментов	Дарвин, 2014	Кайенн 2015	Дарвин, 2016	Ла Реньюон, 2016
	Используемые данные МИСЗ и ЧПП			
Спутник, временное разрешение в минутах	MTSAT-1R, 10'	MSG, 15'	Himawari-8, 20'	Meteosat-7, 30'
Версия RDT	Версия 2012, Модель ЧПП Arpege	Версия 2013, Модель ЧПП Arpege	Версия 2013, Модель ЧПП Arpege	Версия 2013, Модель ЧПП Arpege
Тропическое вынуждение	Нет учета	Нет учета	Есть учет (до высот с темп-рой -75°C)	Есть учет (до высот с темп-рой -75°C)
Спутниковые каналы (мкм)	6.2, 7.3, 10.8	6.2, 7.3, 8.7, 10.8, 12.0	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	Cloud products	Cloud products	Cloud products	
Сеть грозопеленгаторов	Не включена	Starnet (используется для описания конвекции, но без разделения случаев наличие/отсутствия конвекции)	Не включена	ATD (используется для описания конвекции, без разделения наличие/отсутствия конвекции)
Основные проблемы	Имеются слоты пропусков, Схема выделения RDT не на 100% адаптирована под данные MTSAT-1R	Параллакс у границ зоны обзора	Алгоритм RDT, Схема выделения RDT не на 100% адаптирована под данные Himawari-8	
Передача на борт исследовательского ВС	Только подготовка	Организована	Организована	Организована

Для проверки целесообразности использования алгоритма RDT, при организации исследовательских полётов в поисках зон HIWC в рамках проекта НАИС-HIWC автор работы Moisselin J.-M [73] оценил согласованность положения выделенных алгоритмом контуров облачности глубокой конвекции и фактически наблюдаемых зон HIWC. Им было установлено, что предупрежденность результатов оказывается значительно выше, если рассматривать контуры, выделенные и в нескольких предыдущих сроках съемки со спутника. Итоговые показатели успешности алгоритма RDT в задаче распознавания зон HIWC представлены в Таблице 8.

Таблица 8 – Показатели успешности алгоритма RDT в задаче распознавания зон высокого содержания ледяных кристаллов

Эксперименты кампании НАИС	Предупрежденность	Доля 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
Реюньон 2016	0,73	0,32	3

В Таблице 8 показано, что для алгоритма RDT характерна высокая доля ложных тревог, что и следовало ожидать ввиду отсутствия необходимой калибровки исходной информации. Он разрабатывался для других целей – для выявления конвективной облачности на разных этапах развития, но в большинстве случаев не связанной с высокой концентрацией ледяных кристаллов. В перспективе планировалось включить в перечень атрибутов, описываемых схемой RDT облаков и облачных систем показатель лёдности (IWC – Ice Water Content), измерения возможные в дневное время; и планировалось также передавать сведения о микрофизике в KNMI для совершенствования алгоритма распознавания зон высокого содержания ледяных кристаллов [73].

Таким образом, все существующие на сегодняшний день алгоритмы распознавания зон высокого содержания ледяных кристаллов опираются на гипотезу о том, что такие зоны неразрывно связаны с ОГК. Поэтому большинство из алгоритмов изначально разработаны для распознавания ОГК или, как в случае с РНІWC, областей пробивания тропопаузы. Некоторые из алгоритмов использовали дополнительно калиброванные с помощью измерений водности и лёдности данные, полученные в ходе экспериментальных полётов.

Ни один из перечисленных алгоритмов на данный момент не используется для прогнозирования зон высокой концентрации ледяных кристаллов (НІWC) на территории Российской Федерации и для российских самолётов, хотя случай 2013 года [11], а также опыт европейских коллег можно рассматривать как повод для беспокойства. Основная сложность в реализации таких продуктов заключается в отсутствии базы данных измерений лёдности и водности вблизи ВГО ОГК, аналогичной базе данных, сформированной в результате лётных кампаний НАІC-НІWC и NASA НІWC-RADAR – без такой информации невозможно оценить точность разрабатываемых алгоритмов. Использование описанных выше методов без предварительной калибровки тоже весьма затруднительно, так как необходимо учитывать региональные особенности и отличия в наборах данных, находящихся в нашем распоряжении.

1.5 Способы выделения областей пробивания тропопаузы мощной облачностью глубокой конвекции с высокой концентрацией ледяных кристаллов

Купола или Области пробивания Тропопаузы (ОТ) возникают на верхней границе облачности глубокой конвекции в результате мощных восходящих движений с силой, достаточной для проникновения сквозь тропопаузу в нижний слой стратосферы. Они служат источником попадания водяного пара в нижний слой стратосферы, что подтверждается спутниковыми наблюдениями [82] и

данными самолётного зондирования [53], и таким образом оказывают значимое влияние на радиационный баланс Земли и климат.

Известно, что кучево-дождевые облака, купола которых пробивают тропопаузу, часто становятся причиной мощных ливневых осадков, шквалистого ветра, града и смерчей [31]. Также, вблизи этих областей часто наблюдаются сильные вертикальные, горизонтальные сдвиги ветра и грозы [95], условия для обледенения двигателей (УсОД), представляющие опасность для авиации. Возникающие в результате пробивания тропопаузы гравитационные волны могут провоцировать высокую турбулентность даже вдали от области пробивания [23].

Области ОТ имеют очень специфические форму и текстуру на спутниковых изображениях. В частности, на снимках в видимом канале электромагнитного (ЭМ) спектра они визуалью напоминают соцветия цветной капусты. Также, их можно отличить на снимках в инфракрасном канале ЭМ (10,8 мкм) как небольшие скопления пикселей с очень низкой температурой. При этом, согласно Adler (1983, [19]), Negri (1982, [74]) температура области ОТ продолжает падать с высотой с градиентом 0,7-0,9°C/100м (а при условиях стандартной атмосферы – 0,6°C/100м) после проникновения в нижний слой стратосферы, делая их значительно холоднее остальной части ВГО, температура которой равна или близка к температуре тропопаузы.

Распознавание областей ОТ на снимках в видимом канале ЭМ, особенно в высоком разрешении (~1 км), возможно только в дневное время. Berendes (2008, [26]) впервые отметил следующую особенность: если человек может эффективно распознать нужную форму и текстуру в утреннее и вечернее время по снимкам, то автоматизированные алгоритмы дают высокую долю ложных тревог из-за малых значений отражаемости в это время суток. Поэтому, далее большое внимание уделяется разработке методов распознавания на основе измерений температуры в инфракрасном канале, доступных и в ночное время. Наиболее значимой характеристикой считается разность между измерениями в диапазоне длин волн 6,2

или 6,7 мкм, соответствующем полосе поглощения инфракрасной радиации водяным паром (связи с этим измерения в данном диапазоне часто обозначают аббревиатурой WV – water vapor), и измерениями в инфракрасном диапазоне со средней длиной волны 10,8 мкм [83,24,19]. Как правило, значения температуры ИК (10,8) выше значений температуры ИК 6,2-6,7 мкм. По мере приближения ВГО к уровню тропопаузы, температура ИК 10,8 мкм падает быстрее, чем ИК 6-7 мкм, в результате чего эти две величины могут стать равными. Если высота ВГО продолжит расти, разность между ИК 6,2 мкм и ИК 10,8 мкм (BTD, Brightness Temperature Difference) становится минимальной, близкой к 0, или может стать положительной. Также, в работе [24] отмечается, что мощные восходящие движения выносят частицы водяного пара в нижний слой стратосферы, где температура выше, чем в верхнем слое тропосферы и, соответственно, выше температуры ВГО. Соответственно критерий положительной разности BTD активно используется для идентификации ОГК и куполов ВГО, пробивающих тропопаузу [67].

Следует заметить, что даже простейший метод распознавания областей ОТ на основе величины BTD требует выбора порогового значения, которое может меняться в зависимости от пространственного разрешения и характеристик интервалов электромагнитного спектра спутниковых измерений. Кроме того, пороговое значение может зависеть от интенсивности восходящих движений, температурного градиента в атмосфере и времени существования водяного пара в стратосфере. Например, для измерений спутника GOES-12 с разрешением 4 км оптимальным пороговым значением считается значение +1 К – если величина BTD для выбранного пикселя превышает это значение, то пиксель отмечается как часть области ОТ [67]. Но этот же метод в применении к измерениям спутника MODIS с разрешением 1 км пороговое значение выделяет не только саму область ОТ, но и окружающую её ВГО ОГК, то есть демонстрирует высокую долю ложных тревог. В то же время, выбор значения +2 К в качестве порогового для измерений

существенно снижает долю ложных тревог. В нашем распоряжении были данные, аналогичные геостационарному МИСЗ GOES – METEOSAT MSG.

Повышение качества результатов распознавания областей ОТ также возможно за счёт учёта горизонтальных градиентов температуры, так как искомые области, как правило, значительно холоднее окружающих ОГК [19]. Оценкой того, насколько холоднее окружения, может служить разность температуры этой области (или конкретного пикселя) и средней температуры в некоторой окрестности. Очевидно, что величина будет зависеть от размера окрестности. В частности, в статье Bedka [24] показано, что в зависимости от порогового значения разности и количества пикселей, входящих в окрестность, доля ложных тревог меняется от 4,2 до 38,8%. В качестве оптимальных были выбраны следующие параметры: пороговое значение разности температуры пикселя и средней температуры его окрестности (соседних 8 пикселей) – 6,5 К (что примерно соответствует возвышениям купола над ВГО на 0,7 - 0,9 км [19]).

Более того, в работе [24] было предложено учитывать температуру тропопаузы, рассчитанную моделью численного прогноза погоды. В частности, использовались модельные значения температуры GFS (Global Forecast System) с заблаговременностью 6 часов и разрешением 0,5x0,5 градусов, спроектированные в координаты спутниковых данных. Пиксель отмечался как часть области ОТ лишь, если его температура в диапазоне ИК 10,8 была ниже оцененной таким образом температуры тропопаузы. Необходимо отметить, что этот критерий был впоследствии адаптирован с учетом данных прибора SEVIRI спутника Meteosat MSG с более низким пространственным разрешением и применен соответственно для Европейской территории [22]. В частности, допускалось, что температура пикселя может быть выше температуры тропопаузы, но не более чем на 2,5 К (°C).

К преимуществам описанного выше метода перед простым пороговым методом, анализирующем лишь величину ВТД, можно отнести следующие преимущества:

- 1) критерий не чувствителен к горизонтальному и вертикальному распределению водяного пара в атмосфере;
- 2) измерения температуры в канале WV, которые зависят от ширины диапазона и среднего значения длины волны в диапазоне, в данном методе не требуется использовать в соответствии с работой [24].

Выводы по Главе 1:

1. Результаты исследований экспериментальных полетов показали, что зоны высокого риска обледенения двигателей самолетов формируются вблизи или внутри кристаллического слоя верхней границы облачности глубокой конвекции (ОГК) при ледности более $1,5 \text{ г/м}^3$.
2. Оптимальным способом определения зон высокого риска обледенения двигателей самолётов является диагноз облачности глубокой конвекции по данным геостационарных МИСЗ в связи с отсутствием регулярных измерений лёдности и водности на верхней границе ОГК.
3. Наиболее высокая вероятность условий обледенения двигателей (УсОД) выявлена в окрестностях куполов пробивания тропопаузы (ОТ) на верхних эшелонах полетов в слое кристаллической части ОГК при высокой концентрации (более $1,5 \text{ г/м}^3$) мелких ледяных кристаллов (от 320 до 690 мкм).
4. Рассмотрен ряд алгоритмов распознавания зон высокого содержания ледяных кристаллов, которые опираются на гипотезу о том, что такие зоны неразрывно связаны с ОГК. Большинство из алгоритмов изначально разработаны для распознавания ОГК и областей пробивания тропопаузы. Часть алгоритмов основана на данных измерений, полученных в ходе экспериментальных полётов. Оптимальными следует считать существующие алгоритмы с использованием радиационных температур геостационарных МИСЗ и прогностических модельных данных о температуре ВГО ОГК, которые показали лучшие результаты эффективности.

5. Ни один из перечисленных алгоритмов на данный момент не используется для прогнозирования зон высокой концентрации ледяных кристаллов (HIWC) на территории Российской Федерации и для российской авиации, Основная сложность в реализации таких продуктов заключается в отсутствии базы данных измерений лёдности и водности вблизи ВГО ОГК. Выявленные критерии при определении УсОД не только в тропических регионах, но возможно использовать и для умеренных широт, в первую очередь, для территории ЕТР.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЛАЧНОСТИ ГЛУБОКОЙ КОНВЕКЦИИ И ОБЛАСТЕЙ ПРОБИВАНИЯ ТРОПОПАУЗЫ ПО ДАННЫМ ГЕОСТАЦИОНАРНОГО МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ИСКУССТВЕННОГО СПУТНИКА ЗЕМЛИ И МОДЕЛИ ЧИСЛЕННОГО ПРОГНОЗА ПОГОДЫ ДЛЯ ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

2.1 Обзор автоматических способов выделения и мониторинга облачности глубокой конвекции, являющейся основным условием наличия высоких концентраций ледяных кристаллов

Применение статистических и комплексных методов спутниковой информации требуют многолетних и многоканальных данных и объемов информации. Кроме того, для решения описанных в Главе 1 задач наличие больших объемов спутниковых наблюдений необходимо, но недостаточно. Крайне важно уметь правильно их обрабатывать, анализировать. Далее в представляемой главе будет рассмотрена комплексная методика распознавания и мониторинга ОГК на основе информации МИСЗ. Важно отметить, что предлагаемый подход возможно применить к измерениям любых геостационарных спутников в инфракрасном диапазоне электромагнитного спектра, включая российские, но разрабатывался и тестировался он на данных прибора SEVIRI спутника Meteosat-9,10 и 11, удовлетворявших требованиям, включая многолетние ряды наблюдений МИСЗ.

Распознавание объектов ОГК – процесс поиска квадратов или прямоугольников на земной поверхности, видимых с высот МИСЗ как точки, (или пикселей), гипотетически относящихся к глубокой конвекции, и их последующее объединение (либо разбиение) на кластеры, которые мы условимся дальше называть объектами. Сложность этой задачи заключается в том, что приборы, установленные на МИСЗ, измеряют не только радиационную или яркостную температуру ОГК, но и одновременно температуру ВГ облачности другого типа, а

также подстилающей поверхности. Поэтому необходимо учитывать данные в каждом пикселе и сравнивать с данными окрестных пикселей и рассматривать динамику (мониторинг) облачных контуров (объектов ОГК).

Мониторинг объектов ОГК, их смещение (трекинг), – процесс установления соответствия между выделенными объектами в последовательные моменты времени. Сложность задачи, в свою очередь, обусловлена спецификой процесса развития глубокой конвекции: распознанные объекты могут распадаться, регенерировать, дробиться на несколько малых объектов и т.д. – всё это затрудняет распознавание и мониторинг, нужен детальный учет [92].

Разработанная в Гидрометцентре система мониторинга облачности глубокой конвекции (СМОГК) описана в работах [13,15] для предоставления информации о развитии ОГК над территорией России в оперативном режиме. В рамках данной работы представлено расширение функционала системы для определения зон высокого содержания ледяных кристаллов, опасных для авиации, и наукастига их смещения. Подробная схема разработанной системы представлена в Приложении, на Рисунке 1. Её главные отличия от аналогов, разработанных другими исследователями и используемых в других странах – это 1) объектно-ориентированный подход к построению исходной выборки и валидации статистических моделей; 2) применение методов машинного обучения для учёта большого количества параметров ВГО (более 100) при распознавании ОГК.

2.2 Методические аспекты распознавания облачности глубокой конвекции по спутниковым измерениям радиационной температуры на основе пороговых значений

Начальный этап включает идентификацию измерений каждого пикселя (пикселя минимального размера, в виде квадрата или точки, видимой с высот геостационарного МИСЗ – 36 тыс. км), по отношению к наличию/отсутствию к глубокой конвекции. Анализ цифровых данных обычно рассматривает выбранный

размер матрицы данных, соответствующей определённому для территории фрагменту информации из полного диска измерений МИСЗ (полный диск включает матрицу пикселей до 72° от нулевого меридиана на запад и восток; до 72° от экватора на север и юг). Пусть в момент времени t МИСЗ передаёт измерения температуры на K разных диапазонах длины волны λ_k в виде матрицы $T_{ij}^t(\lambda_k)$ размерности $H \times W$, где H – число строк по широте (пикселей высота), W – число столбцов (ширина). Каждый элемент такой матрицы – функция от λ_k .

Далее, на основе этих данных, можно задать матрицу-индикатор C^t той же размерности. Правило вычисления каждого элемента этой матрицы можно представить в виде функции f от K переменных:

$$C_{ij}^t = f(T_{ij}^t(\lambda_1), T_{ij}^t(\lambda_2), \dots, T_{ij}^t(\lambda_K)),$$

$$j = 1, \dots, W, i = 1, \dots, H. \quad (2.1)$$

Функция f возвращает единицу при выполнении некоторого условия и нуль в противном случае. Элемент матрицы с индексами (i, j) (пиксель) можно считать частью конвективной ячейки ($C_{ij}^t = 1$), если выполняется ряд условий, каждое из которых опирается, либо на попадание в заданные пределы температуры в определённом диапазоне длины волны, либо на заданные пределы значений разностей измерений температуры в двух диапазонах излучения.

Рассмотрим, в простейшем случае, когда измерения в каждом диапазоне проверяются на попадание в определённые интервалы значений, т.е. формулу для C_{ij}^t можно записать в виде функции-индикатора, принимающей значение 1, если $T_{ij}^t(\lambda_k) \in [\tau_{min}^t(\lambda_k), \tau_{max}^t(\lambda_k)]$ и 0 в противном случае. Здесь $\tau_{min}^t, \tau_{max}^k$ – функции, определяющие, соответственно, нижнее и верхнее пороговые значения температуры в зависимости от длины волны λ_k .

Часто, на практике, приходится использовать более сложные правила. Например, дополнительную и нередко важную информацию можно получить из разностей нескольких каналов. В частности, разность значений радиационной

температуры (ИК 6,2 – ИК 10,8), благодаря описанным выше свойствам этих диапазонов, позволяет более точно выявить высокие, насыщенные влагой облака, вероятно относящиеся к глубокой конвекции. Обычно эта разность принимает отрицательные значения, так как температура поверхности Земли и нижней части тропосферы выше температуры водяного пара в верхней части тропосферы. Но наличие интенсивной конвекции в верхней части тропосферы приводит к тому, что температура в канале ИК 10,8 будет ниже температуры в канале ИК 6,2, а значит, разность будет положительной [69]. Исследования [88] также показали, что положительные значения разностей могут свидетельствовать о формировании твердой фазы влаги (льда) на ВГО. Похожим, но более строгим является критерий, основанный на разности значений радиационной температуры каналов (ИК 6,2 - ИК 7,3) мкм: разность значений служит для оценки высоты облака, принимая, в основном, отрицательные значения при малой высоте верхней границы облака, близкие к нулю или положительные значения при больших высотах [69].

Дополнительно, многие исследователи прибегают к анализу временных трендов температуры в тех или иных каналах. Так, считается, что 15-минутный тренд значений разностей яркостных (радиационных) температур (ИК 6,2 - ИК 7,3) позволяет оценить интенсивность (скорость) вертикального развития облака [18]. Поэтому значение тренда будет небольшим, (т.е. замедление интенсивности развития) для стадии зрелой ОГК, и соответственно означает уменьшение разности между каналами ИК 6,2 и ИК 7,3 [69]. Похожим образом можно интерпретировать тренды других каналов и разностей каналов – некоторые из них могут принимать как отрицательные значения, так и положительные, в зависимости от стадии развития облачности.

Разработчики алгоритма Cb-TRAM дополнительно учитывали показатели текстуры ВГО для повышения показателя предупрежденности [97]. В частности, в дневное время рассчитывалось взвешенное среднеквадратичное отклонение отражаемости в видимом канале высокого разрешения – HRV (High Resolution Visible). Если рассчитанное значение оказывалось выше, чем для 65% случаев ОГК

из базы данных (т.е. квантиля уровня 0,65), то оно использовалось как повышающий коэффициент для разности (ИК 6,2 - ИК 10,8). Таким образом, низкие (и даже отрицательные) значения разности каналов (ИК 6,2 - ИК 10,8) могли компенсироваться показателем характерной для ВГО ОГК текстуры. В ночное время вместо канала HRV использовался канал ИК 6,2, но в этом случае рассчитанное среднеквадратичное отклонение сравнивалось с квантилем уровня 0,75 [109].

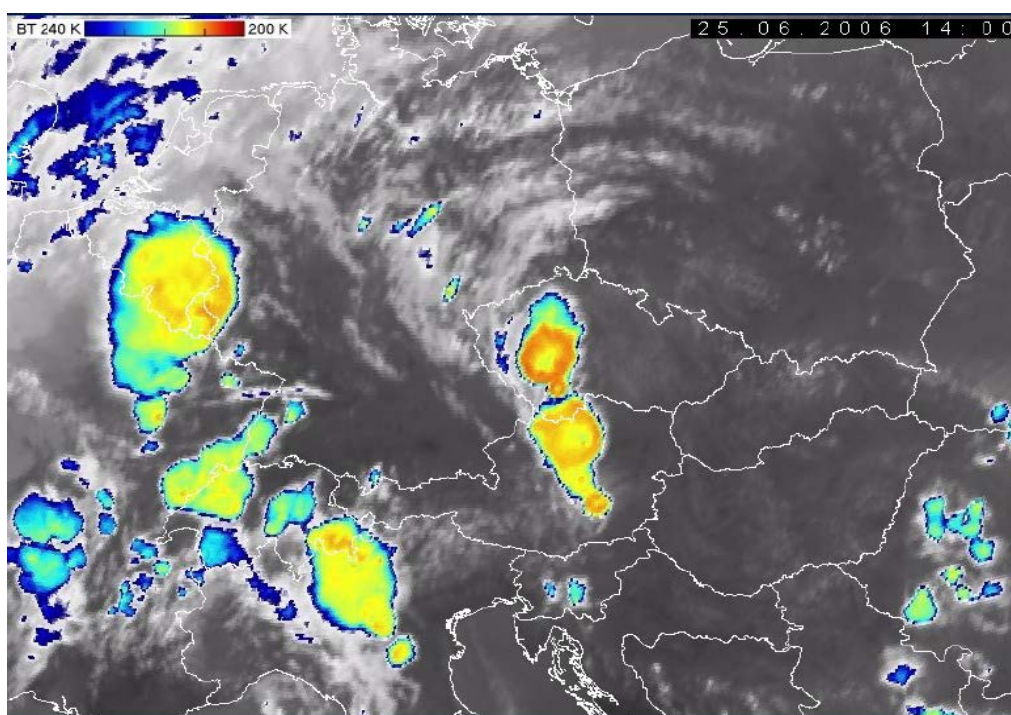


Рисунок 4 – Пример выделения областей глубокой конвекции по данным о температуре в инфракрасном канале (ИК 10,8) с пороговым значением в 240 К [56]. Цветом выделены контуры с распределением температуры ниже -240К.

Более строгий статистический анализ был проведён в работе R. Matthee и J.R. Mecikalski [69,70]. Они исследовали диапазоны температуры во всех каналах, доступных для измерений с помощью прибора SEVIRI (МИСЗ MSG METEOSAT), для двух выборок: в случаях, когда имелись облака, вблизи которых за некоторый промежуток времени была зафиксирована гроза, и в случаях, когда имелись облака,

которые не привели к возникновению опасных явлений. На основе полученных распределений температуры были выбраны оптимальные пороговые значения.

Безусловно, характерная температура ОГК зависит от многих факторов, включая время года, склонение солнца, географическое положение и др. Поэтому универсальность порогового метода кажется сомнительной. Meciakalski и Jewett (2013, [57]) попытались решить эту проблему с использованием переменных порогов, которые определялись на основе алгоритмов статистического анализа. Было доказано превосходство данного метода над простыми фиксированными порогами [57].

Очевидно, что выбор высоких значений порога (с более высокой температурой) в инфракрасном канале излучения может привести к слиянию нескольких ячеек системы в одну, а более низкого порога (с более низкой температурой) – к занижению результатов объединения и позднему выявлению развивающейся конвективной системы. Поэтому разработчики алгоритма NWC SAF RDT [36] предложили применять несколько порогов $\tau(\lambda_k) = \tau_{max}(\lambda_k), \tau_{max}(\lambda_k) - \Delta\tau(\lambda_k), \tau_{max}(\lambda_k) - 2\Delta\tau(\lambda_k), \dots, \tau_{min}(\lambda_k)$. Основная цель алгоритма – выделить наибольшее число ячеек конвективной системы и ответить на вопрос – имеется облачность ОГК или нет.

После процедуры выделения первичной маски, мы получаем разбиение массива данных (исходного изображения) условно на два класса: «конвекция» (наличие ОГК) и «не конвекция» (отсутствие ОГК). Для дальнейшего анализа затем требуется сгруппировать пиксели в отдельные кластеры (далее – объекты), соответствующие независимым конвективным ячейкам или мезомасштабным конвективным системам (МКС). Выделение отдельных, непересекающихся кластеров пикселей возможно с помощью применения алгоритмов выделения контуров, таких как алгоритм «следования по границе» [90]. Основная идея алгоритма заключается в определении принадлежности пикселя к тому или иному кластеру с помощью морфологического фильтра со структурным элементом

$$s = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

для соотнесения связанных областей к маске C – то есть мы будем считать, что пиксель (i, j) принадлежит объекту, если

$$C_{ij} = C_{(i+1)j} = C_{i(j+1)} = C_{(i-1)j} = C_{i(j-1)} = 1. \quad (2.3)$$

Результаты работы этих процедур изображены на Рисунке 5.

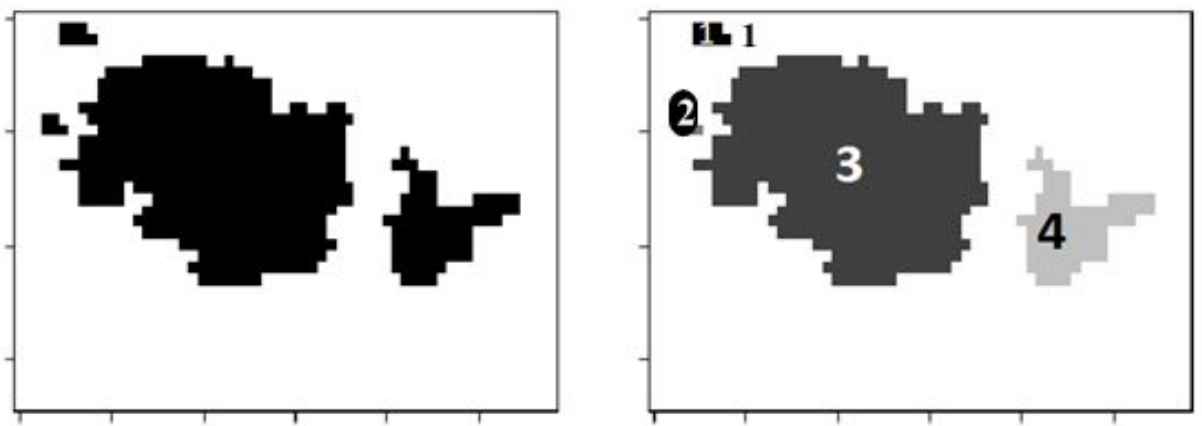


Рисунок 5 – Иллюстрация результата выделения маски ОГК (слева) и её разбиения на отдельные объекты (1,2, 3 и 4 справа)

Геометрическая форма выделенных пороговым методом объектов, как правило, такова, что отдельные пиксели группируются в кластеры выпуклой формы с чётко выраженными центрами (для облаков более кратко назовем термином «ячейка») однако их выделение может вызвать трудности в случае, если несколько конвективных ячеек расположены очень близко друг к другу или объединяются в одну конвективную систему. Если слияние нескольких ячеек недопустимо, можно воспользоваться методами математической морфологии, позволяющими расширить, сжать объект, заполнить пустоты («дыры») внутри него или разбить его на несколько объектов меньшего размера [45].

Современные способы решения задачи распознавания ОГК часто обращаются и к более сложным методам сегментации изображений. Например, большой популярностью пользуется метод разрастания областей (region growing)

[79]. На первом шаге алгоритма выделяются кластеры облачности с самыми низкими температурами (при очень низком пороге), затем порог температуры поднимается и выделенные пиксели либо присоединяются к объектам, распознанным на предыдущем шаге, либо относятся к новым объектам. Процедура заканчивается, когда порог достигает заранее задаваемого максимального значения, которое зависит от разрешения спутниковых данных и рассматриваемой территории [43].

На основе метода разрастания областей, например, реализован современный алгоритм распознавания ОГК TOOCAN [39]. Метод был изначально предложен в качестве решения задачи сегментации изображений. В общем случае, он требует выделения “семян”, то есть пикселей или целых областей, с которых начинается разрастание искомых областей [81; 17]. Важно заметить, что данные МИСЗ имеют свою специфику, так как представляют собой измерения температуры в разных диапазонах электромагнитного спектра и имеют физический смысл, которым нельзя пренебречь. Поэтому, указанный метод требует учета физических особенностей и некоторой адаптации. Основное его преимущество – способность распознавать объекты ОГК меньшего размера, чем те, которые получаются в результате применения более простых методов. В то же время, данный алгоритм использует измерения температуры на одной длине волны (в основном, 10,8 мкм) и не позволяет использовать другие, что приводит к высокой вероятности ошибочного отнесения, например, перистых облаков к классу ОГК.

Существуют и более инновационные разработки. Например, алгоритм, основанный на методе, получившем в иностранной литературе название Source Apportionment [85]. Учёт изменчивой формы конвективных систем был предложен при использовании метода «линий уровня» [91]. Сюда же можно отнести алгоритмы машинного обучения: например, Mecikalski и Jewett (2015), которые оценивали вероятность возникновения глубокой конвекции с помощью алгоритмов случайного леса и логистической регрессии в применении к комбинации данных спутника GOES-16 и прогнозов численной модели. Разработанный ими метод

показал существенное снижение доли ложных тревог (False Alarm Rate) [71]. Важно отметить, что для построения обучающей выборки они использовали дополнительно наземные радарные данные.

Похожие алгоритмы предлагали Н. Han et al. [47] и S. Lee et al. [62], однако их подход отличался тем, что формирование исходной выборки было основано на данных, которые выбирались вручную экспертами, без использования радарных данных. Очевидный недостаток такого подхода – высокая трудоёмкость. Одно из возможных решений совсем недавно предложили D. Han и J. Lee [46]: они реализовали алгоритм автоматической генерации обучающей выборки на основе радарных данных и последующей настройки модели распознавания на новых данных.

Тем не менее, эффективность продвинутых алгоритмов компьютерного зрения для поставленной задачи сомнительна, так как они пренебрегают физическим смыслом рассматриваемого процесса. Отсутствие репрезентативной тщательно сформированной выборки затрудняет валидацию таких алгоритмов, и не позволяет объективно оценить их эффективность. Успешная работа на данных за один период не гарантирует такого же успеха в любой другой период: образование ОГК – относительно редкое явление и в каждом случае чем-то уникален. Таким образом, для объективности нужно брать репрезентативные временные ряды с чёткими метками “конвекция/не конвекция”. Как было отмечено ранее, поиск такой информации – очень трудоёмкий процесс. Поэтому автоматическое распознавание требует большой подготовки, создания качественных обучающих выборок и алгоритмов машинного обучения, которые опираются на четкое выделение классов. Именно поэтому пороговые методы до сих пор остаются наиболее популярным выбором исследователей.

Рекомендуемые R. Matthee и J.R. Mecikalski [69; 70] пороги были использованы и валидированы в данной работе при разработке системы мониторинга облачности глубокой конвекции (СМОГК), внедренной в настоящее время в Гидрометцентре РФ. Полный перечень критических значений представлен в Таблице 9.

Таблица 9 – Каналы, используемые для построения алгоритма детектирования.

Величина	Значения температуры (К)	Описание
$T_{ij}^t(10,8)$	< 233	Характерный диапазон температуры верхней части облака.
$T_{ij}^t(6,2) - T_{ij}^t(10,8)$	> -10	Характерные значения для оценки вертикальной мощности облака.
$T_{ij}^t(6,2) - T_{ij}^t(7,3)$	> -4	Дополнительные характерные значения для оценки толщины верхней части облака.

Таким образом, мы получаем множество конвективных ячеек (или кластеров, если алгоритму не удаётся выделить отдельную ячейку.) Для простоты мы будем называть их объектами. Набор объектов и их маски изменяются со временем. Условимся называть эти маски наблюдениями объектов.

Так как наблюдения объекта характеризует состояние объекта в определённый момент времени, будем во всех дальнейших обозначениях применять верхний индекс t для привязки переменных к этому моменту. Так, маску n -го объекта в момент времени t мы будем обозначать как Z_n^t – это матрица такой же размерности, что и исходная матрица температуры, но её элементы принимают значения из множества $\{0,1\}$.

Важно добавить, что маски объектов не пересекаются, то есть не имеют общих пикселей. Отсюда

$$\prod_{n=1}^{N^t} Z_n^t = 0, \quad (2.4)$$

где N^t - число объектов в момент времени t .

Необходимо отметить, что при разработке данного алгоритма детектирования ОГК не учитывались форма и распределение температуры на верхней границе внутри контуров объектов. Более того, отсутствовало достаточное количество фактических наземных наблюдений в области выделяемых ОГК, то есть для оценки объектов по дистанционным данным отсутствовал необходимый репрезентативный массив данных о наблюдаемых случаях глубокой конвекции у

земной поверхности, что не позволяло объективно оценить степень опасности и качество автоматического распознавания ОГК. В ряде опубликованных ранее работ с учётом опыта применения пороговых методов отмечалось, что для этих методов характерна высокая доля ложных тревог (FAR - False Alarm Rate) – от 50 до 90% в зависимости от методики валидации значений предупреждённости более 90%. В связи с этим, нами в дальнейшем предприняты меры по снижению доли ложных тревог с помощью методов машинного обучения, опирающихся на статистический анализ параметров верхней границы облака и их динамики. Для получения обучающей выборки потребовалось связать положение и параметры ВГО ОГК в последовательные моменты времени с помощью процедуры трекинга, описанной в Разделе 2.3.

2.3 Методика автоматического расчёта трекинга (смещения) облачности глубокой конвекции по данным метеорологических искусственных спутников Земли

Процедуру установки связи между объектами, идентифицированными на предыдущем $(t - 1)$ и текущем (t) шаге называют трекингом (от англ. tracking – “слежение”). Вообще говоря, это можно сделать несколькими способами, каждый из которых формирует некоторую гипотезу относительно назначений. Мы предполагаем, что процедуру установления соответствия между известными объектами и новыми наблюдениями можно проводить последовательно, шаг за шагом.

Введём в рассмотрение случайную величину r_m^t , принимающую значение n , если n -ая маска принадлежит m -му объекту, или 0, если объект исчез (распался). При этом, $m = 1, \dots, N^{t-1}$, $n = 1, \dots, N^t$, $t = 2, 3, \dots$.

Следует отметить, что множество объектов непостоянно: на каждом шаге некоторые из старых объектов могут исчезнуть, а также могут появиться новые. Это существенно усложняет задачу. С другой стороны, мы исключаем возможность

«возвращения» объекта – ситуации, когда, исчезнув на каком-то предыдущем шаге, он появляется вновь. Отсюда следует, что если объект был выделен на шаге $t - 1$, на шаге t он отсутствовал, а на шаге $t + 1$ появился вновь, то наш алгоритм зафиксирует его распад на шаге t , а затем рождение нового объекта.

Заметим, что поставленная задача решалась в рамках других алгоритмов трекинга конвективных штормов. Например, алгоритм Сб-TRAM [109] и его многочисленные модификации (например, MASCOTTE [32]) опирались на сравнение фактических и прогнозируемых наблюдений в момент времени t . Последние, при этом, формируются на основе модели оптического потока, построенной на истории изменения матрицы наблюдений.

В качестве критерия схожести эти алгоритмы используют нормированную площадь пересечения двух объектов (их масок). То есть, при сравнении n -ой маски Z_n^t , сформированной в момент времени t , и прогнозируемого состояния k -ой маски $\hat{Z}_k^t$, выделенной в момент времени $t - 1$, показатель рассчитывается по формуле

$$S_{kn}^t = \frac{\sum_{i,j} z_{nij}^t \hat{z}_{kij}^t}{\sum_{i,j} \hat{z}_{kij}^t}. \quad (2.5)$$

Наш алгоритм использует такой же критерий с той лишь разницей, что прогнозируемые значения $\hat{Z}_k^t$ заменяются на фактические значения k -ой маски Z_k^{t-1} в момент времени $t - 1$. Мы предполагаем, что смещение и деформация объекта за один временной шаг (15 минут) незначительны, а значит вычислительно сложной процедурой расчёта оптического потока можно пренебречь.

Ещё одна особенность нашего алгоритма [15] заключается в формулировании задачи установления соответствия между объектами в разные моменты времени как оптимизационной с единой целевой функцией, в то время как алгоритм Сб-TRAM и его модификации выполняют оптимизацию простым перебором [109].

2.4 Методология сопоставления данных об опасных явлениях с объектами облачности глубокой конвекции, распознанными пороговым методом

Подтверждающие индикаторы наличия ОГК выбраны из стационарных наблюдений в коде КН-01, и привлекались данные об опасных явлениях (ОЯ) из Европейской Базы Опасных Явлений Погоды (European Severe Weather Database). При этом, учитывались сведения из надёжных источников (категория высокого качества QC1) и научные исследования (категория качества QC2), чтобы исключить ненадёжные, недостоверные случаи из рассмотрения [38; 73]. Для исследования учитывались следующие типы ОЯ: сильный ветер, смерч, град, сильный ливень, гроза. По каждому зафиксированному в базе явлению имеются следующие сведения: географические координаты (долгота, широта), дата и время, погрешность положения по пространству в километрах, погрешность определения времени в минутах, отмечается также тип явления.

Регулярные наблюдения сети метеорологических станций в кодах SYNOP о явлениях использованы для формирования базы наличия и отсутствия ОГК, но по числу наблюдений с конвективными явлениями составляли заметно меньшее количество. В частности, учитывались конвективные явления с кодами: 17 (гроза без осадков на станции), 18 (шквал), 19 (смерч), 29 (грозы), 64-65 (сильный дождь), 82-89 (ливни, град), 91-99 (грозы). По каждому зафиксированному в базе явлению предоставляются следующие сведения: географические координаты (долгота, широта), дата и время. Погрешность по времени учитывалась как отклонение от фиксированного в сообщении значения: ± 10 минут; если же наименование типа явления содержало фразу “в предыдущий час”, то использовалась погрешность -1 час/ ± 10 минут.

Опасное явление, как правило, носит локальный характер точечного масштаба и описывается точкой на карте, а контуры объектов ОГК представляют собой многоугольники и овалы, их синхронизация проводилась с определёнными допусками, как описано ниже.

Обозначим номер наблюдавшегося явления как k . 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, представляющей собой окружность заданного радиуса с заданной координатой центра:

$$B_k = \{(\lambda, \phi): (\lambda - \lambda_k)^2 + (\phi - \phi_k)^2 \leq \epsilon_1^2\}. \quad (2.6)$$

Данные SYNOP (каждая телеграмма) не содержат регулярных сведений о погрешности в пространстве, но её надо учитывать. Имеются наблюдения явлений не только в точке, но и в окрестности метеостанции. Во многих исследованиях величину погрешности по пространству принимают равной от 10 до 50 км, но наиболее достоверно склоняются к 30 км – поэтому и в данной работе выбрано чаще всего встречающийся предел.

Погрешность по времени учитывается, поскольку, k -ое 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. Аналогичным образом, 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.

В данном исследовании объект ОГК считался подтверждённым, если за всё время наблюдения вблизи него наблюдалось хотя бы одно опасное явление. Подчеркнём, что объект может наблюдаться в течение нескольких часов, в то время как ОЯ может длиться недолго или происходит одномоментно (с учетом погрешности). Мы предполагали, что принадлежность объекта к классу – это свойство, не меняющееся со временем. Рассмотрим математическую формулировку этого принципа.

Предположим, что в выборке имеется K явлений и N объектов. Пусть C_n^t - контур k -го объекта в момент времени t , t_n^b - время зарождения n -го объекта, а t_n^d - время распада n -го объекта. Момент времени $t \in [t_n^b, t_n^d]$ - момент наблюдения за

объектом ОГК. Далее правило связи объекта ОГК и опасного явления можно сформулировать следующим образом.

Объект ОГК считается подтверждённым (confirmed), то есть относится к классу ОГКс, если в существующий момент времени t имеется опасное явление с индексом k такое, что выполняются 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 считается неподтверждённым (unconfirmed), то есть относится к классу ОГКи.

Данный набор условий можно было бы считать достаточным, если бы ему удовлетворял лишь один единственный объект ОГК, но на практике часто встречается более сложная ситуация: для k -го явления условиям 1-2 удовлетворяют несколько объектов ОГК. В этом случае, среди всех подходящих под определение объектов-кандидатов выбирается ближайший по пространству: объекты ранжируются по расстоянию $d(C_n^t, p_k)$ и выбирается лишь первый объект из списка. При этом, близость по времени не учитывается: при ранжировании выбираются все объекты, совпадающие с явлением по времени с учётом погрешности. Рассматриваемый принцип иллюстрирован на Рисунке 6. Видно, что в область, очерченную окружностью с радиусом, равному погрешности по пространству ϵ_1 , попадают объекты с индексами 1 и 3; объект с индексом 2 не рассматривается, так как в эту область не попадает. При выделении двух объектов на одинаковом расстоянии, во внимание принимается ближайший по времени.

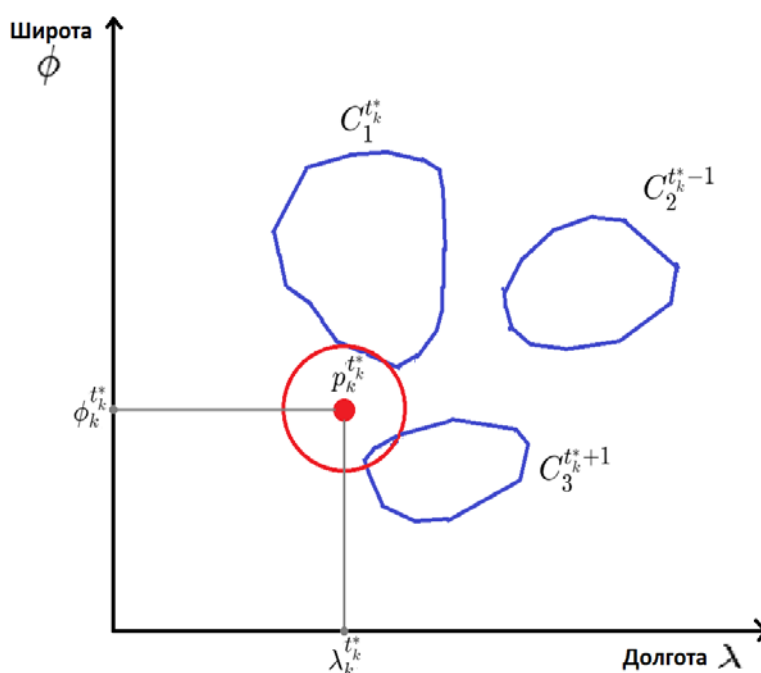


Рисунок 6— Иллюстрация принципа связи контуров объектов (синие многоугольники) ОГК и опасного явления (красная точка) с учётом погрешности по пространству (красная окружность с радиусом, равным величине погрешности)

Таким образом, предупреждённость распознавания объектов класса ОГКс с помощью пороговых методов равна 100%. Предлагаемая методика соотнесения объектов ОГК с наблюдаемыми ОЯ позволяет оценить долю ложных тревог, так как объекты класса ОГКи представляют собой “ложные” ОГК – мелкую конвекцию, не достигшую стадии ОГК, и облачность другого типа. При этом, нельзя исключать возможную неполноту данных об ОЯ.

2.5 Оценка параметров формы и распределения температуры на верхней границе облачности глубокой конвекции

В результате применения пороговых методов и алгоритма трекинга, описанных выше, появляется возможность собрать базу данных объектов ВГО ОГК с учетом информации о состоянии 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”.

Это состояние можно определить набором показателей, характеризующих распределение радиационной температуры на верхней границе ОГК (см. Таблицу 10) и форму (см. Таблицу 11) в определённый момент времени. В качестве параметров или показателей ОГК рассчитывались данные о гистограммах распределения температуры верхней границы облачности (ВГО) в каждом канале.

Таблица 10 – 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 11 – 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 (пиксели)	Размер объекта (диаметр)
Длина большей оси описывающего эллипса (пиксели)	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 нами были отнесены к категории статических, так как они описывают состояние объекта ОГК в определенный момент измерения (полный перечень представлен в Приложении, Таблице 3). 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 были добавлены следующие величины (полный перечень представлен в Приложении, Таблице 4):

1. изменение температуры (в Кельвинах);
2. изменения показателя плотности и моментов Хью (показатели безразмерные) [54];
3. изменение осей и площади эллипса, описывающего форму объекта (относительные, в долях);
4. средние значения каждого из трёх предыдущих величин за последний час (скользящее среднее).

Перечисленные величины характеризуют смещение объектов, поэтому их можно отнести к группе динамических показателей. В связи с тем, что дискретность исходных данных по времени составляет 15 минут, и, согласно результатам анализа повторяемости ОГК в зависимости от продолжительности жизни [15], 65% всех объектов распадается в течение первого часа, для расчёта динамических показателей были выбраны следующие временные окна: 15, 30 и 60 минут до срока наблюдения как наиболее информативные для распознавания и прогноза.

Перечисленные параметры содержат важную информацию о состоянии ОГК и, следовательно, могут быть использованы для уточнения результатов применения пороговых методов счёт введения дополнительных критериев классификации объектов на классы ОГКс и ОГКи. Однако выбор релевантных пороговых значений для этих показателей – задача нетривиальная; для её решения необходим

подробный статистический анализ. Так как количество показателей велико, задачу распознавания объектов класса ОГКс можно свести к стандартной задаче распознавания образов (классификации). Большой объём выборки делает возможным использование методов машинного обучения.

2.6 Применение методов машинного обучения для алгоритма распознавания объектов облачности глубокой конвекции, зон высокой угрозы обледенения двигателей

Математически, признак принадлежности n -го объекта к классу ОГКс в момент времени t можно представить в виде функции-индикатора y_n^t , принимающей значение 1, если объект относится к классу ОГКс и значение 0 в противном случае. При этом, согласно определению, принадлежность к классу не зависит от момента наблюдения:

$$y_n^t = y_n^\tau \quad \forall t, \tau \in [t_n^b, t_n^d], \quad (2.7)$$

где, как и раньше, t_n^b – время зарождения n -го объекта, а t_n^d – время распада n -го объекта.

Речь идёт об оценке вероятности принадлежности объекта к классу ОГКс $\hat{y}_n^t$, или просто вероятности ОЯ, принимающей значения от 0 до 1 и зависящей от характеристик (предикторов) X_n^t самого объекта в момент времени t :

$$\hat{y}_n^t = f(X_n^t), \quad X_n^t \in R^m, \quad (2.8)$$

где f – дважды непрерывно дифференцируемая функция, m – кол-во разных параметров ВГО объекта (перечисленных в Таблицах 2 и 3).

Задача статистической модели классификации – дать оценку $\hat{y}_n^t$. Функция f для каждого типа модели будет иметь свою форму. Как правило, функция f зависит от свободных параметров, которые необходимо оценить в процессе минимизации функции потерь $L(y, \hat{y})$, оценивающей степень отклонения факта от прогноза.

В данной работе используем наиболее известную функцию потерь – бинарную кросс-энтропию, которая в нашем случае имеет вид:

$$L(y, \hat{y}) = - \sum_{n=1}^N \sum_{t=t_n^b}^{t_n^d} [w_1 y_n^t \log \hat{y}_n^t + w_0 (1 - y_n^t) \log (1 - \hat{y}_n^t)], \quad (2.9)$$

где N – количество наблюдений в обучающей выборке, w_0 – стоимость ошибки первого рода, w_1 – стоимость ошибки второго рода.

В настоящее время одной из наиболее эффективных в задачах со структурированными (табличными) данными моделей считается модель градиентного бустинга (Gradient Boosting Model) [71]. Согласно результатам различных экспериментов, по эффективности в решении задач классификации на структурированных (табличных) данных она сопоставима с полносвязными искусственными нейронными сетями (ИНС) и их более продвинутыми архитектурами (например, TabNet) [86]. При этом, последние требуют значительно больше вычислительных ресурсов [42].

Также, существенный вклад в эффективность ИНС вносит степень сбалансированности исходной выборки. Если количество объектов одного класса существенно превышает количество объектов другого класса (выборка не сбалансирована), это может оказать сильное влияние на качество распознавания. В нашем случае всего 3,34% наблюдений относятся к ОГКс, в связи с чем можно ожидать высокую долю ложных тревог. Для снижения этого эффекта в данной работе выбирается значение стоимости ошибки второго рода $w_1 = \frac{1}{2\alpha}$ – намного большее, чем значение стоимости ошибки первого рода $w_0 = \frac{1}{2(1-\alpha)}$, где α – доля объектов класса ОГКс в обучающей выборке [59].

При этом, градиентный бустинг зарекомендовал себя как метод, эффективный в том числе на несбалансированной выборке за счёт отбора случайного подмножества исходной выборки для обучения каждого дерева в ансамбле, что считается его большим преимуществом [86].

Суть алгоритма градиентного бустинга состоит в последовательном построении ансамбля деревьев решений, каждое из которых разбивает выборку на однородные группы (листья в дереве) в зависимости от значений входных показателей (независимых переменных). Каждой группе затем присваивается какой-то класс. Критерии разбиения на группы подбираются таким образом, чтобы минимизировать функцию потерь (ошибки), которая для каждого дерева (каждой итерации) своя, так как учитывает ошибки предыдущих деревьев в ансамбле. Такой подход позволяет эффективно решить задачу минимизации функции потерь, но возможен эффект переобучения: если процесс вовремя не остановить, модель добьётся запоминания закономерностей в обучающей выборке, но, вероятно, испортит её результаты на независимой выборке. В частности, мы использовали реализацию под названием LightGBM, работающую значительно быстрее других реализаций на больших объёмах данных при сопоставимой точности [92].

Дополнительно, была обучена модель логистической регрессии как альтернатива более сложным моделям – ИНС и градиентному бустингу [58]. Её преимущества – небольшое количество параметров (задача минимизации функции потерь проще, риск переобучения ниже) и высокая интерпретируемость (для каждого предиктора можно оценить значимость).

Конфигурации моделей машинного обучения подбирались методом случайного поиска по сетке гиперпараметров (randomized grid search [27]). Для каждой модели случайным образом отбирались различные комбинации гиперпараметров, после чего проводились эксперименты для каждой комбинации. Основная цель заключалась в достижении наивысшего значения показателя AUC (Area Under the Curve, площадь под ROC-кривой) модели на валидационной выборке (из обучающей выборки дополнительно выбирались и исключались наблюдения за 1 год) из при сохранении разумного времени обучения и избежания эффекта переобучения.

Для градиентного бустинга варьировались такие параметры, как максимальное число листьев в дереве, максимальное число итераций, доля отбираемых наблюдений и предикторов, а также минимальный вес для сплита и минимальное число наблюдений для сплита. После тестирования различных комбинаций были выбраны следующие значения:

- максимальное число листьев в дереве: 10;
- максимальное число итераций: 1000;
- доля отбираемых наблюдений для одного дерева: 70%;
- доля отбираемых предикторов для каждого дерева: 100%;
- минимальный вес для сплита (`min_child_weight`): 0,00001;
- минимальное число наблюдений для сплита: 200.

В качестве оптимальной архитектуры искусственной нейронной сети, реализованной с помощью библиотеки Tensorflow [16], был выбран трёхслойный перцептрон с 64 нейронами в первом слое, 32 нейронами во втором и 1 нейроном в третьем слое. Более сложные архитектуры приводили к переобучению (высокой точностью на обучающей выборке и низкой точности на контрольной выборке). Для остальных гиперпараметров были выбраны следующие значения:

- число наблюдений в одной итерации (размер батча): 32;
- функция активации на промежуточных слоях: ReLU (Rectified Linear Unit);
- функция активации на выходном слое: сигмоида;
- скорость обучения: 0,001;
- dropout rate: 0,1.

Для поиска оптимальных весов в логистической регрессии был выбран оптимизационный алгоритм SAGA [33] благодаря своей устойчивости к шуму в данных и способности работать с большими объемами информации. Основным параметром, подлежащим настройке, было максимальное число итераций, которое определяло продолжительность обучения модели – оно было установлено на уровне 1500 итераций.

Таким образом, подбор гиперпараметров представлял собой итеративный процесс, направленный на достижение баланса между точностью модели и её вычислительной эффективностью.

Оценка вклада динамических показателей в качество классификации проводилась с помощью описанных выше моделей, обученных в двух конфигурациях: динамической (использованы все 122 предиктора, включающих изменения по времени, т.е. динамические) и статической (без динамических предикторов).

2.7 Оценка результатов применения методов машинного обучения для выбора оптимального метода классификации

Дальнейший шаг был необходим для оценки согласованности классов, прогнозируемых моделью классификации, с фактическими классами объектов ОГК. Рассчитывались 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.

Затем, на основе вычисленных значений были рассчитаны относительные показатели качества: доля ложных тревог (FAR - False Alarm Rate) и предупрежденность (POD - Probability of Detection):

$$FAR = \frac{FP}{TN+FP}, \quad (2.10)$$

$$POD = \frac{TP}{TP+FN}. \quad (2.11)$$

Перед расчётом перечисленных показателей оценки вероятности принадлежности к классу ОГКс, то есть коэффициенты $\hat{y}_n^t$, преобразовывались в идентификаторы классов методом отсечения: если значение коэффициента

превышало заданное пороговое значение γ , то объект относился к классу ОГКс (1), иначе – к классу ОГКи (0). Однако пороговых значений в такой постановке, очевидно, можно подобрать бесконечно много, и для каждого из них будет своё соотношение значений показателей предупреждённости наличия явления и предупреждённости отсутствия явления. Для выбора оптимального порога мы использовали J-статистику Юдена, учитывающую сумму этих показателей при заданном пороговом значении [96]:

$$J(\tau) = POD(\tau) - FAR(\tau). \quad (2.12)$$

Принято, 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: предупреждённость (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) рассчитывается показатель надёжности Н.А.Багрова (=критерий качества Хайдке) HSS , который учитывает природную повторяемость явления. Установлено, что прогнозы, для которых $HSS < 0,33$ являются ненадежными [7].

В дополнение к HSS также рассчитывается критический индекс успешности ETS (Equitable Threat Score), который оценивает точность детектирования объектов класса ОГКс с поправкой на случайные попадания. Отрицательные значения этого показателя свидетельствуют о бесполезности модели [5].

Также, в качестве интегрального показателя качества детектирования при разных пороговых значениях (с учётом обратной зависимости POD от FAR) рассчитывается показатель AUC (area under the curve) – площадь под ROC-кривой.

Объективная оценка качества проводилась путем преобразований, а именно - исходная выборка разбивалась на обучающую и контрольную по годам (сезонам).

Следует отметить главное преимущество такого подхода: он исключает временные зависимости между двумя выборками. Наиболее часто использующийся для решения задач машинного обучения альтернативный метод – разбиение выборки случайным образом по объектам или срокам – имеет тенденцию к завышению показателей качества распознавания объектов из контрольной выборки. Модели машинного обучения “запоминают” метеорологические условия развития ОГК из обучающей выборки и используют эту информацию для распознавания объектов из контрольной выборки. Если наблюдения за один и тот же день (но, скажем, разные часы) для той же территории (если объекты ОГК зафиксированы на небольшом расстоянии друг от друга) попадут в обе выборки, то валидация модели на контрольной выборке покажет высокое качество распознавания. Однако такая оценка не будет гарантировать такого же качества распознавания при работе модели в оперативном режиме на регулярно поступающих новых данных.

2.8 Способ детектирования куполов верхней границы облака, пробивающих уровень тропопаузы, как наиболее опасных условий обледенения двигателя

В настоящее время валидация методов, описанных выше, на территории России затруднена в связи с отсутствием репрезентативной базы данных о случаях пробивания тропопаузы и ОГК в целом. Их реализация, тем не менее, была возможна благодаря измерениям с геостационарного спутника Meteosat MSG, в зону обзора которого попадает ЕТР. Методы распознавания ОГК над территорией ЕТР на основе этих данных нами были апробированы ранее [15]. Оценка качества результатов распознавания куполов ОГК может быть получена в ходе анализа отдельных случаев ОГК и в оперативном режиме в рамках экспертного рабочего места, визуализирующего результаты распознавания.

Определение температуры тропопаузы – задача нетривиальная. Известно, что существует несколько определений тропопаузы. Например, согласно определению ВМО (1957 г.) [94], скорректированному в 1986 г., тропопаузой считается уровень, на котором вертикальный градиент температуры принимает значение $0,2^{\circ}\text{C} / 100 \text{ м}$,

при условии, что он не превышает это значение в вышележащем слое толщиной 2 км. Определяемая таким образом температура тропопаузы называется термической.

Другой распространённый и более точный метод определения температуры тропопаузы (называемой в таком случае *динамической тропопаузой*) основывается на понятии потенциального вихря Эртеля, вертикальная составляющая которого рассчитывается по формуле:

$$PV = -g(\zeta + f) \frac{\partial \theta}{\partial p}, \quad (2.13)$$

где g – ускорение свободного падения (м/с^2), θ – потенциальная температура (К), p – давление, $f = 2\Omega \sin(\phi)$ – параметр Кориолиса, $\Omega = 7,92921 \cdot 10^{-5} \text{с}^{-1}$ – угловая скорость вращения Земли, ϕ – широта, ζ – относительный вихрь (с^{-1}).

Потенциальный вихрь Эртеля является инвариантом системы примитивных уравнений, а поверхности его значений (изолинии) являются материальными поверхностями, то есть в адиабатическом процессе состоят из одних и тех же материальных частиц [10]. Исследования показали, что значения PV , выраженные в международной единице измерения $\text{rvu} = 10^{-6} \text{м}^2 \text{Ккг}^{-1} \text{с}^{-1}$ (potential vorticity unit – единица потенциального вихря), в тропосфере и стратосфере существенно различаются. В частности, в тропосфере PV имеет порядок 0,3–0,6 rvu , а в стратосфере – 10 rvu , причём в стратосфере PV растёт с высотой до нескольких десятков rvu . В слое тропопаузы PV меняется от тропосферных до стратосферных значений, что позволяет отличать стратосферный воздух от тропосферного и выделять “субстратосферный” воздух этого слоя.

Результаты работ по сопоставлению термической и динамической тропопаузы [1], [51] показывают, что уровень термической тропопаузы соответствует изоповерхности 4 rvu , а субстратосферный воздух заключён между уровнем 1 rvu и 4 rvu .

Для расчёта PV в составе СМОГК используются прогнозы полей температуры, и скорости ветра на уровнях 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600 гПа по модели COSMO-Ru6,6 с заблаговременностью 6 часов. Затем, с помощью линейной интерполяции вычисляются значения температуры на изэнтропической поверхности 4 рvvi. Значения за промежуточные сроки (внутри 6-часового периода) рассчитываются также с помощью метода линейной интерполяции. Учитывается небольшая изменчивость изоповерхности тропопаузы.

2.9 Методика наукастинга направления смещения выделенных автоматически объектов облачности глубокой конвекции

Решение задачи наукастинга ОГК требует возможности оценивать направление и скорость смещения ОГК в течение следующего часа.

Большинство существующих методов являются производными от классических алгоритмов компьютерного зрения, использующихся для отслеживания перемещения обобщённых объектов. Особенность любого типа облачности и, в частности, ОГК заключается в постоянном изменении формы, размера и температуры ВГО. То есть, с точки зрения наблюдателя, облако постоянно меняется, пусть и не быстрыми темпами. Но с другой стороны, облако перемещается достаточно медленно - в среднем, со скоростью 25 км/ч [20; 48]. Это значит, что, имея спутниковые данные с пространственным разрешением 5 км и частотой обновления 15 мин, мы можем наблюдать смещение облака на 1-2 пикселя каждые 15 минут. Столь небольшая скорость движения позволяет эффективно использовать метод оптического потока, опирающегося на приближения следующего положения пикселя через ряд Тейлора.

В частности, можно допустить, что при небольшом шаге по времени δt пиксель (i, j) смещается в положение $i + \delta i, j + \delta j$. Основное допущение заключается в том, что температура ВГО для этого пикселя меняется незначительно, т.е.

$$T_{ij}^t \approx T_{i+\delta i, j+\delta j}^{t+\delta t}, \quad (2.14)$$

где T_{ij}^t – значение измерения температуры ВГО ОГК в диапазоне электромагнитного спектра со средней длиной волны 6,2 мкм в пикселе с индексом (i, j) . Выбранный диапазон считается оптимальным для оценки смещения облачности верхнего слоя тропосферы, в том числе и ОГК [52].

Если разложить выражение в правой части в ряд Тейлора, получим:

$$T_{ij}^t \approx T_{ij}^t + \frac{\partial T}{\partial i} \delta i + \frac{\partial T}{\partial j} \delta j + \frac{\partial T}{\partial t} \delta t. \quad (2.15)$$

Таким образом, для (2.15) необходимо, чтобы выполнялось равенство

$$\frac{\partial T}{\partial i} \delta i + \frac{\partial T}{\partial j} \delta j + \frac{\partial T}{\partial t} \delta t = 0 \quad (2.16)$$

Если выражение в левой части поделить на приращение по времени δt , получим

$$\frac{\partial T}{\partial i} \frac{\partial i}{\partial t} + \frac{\partial T}{\partial j} \frac{\partial j}{\partial t} + \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (2.17)$$

Обозначим за $u = \frac{\partial i}{\partial t}$ и $v = \frac{\partial j}{\partial t}$ компоненты скорости смещения пикселя и получим основное уравнение оптического потока:

$$\frac{\partial T}{\partial i} u + \frac{\partial T}{\partial j} v + \frac{\partial T}{\partial t} = 0. \quad (2.18)$$

Физический смысл уравнения (2.18) заключается в том, что пиксель смещается со скоростью (u, v) , не меняя своего значения, либо меняя его на пренебрежимо малую величину.

Важно ещё раз отметить недостаток такой модели – она не учитывает возможность изменения площади и формы ВГО. В результате, быстрое расширение ВГО при достижении её высоты уровня тропопаузы (образования “наковальни”) может быть определено как смещение, хотя само облако статично, либо даже смещается в другом направлении.

Более того, такая модель игнорирует восходящие движения, то есть предполагается, что облако движется вдоль горизонтальной плоскости. Некоторые части ВГО могут подниматься выше и охлаждаться, а значит, связанные с ними

пиксели будут менять своё значение. Тем не менее, данный недостаток смягчается тем, что характерная температура ВГО ОГК сильно отличается от более тёплого окружения – либо ВГО более низкой облачности, либо подстилающей поверхности. Значения градиента температуры в пределах ВГО, возникающего в результате восходящих движений (охлаждения), существенно меньше значений градиента вокруг ВГО, возникающего из-за контраста между холодной ВГО ОГК и тёплым окружением. Таким образом, можно считать, что неравенство (2.16) с определённой погрешностью выполняется и в этом случае.

Суть задачи построения оптического потока сводится к решению уравнения (2.18) относительно вектора (u, v) , но это означает, что уравнение имеет две неизвестные переменные, то есть у него нет единственного решения. Поэтому в основе большинства существующих алгоритмов оптического потока лежит дополнительное допущение, что для заданного (u, v) уравнение (2.16) выполняется не только для одной точки (i, j) , но и для её окрестности. В частности, алгоритм Лукаса-Канаде [64] сводится к решению системы линейных уравнений, получающейся в результате подстановки в (2.18) значений производных в разных точках этой окрестности. Однако в таком случае число уравнений оказывается больше числа переменных, а значит, точного решения может вовсе не быть, но возможно найти приближённое с помощью метода наименьших квадратов.

В целом, все известные алгоритмы оптического потока так или иначе решают оптимизационную задачу. Их отличия обусловлены различными допущениями, снижающими вычислительную сложность задачи. В частности, очевидно, что ВГО ОГК не может смещаться из одной части спутникового снимка в другую резкими скачками, то есть пространство поиска можно существенно ограничить, снизив тем самым время работы алгоритма. Более современная реализация алгоритма Лукаса-Канаде [28] дополнительно ускоряет работу за счёт последовательного поиска вектора оптического потока на изображениях с разным разрешением – от меньшего к большему, за что получил название пирамидального алгоритма Лукаса-Канаде. Фактически, алгоритм начинает свою работу с построения нескольких вариантов

изображения (уровней), получающихся за счёт уменьшения разрешения в два раза (относительно предыдущего уровня). На первой итерации осуществляется поиск оптического потока на изображении с наименьшим разрешением, а на следующей – на изображении с разрешением в два раза выше, используя найденный ранее вектор в качестве начального решения. Ещё одно преимущество такого подхода – устойчивость к “шуму”, то есть изменчивости температуры ВГО на снимках с высоким разрешением.

Также, задачу можно существенно упростить, если искать вектор оптического потока не для всех пикселей, относящихся к ВГО ОГК, а лишь для наиболее “характерных”. В теории машинного зрения таковыми считаются углы и грани ввиду их особенной структуры и больших градиентов в окрестности. Соответственно, вектор смещения облака с небольшой погрешностью будет соответствовать вектору смещения наиболее примечательных пикселей. В данной работе отбор таких пикселей выполнялся с помощью метода Ши-Томаси [84] со следующими условиями: расстояние между ними должно быть не меньше 3 пикселей, общее количество таких пикселей не должно превышать 100. В результате, в момент первого наблюдения объекта s получаем набор точек (пикселей) для n -го объекта $\{p_{nk}^s\}_{k=1,...,K}$, где $p_{nk}^s = (i_{nk}^s, j_{nk}^s)$, $K \leq 100$. Предлагаемый в данной работе метод в каждый следующий момент времени оценивает смещение каждого пикселя из этого набора с помощью пирамидального алгоритма Лукаса-Канаде, чтобы получить набор векторов оптического потока для n -го объекта $\{d_{nk}^t: p_{nk}^t = p_{nk}^{t-1} + d_{nk}^t\}_{k=1,...,K}$ при $s + 1 \leq t \leq r$, где r – момент распада (диссипации) облака. За итоговый вектор смещения принимается усреднённая величина

$$\overline{d_n^t} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K d_{nk}^t. \quad (2.19)$$

Несмотря на перечисленные выше преимущества пирамидального алгоритма Лукаса-Канаде, вектор оптического потока d_{nk}^t , построенный для одного и того же

пикселя p_{nk}^t в момент времени t , может сильно отличаться от остальных векторов, либо резко изменить своё направление относительно предыдущего вектора d_{nk}^{t-1} . Подобные ошибки неизбежны ввиду возможной высокой вариации температуры в окрестности рассматриваемого пикселя [52]. Чтобы исключить их влияние на вычисление итогового вектора смещения, для каждого пикселя проверяется ряд условий. Пиксели, не удовлетворяющие каким-либо критериям, исключаются из рассмотрения на текущем и последующих шагах.

Во-первых, угол $\theta_{t-1k,tk}$ между текущим вектором d_{nk}^t и предыдущим d_{nk}^{t-1} должен быть меньше 90 градусов, то есть

$$\cos(\theta_{t-1k,tk}) > 0, \quad (2.20)$$

Во-вторых, на каждом шаге выявляются вектора, направление которых существенно отличается от направления большинства других векторов. Для этого проверяется неравенство

$$|\{d_{nm}^t: \cos(\theta_{tk,tm}) > 0, \forall m \neq k\}_{m=1,...,K}| > K/2. \quad (2.21)$$

Прогноз (на ближайший час или 2) рассчитывается с помощью линейной экстраполяции текущего вектора смещения облака $\overline{d_n^t}$, причём эксперименты [20] показали, что изменение метода экстраполяции не влияет на качество прогноза существенным образом.

Для примера на Рисунках 7.А (14.04.2024 03:00 ВСВ) и 7.Б (14.04.2024 04:00 ВСВ) показаны примеры векторов смещения для МКС и небольших конвективных ячеек над территорией Афганистана. Визуализация подготовлена в интерфейсе системы «СМОГК». Дополнительно на карту нанесены изолинии геопотенциала и вектора ветра на уровне 500 гПа из прогноза модели ICON DWD Global (при заблаговременности в 3 часа в срок 04:00 ВСВ эта информация не была доступна). Визуальный анализ показал, что в данном примере направление построенных рассматриваемым методом векторов близко к модельному направлению ветра на

уровне 500 гПа и совпадает с направлением фактического смещения облачности за 1 час.

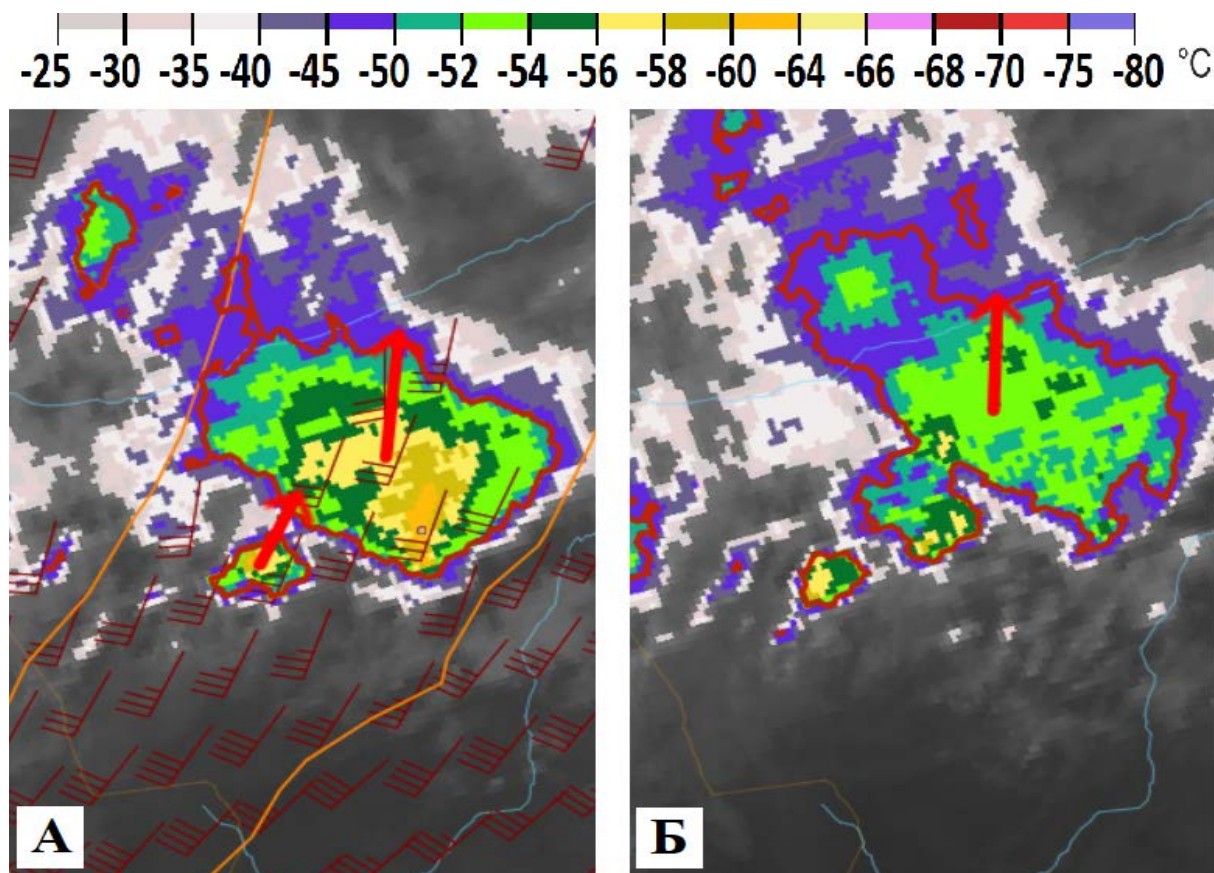


Рисунок 7 - Вектор смещения выделенных контуров облачности (вектор-стрелка красным цветом) глубокой конвекции (т.е. УсОД) над Афганистаном в срок А) 03:00 ВСВ и Б) 04:00 ВСВ 14.04.2024. Комплекс данных измерений яркостной температуры (диапазоны температуры - синие, зеленые, оранжевые оттенки в соответствии со шкалой) в диапазоне излучения ИК 10,8 мкм прибора SEVIRI МИСЗ Meteosat MSG, модельные данные - 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 следующие показатели.

Средний угол между текущим вектором $\overline{d_n^t}$ и предыдущим $\overline{d_n^{t-1}}$:

$$R = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{\overline{d_n^t * d_n^{t-1}}}{\|\overline{d_n^t}\| \|\overline{d_n^{t-1}}\|}. \quad (2.22)$$

Среднее абсолютное отклонение скорости смещения (км/ч) в последовательные моменты времени:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left| \|\overline{d_n^t}\| - \|\overline{d_n^{t-1}}\| \right|. \quad (2.23)$$

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.

2.10 Краткое описание созданной экспертной системы, необходимого инструмента для исследования метеорологических условий образования и мониторинга облачности глубокой конвекции, наглядной оценки качества работы алгоритмов выделения зон высокого риска обледенения двигателей

Описанная выше система мониторинга ОГК (СМОГК) предоставляет пользователю карты с результатами детектирования ОГК и прогноза вектора смещения в соответствии с заданной пользователем конфигурацией, включающей настройки подписей, проекции, масштабов в каждый срок наблюдений МИСЗ и т.д. Пример набора таких для случая МКК 14.07.2020, представленный на Рисунке 8, демонстрирует способность СМОГК выделять ОГК на снимке среди других типов облачности. Для повышения удобства пользователя при необходимости более детального анализа с привлечением полей ЧПП и радарных данных были дополнительно разработаны интерактивный веб-интерфейс и целый комплекс вспомогательных сервисов. Структура СМОГК показана на Рисунке 9 [14].

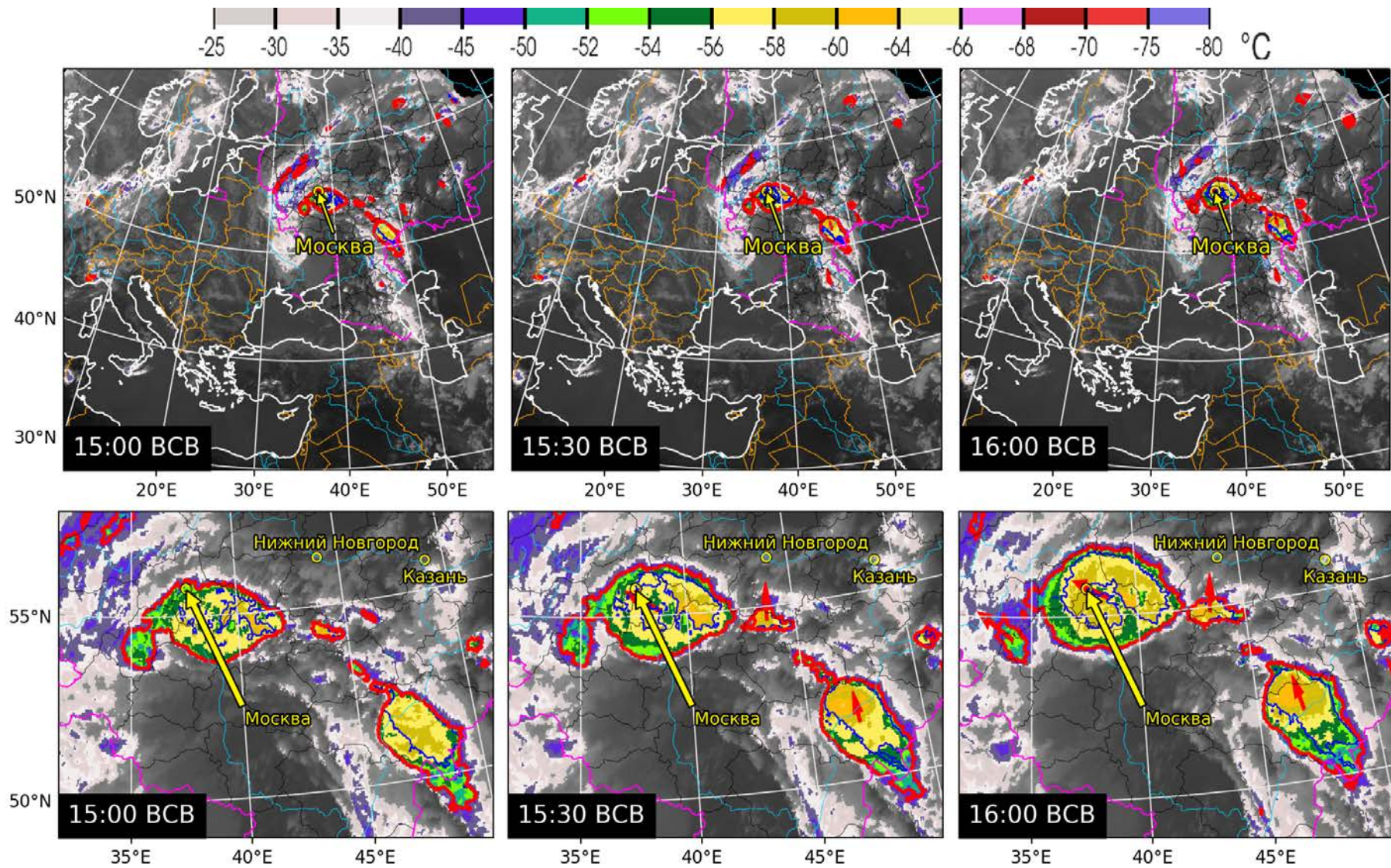


Рисунок 8 – Оперативная карта, построенная системой СМОГК для ЕТР, ниже фрагмент визуализации МКК (контуры ВГО выделены красным цветом) в увеличенном масштабе для трёх сроков съёмки МИСЗ в ИК-диапазоне (10,8 мкм) 14.07.2020

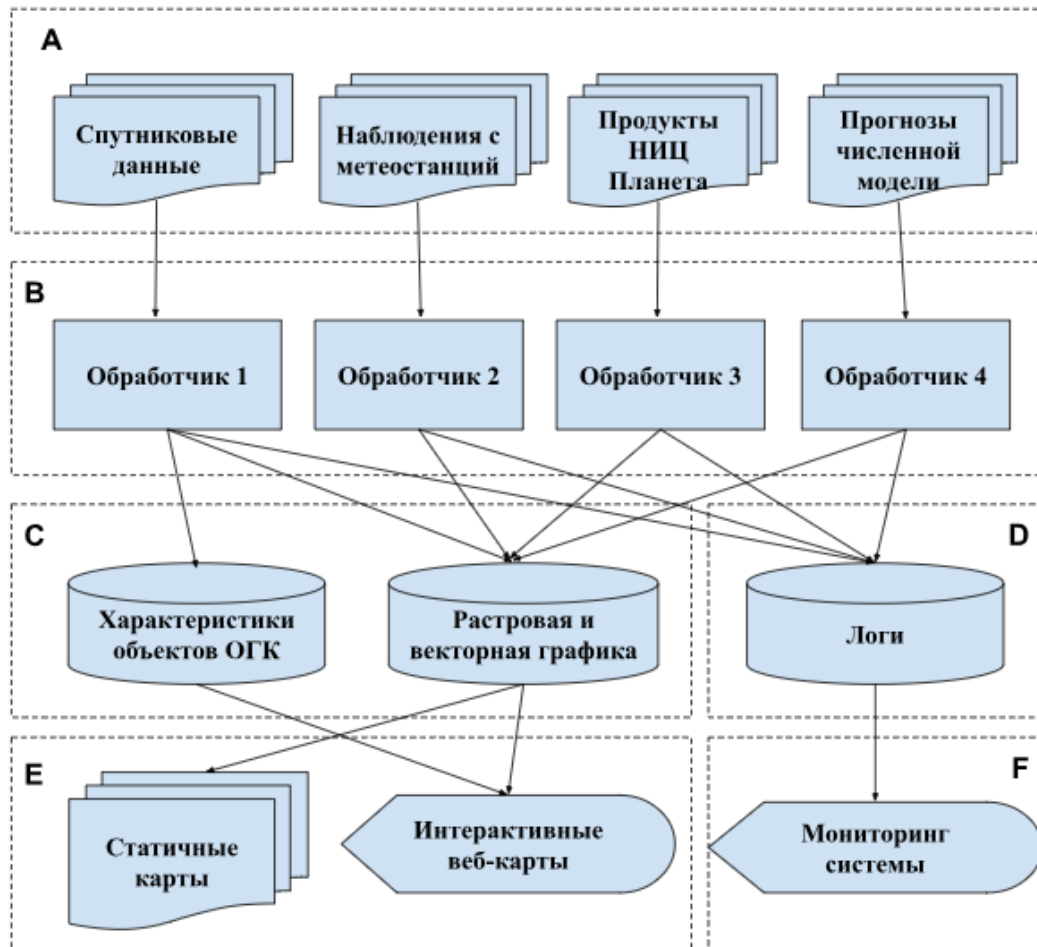


Рисунок 9 – Схема потоков данных. А - Исходные данные, В - обработчики, С – Промежуточная продукция, D – Техническая информация, Е – Конечная продукция/сервисы для потребителя, F – Технические сервисы

Обработка исходных данных (уровень А диаграммы на Рисунке 9) производится специализированной программой – обработчиком (уровень В диаграммы на Рисунке 9). Её задача – подготовить информационный продукт для конечного пользователя.

Каждый источник исходных данных включал свой обработчик, реализующий как логику получения данных источника, так и логику подготовки конечного продукта. Для повышения надёжности предусмотрено использование несколько взаимозаменяемых источников спутниковой информации, которые можно переключать в настройках обработчика (в этом случае на один обработчик может приходиться более одного источника данных).

В результате первичной обработки исходных данных формируется промежуточная продукция (уровень С диаграммы на Рисунке 9) – набор файлов на жёстком диске или таблицы в специальной базе данных. Промежуточная продукция агрегируется и визуализируется на статичных картах и на интерактивных веб-картах в специальном веб-приложении (уровень D диаграммы на Рисунке 9).

Состояние всех обработчиков контролируется и отслеживается с помощью приложения для мониторинга, которое входит в группу Технических сервисов (уровень F диаграммы на Рисунке 9).

По типу выходных данных все обработчики можно разделить на две группы: обработчики растровых данных, подготавливающие данные в виде изображений, и обработчики векторных данных, преобразующие исходные данные (как правило, тоже в векторной форме) в векторную информацию для нанесения на карту. Важно отметить, что выходная продукция обработчика растровых данных может включать дополнительную информацию в виде векторной графики и текстовых файлов.

Источники данных, в свою очередь, включают три группы информации:

- данные с сетевого диска;
- данные из внешнего программного интерфейса (API – Application Programming Interface);
- данные из базы данных Гидрометцентра.

Полный перечень обработчиков представлен в Приложении, Таблице 1.

До 2024 года основным источником спутниковых данных достаточно высокого пространственного разрешения (4-6 км) и малым периодом обновления (5-15 минут) служили измерения радиометра SEVIRI МИСЗ Meteosat-8-11. Но, в связи с санкциями, они стали поступать гораздо реже – с периодичностью не менее 1 часа. Расчеты смещения были сокращены. Дополнительно были реализованы

обработчики данных российских спутников Электро-Л №2-4 и Арктика-М №1,2 с пространственным разрешением 2-4 км с периодичностью съёмки 15 минут [6; 75]. Предварительные эксперименты показали, что реализованная методика распознавания ОГК применима и к измерениям этих спутников. Пример визуализации данных показан на Рисунке 10.

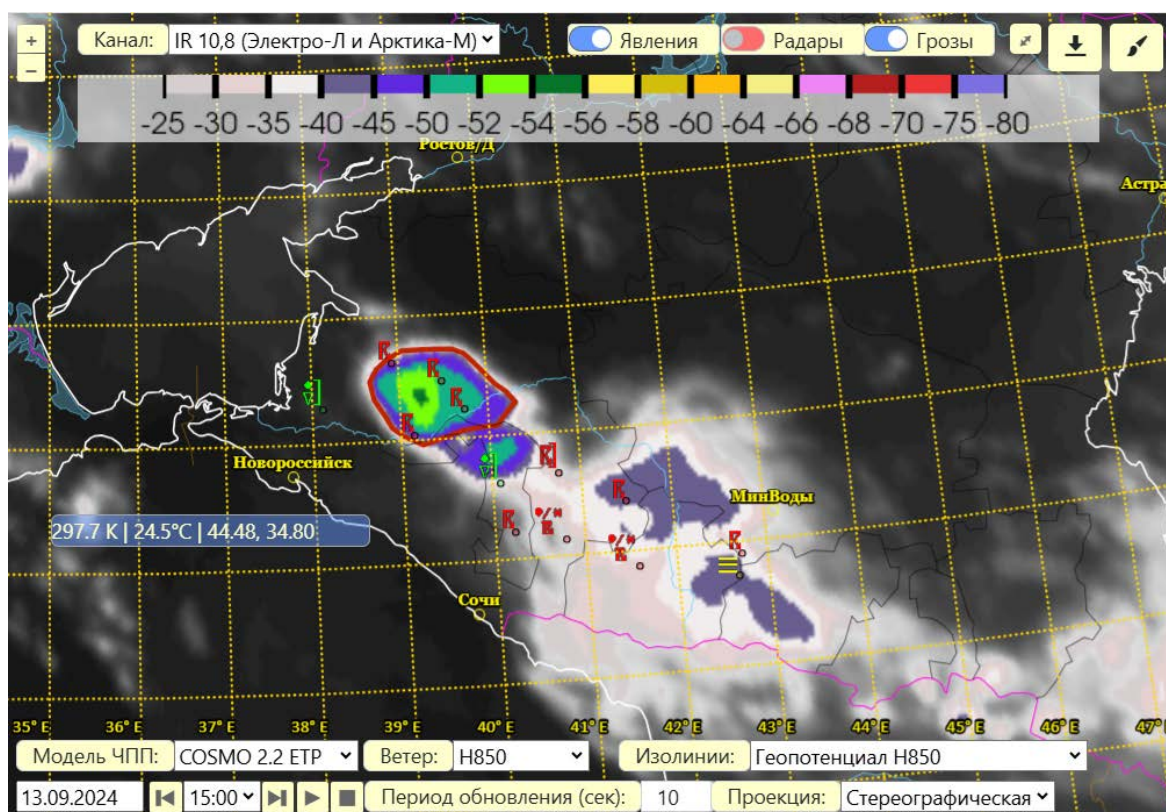


Рисунок 10 – Пример визуализации измерений ИК 10,8 мкм, монтаж спутников Электро-Л №2-3 и Арктика-М №1,2

Автоматическая и интерактивная комплексация спутниковой информации, полученной в результате обработки фрагментов с полями численного прогноза погоды, синоптическими наблюдениями и радарными данными делает доступным мониторинг как крупномасштабных процессов – циклонов и антициклонов, фронтов, так и мезомасштабных облачных образований, включая ОГК, МКС, МКК в оперативном режиме над всей территорией России.

Интерактивный веб-интерфейс СМОГК предоставляет пользователю возможность визуализировать необходимые данные в трех проекциях и

масштабировать фрагменты. Более того, возможно получить детальный отчёт о значениях восстановленных метеорологических величин в определенных пользователем точках карты и в виде таблиц а) и графиков б) их изменения (см. Рисунок 11).

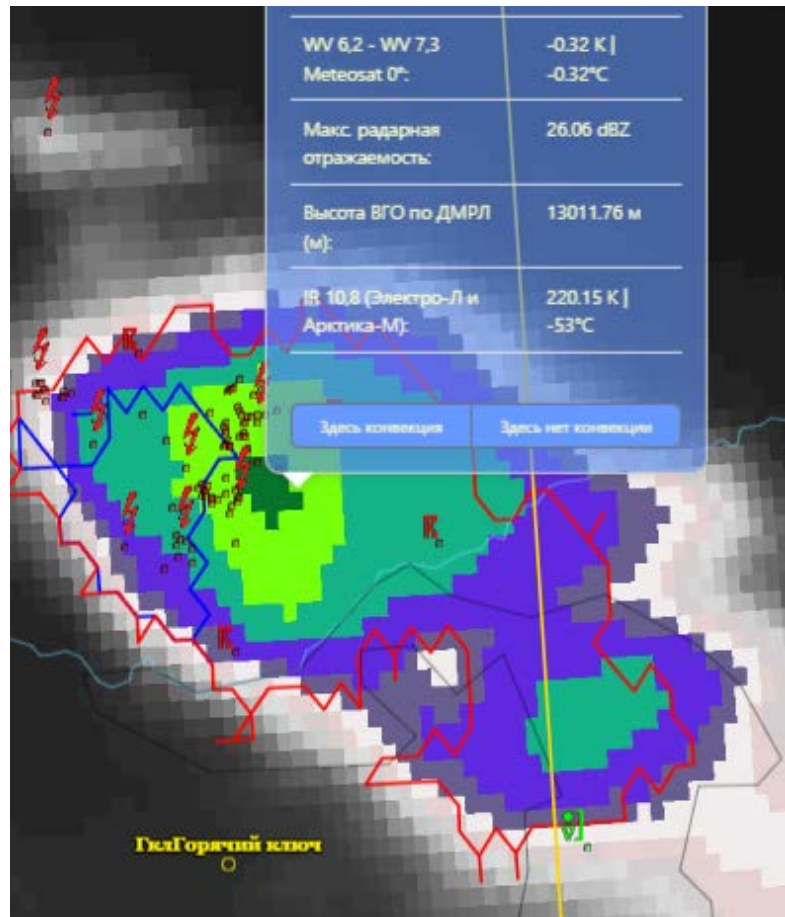


Рисунок 11 – Выделение МКК севернее г. Сочи, пример вывода измеренных и полученных разными способами значений восстановленных спутниковых измерений и метеорологических величин в выбранной (белым треугольником слева внизу меню) точке (пикселе) на карте

Быстродействие такого функционала при сохранении высокого разрешения визуализируемых данных удалось обеспечить за счёт оптимизации структуры их хранения. В частности, все растровые изображения сохраняются на высокопроизводительный файловый сервер Nginx в формате Cloud Optimized GeoTIFF (COG) [66] включая географическую привязку. Структура COG позволяет браузеру пользователя получать с сервера лишь необходимый для построения карты фрагмент изображения в нужном масштабе.

Выводы Главе 2:

1. Разработанная методика автоматического детектирования облачности глубокой конвекции (ОГК) позволяет по данным геостационарных МИСЗ идентифицировать зоны высокого риска обледенения двигателей.
2. Используемые методы машинного обучения позволили усовершенствовать пороговые методы распознавания зон высокого риска обледенения двигателей (ОГК).
3. Применение метода оптического потока с учётом информации о выделенных контурах ВГО ОГК в предыдущие и текущие сроки позволяют оценить направления и скорость смещения в течение следующего часа на основе данных геостационарных МИСЗ. Соответственно, возможно сформулировать рекомендации для наукастинга зон высокого риска обледенения двигателей.
4. Использование данных численного моделирования, расчёт температуры динамической тропопаузы и температуры ВГО ОГК позволило выделить купола (ОТ), области ВГО, пробивающие тропопаузу, для выделения зон наибольших угроз обледенения двигателей.
5. Комплексная интегрированная система разработанных методик позволяет включать дополнительные новые спутниковые наблюдения в систему мониторинга облачности глубокой конвекции. Вторая версия системы СМОГК-2, включающая прогноз смещения с помощью оптического потока, запатентована свидетельством о государственной регистрации программы на ЭВМ (РИД) № 2024687371 от 18.11.2024.
6. Использование web-технологии визуализации спутниковой, метеорологической, радарной информации и информации результатов численного моделирования позволяет экспертам получать качественные и количественные параметры и оценки для исследований и прогнозирования метеорологических условий.

ГЛАВА 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ РАСПОЗНАВАНИЯ УСЛОВИЙ ОБЛЕДЕНЕНИЯ (ОБЛАЧНОСТИ ГЛУБОКОЙ КОНВЕКЦИИ)

3.1 Формирование исходных выборок

Начальный этап исследований выявления и идентификации условий обледенения двигателей (УсОД) на верхних уровнях полетов включал выбор наиболее информативных измерений радиационной температуры прибором SEVIRI спутника Meteosat-11 в трёх интервалах инфракрасного диапазона электромагнитного спектра: со средней длиной волны 10,8 мкм, 6,2 мкм и 7,3 мкм. Исходная выборка была ограничена по территории широтами от 30 до 72 град. с.ш. и долготами от 20 до 65 град. в.д. Рассматриваемый период - с 2013 по 2020 года, включая 5 тёплых месяцев каждого года (май - сентябрь), при дискретности по времени 15 минут (96 сроков в день), всего анализировалось 86 839 сроков. Далее, идентификацию условий обледенения двигателей на верхней границе облачности в соответствии с обзором в первой главе будем отождествлять с облачностью глубокой конвекции как основного объекта высокого риска обледенения при полетах на ВГ в кристаллической части скоплений кучево-дождевой облачности.

На первом этапе в результате 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, была получена база данных с детальной информацией о состоянии каждого объекта на каждый срок наблюдения.

Следует отметить, что в выборке по техническим причинам отсутствовал ряд отдельных сроков наблюдений, и история развития некоторых объектов ОГК была неполной (такие объекты на самом деле существовали дольше и могли в отсутствующий в выборке срок достигать большего размера). Такие объекты с недостающими сроками не принимались к рассмотрению. Чтобы исключить

искажения данных, выборка была ограничена, не учитывались объекты с неполной историей (исключено 146 571), что соответствовало 268 497 наблюдениям. В результате общее количество наблюдений объектов ОГК составило 13 005 226, количество уникальных объектов составило 10 683 356.

Далее, все объекты выборки были разделены на два класса: (ОГКс - с наблюдениями ОЯ) и неподтверждённые (ОГКи – наблюдений не зафиксировано – либо по причинам отсутствия измерений, либо отсутствия фото явления, либо отсутствия самих станций или очевидцев наблюдений). Для этого 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).

3.2 Анализ распределения характерных масштабов размеров и продолжительности жизни облачности глубокой конвекции

Анализ состава выборки для оценки жизненного цикла распознанных пороговым методом объектов ОГК, основан на расчетах следующих характеристик для всех объектов и отдельно для объектов класса ОГКс:

- **продолжительность жизни объекта (часы)** – длительность наблюдений за объектом;
- **максимальный размер (кв. км)** – максимальная площадь ВГО за всё время наблюдений.

Результаты расчётов представлены в Таблице 12 и более детально в Приложении, Таблица 4. Анализ повторяемости продолжительности жизни указал на преобладание в выборке короткоживущих, объектов – то есть тех, которые наблюдались менее 1 часа (см. Рисунок 12). При этом, такие объекты характеризовались небольшой площадью: чаще всего – до 25 кв. км, хотя было несколько случаев выявления объектов площадью до 100 000 кв. км (см. Таблицу 12).

Таблица 12 – Распределение числа объектов класса ОГКс (первое число в ячейке) и всех объектов (второе число в ячейке) в зависимости от продолжительности жизни (по столбцам) и площади ВГО (по строкам)

Площадь ВГО (км)	Продолжительность (ч)				
	< 1	1-6	6-12	12-24	24+
0-25	4 158 / 3 092 084	3 / 634	0/0	0/0	0/0
25-80	3 724 / 2 319 257	5 / 1 732	0/0	0/0	0/0
80-310	7 409 / 2 915 293	69 / 5 526	0/1	0/0	0/0
310-700	5 293 / 1 196 588	417 / 16 374	0 / 12	0/0	0/0
700-100 000	9 633 / 1 012 924	14 114 / 112 215	3 481 / 8 114	752 / 1 383	55 / 97
100 000 -200 000	7 / 77	48 / 130	231 / 352	246 / 305	38 / 48
> 200 000	0 / 6	5 / 21	31 / 53	72 / 100	23 / 30

В целом, среди всех объектов с продолжительностью жизни до 1 часа доля объектов класса ОГКс при наличии факта ОЯ была очень низкой – всего 0,29% из всей выборки. Размер (~менее 5-10 км диаметром) и продолжительность жизни менее 1 ч свидетельствуют о повторяемости «отдельных» конвективных ячеек, наиболее часто встречающихся в наших рассматриваемых широтах. Вполне возможно, что большая часть выделенных в первые 15-30 минут ОГК, в дальнейшем размывалась и не достигала стадии зрелого ОГК с большим временем жизни.

Большая часть ОГКс - 147 127 объектов наблюдались более 1 часа, 175 из них – более суток. Можно утверждать, что более суток существовали мощные мезомасштабные конвективные системы (МКС) и мезомасштабные конвективные комплексы (МКК), которые всегда сопровождаются опасными явлениями. Согласно Таблице 4 в Приложении, 66,29% таких объектов относились к ОГКс при наличии факта ОЯ. В целом, данные Таблицы 4 в Приложении свидетельствуют о наличии прямой зависимости между продолжительностью жизни и максимальным размером ОГК. Более того, такая же зависимость видна между

продолжительностью жизни и долей объектов класса ОГКс, то есть чем дольше объект существует, тем выше вероятность того, что объект действительно является мощной ОГК и в нем отмечается большее число опасных конвективных явлений.

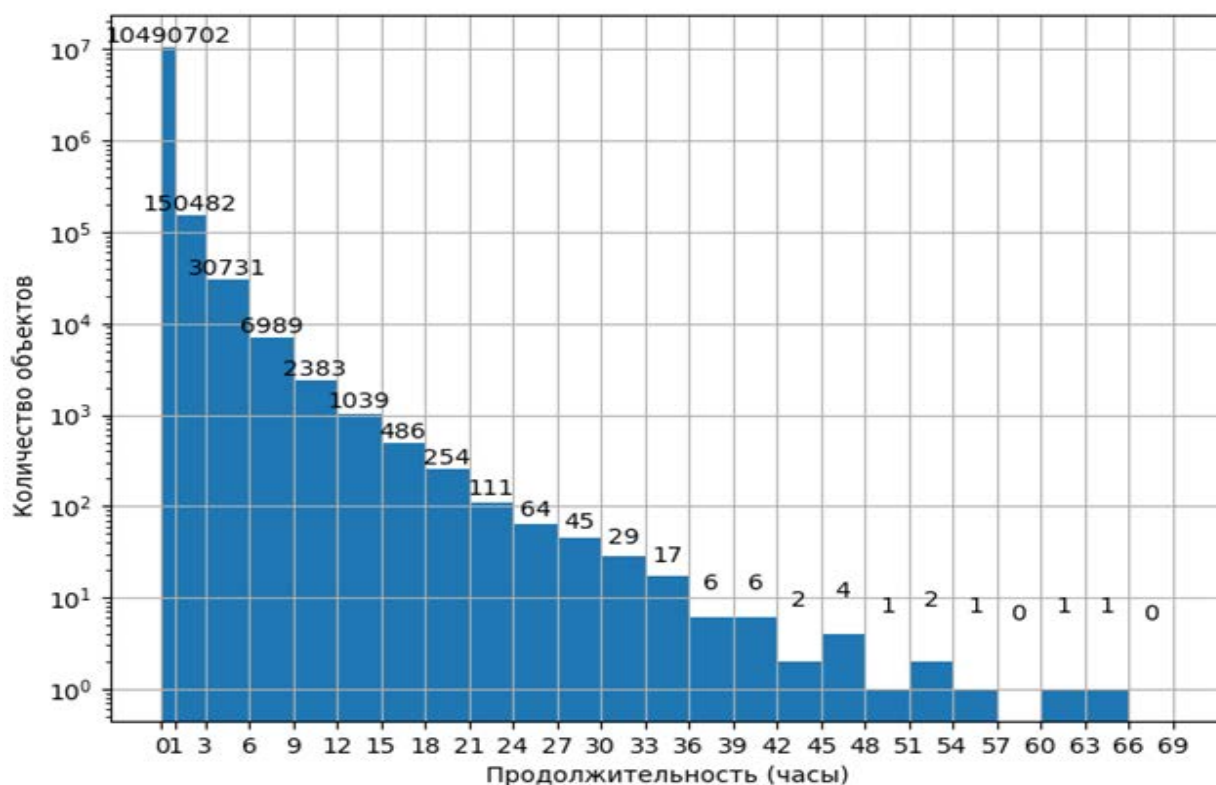


Рисунок 12 – Повторяемость числа выявленных ячеек ОГК в зависимости от продолжительности жизни (подтверждённых объектов ОГК – класса ОГКс)

Выявлено, что объекты ОГК продолжительностью жизни более 6 часов, как правило, достигали размеров более 700 кв. км. Согласно исследованиям, в работе Maddox [65], такие характеристики ВГО характерны для МКК. Необходимо отметить, что полученные нами повторяемости характерны для умеренных широт ЕТР и сопредельных территорий (а не тропических широт, где таких объектов значительно больше).

Динамику изменения размеров объекта ОГК на протяжении его жизненного цикла (от инициации до распада) хорошо видно на Рисунке 13, по информации об изменении площади контуров ВГО в диапазонах температуры ниже заданных

значений характерных изотерм. Пример распределения площади контуров разных диапазонов температуры мощного МКК, наблюдавшегося более 10 часов с 15:30 10.06.2019 по 04:30 11.06.2019 над Восточной Европой, приведен ниже (Рисунке 13).

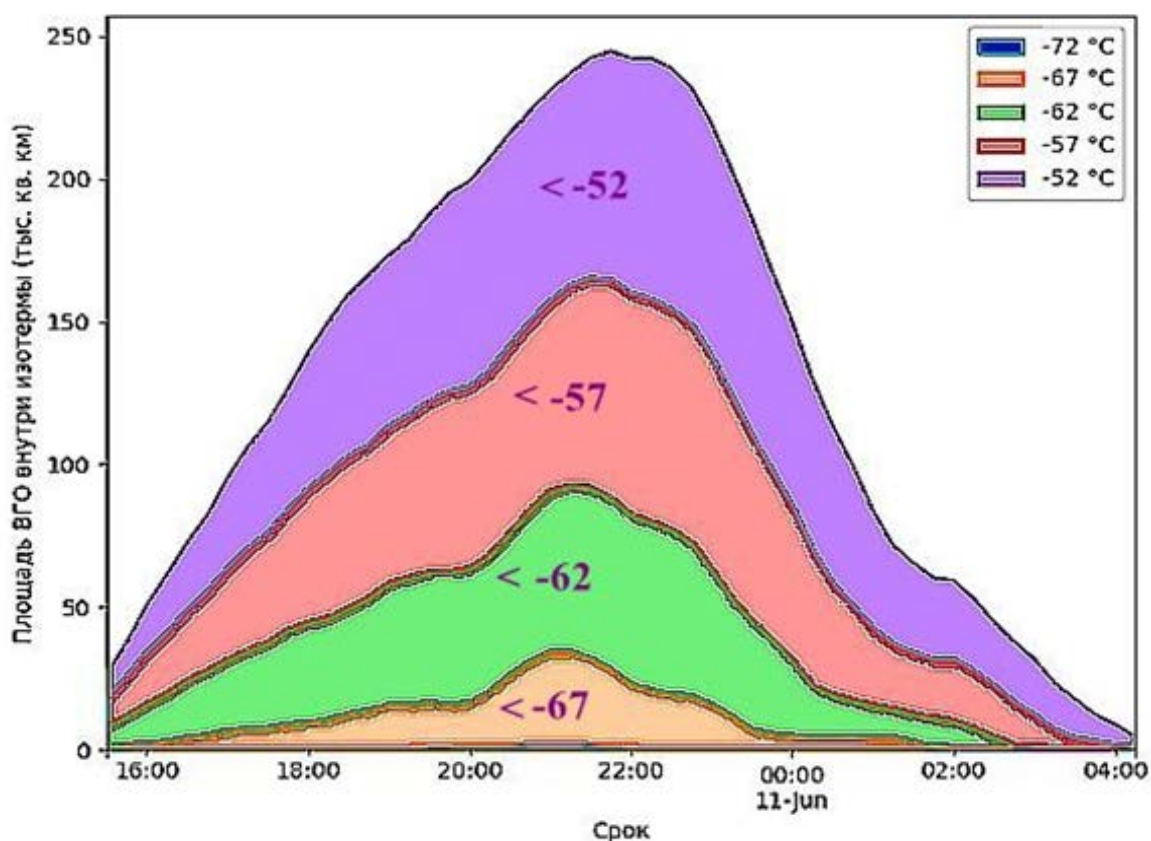


Рисунок 13 – Динамика изменения площади внутри контуров 5 диапазонов температур ВГО МКК, наблюдавшегося с 15:30 10.06.2019 по 04:30 11.06.2019 над Восточной Европой

Ещё один важный вывод можно сделать на основе представленных данных - подтверждается малая природная повторяемость ОГКс, и, соответственно, количество объектов во всей полученной автоматически выборке было очень мало – всего 49 814 (0,47%); при 424 831 сроках наблюдений объектов, таким образом, возможность автоматического детектирования ОГК по спутниковым данным существенно повышает возможности фиксирования УсОД (10 683 356 случаев объектов ОГК при полетах на верхних уровнях). К сожалению, такое количество

ОГК, выделенное пороговым способом естественно приводит к завышенным значениям ложных тревог при прогнозировании. Соответственно, можно предположить, что в большинстве случаев пороговый метод выделяет на спутниковых снимках облачность, не всегда достигающую стадии глубокой конвекции (высотой менее 7 км), либо короткоживущую, быстро разрушающуюся ОГК. Поэтому, чтобы ограничить большое число ложных распознаваний, на следующем шаге исследования потребовалось применение методов машинного обучения.

3.3 Результаты расчётов показателей качества детектирования наиболее вероятных условий обледенения на верхней границе облачности глубокой конвекции

Выборка была разбита на две части: наблюдения за период с 2013 по 2019 года использованы для обучения (обучающая выборка), а наблюдения за 2020 год – для тестирования (контрольная выборка или независимая). Затем, из обучающей выборки было исключено 70% объектов класса ОГКи (отобранных случайным образом), удовлетворяющих следующим критериям: 1. продолжительность жизни менее 1 часа; 2. максимальная площадь менее 100 000 кв. км. Данные критерии были определены на основе Приложения, Таблицы 4., поскольку 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. Таким образом, количество объектов, исключённых из выборки, составило 6 263 686, что соответствовало 6 511 402 наблюдениям. В результате 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%. Более подробная информация представлена в Таблице 13.

Таблица 13 – Распределение числа случаев уникальных объектов ОГК и наблюдений за ними в выборках 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	4 381 365	1 843 962
Доля наблюдений за объектами класса ОГКс	8,5%	2,83%

В Таблице 14 представлены оценки качества распознавания объектов из контрольной выборки для всех моделей, предварительно обученных на всей обучающей выборке. Модели с динамическими предикторами показали лучшие результаты по сравнению с 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 14 – Результаты валидации моделей, обученных на полной обучающей выборке: значения показателей POD (предупрежденность), FAR (доля ложных тревог), HSS (критерий Багрова-Хайдке), ROC AUC (площадь под ROC-кривой), ETS (критический индекс успешности) на контрольной выборке

Модель	POD	FAR	HSS	ROC AUC	ETS
ИНС с динамическими предикторами	91,18	16,89	0,34	0,92	0,36
ГБ с динамическими предикторами	91,28	17,11	0,33	0,92	0,35
ЛР с динамическими предикторами	91,31	18,45	0,31	0,91	0,33
ГБ со статическими предикторами	91,57	21,17	0,31	0,89	0,33
ИНС со статическими предикторами	91,55	22,22	0,31	0,89	0,30
ЛР со статическими предикторами	91,56	23,19	0,29	0,87	0,28

Соответственно рассчитаны такие те же показатели и для статистических моделей, предварительно обученных на усечённой выборке (Таблица 15). Результаты свидетельствуют о более высокой надёжности по сравнению с моделями, обученными на полной обучающей выборке. Наивысшие значения показателей продемонстрировала ИНС с динамическими предикторами.

Таблица 15 – Результаты валидации на контрольной выборке моделей, обученных на усечённой обучающей выборке: значения показателей POD (предупреждённость), FAR (доля ложных тревог), HSS (критерий Багрова-Хайдке), ROC AUC (площадь под ROC-кривой), ETS (равноправная оценка угроз)

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

Несмотря на высокие значения POD (91,17%), доля ложных тревог (FAR) прогнозов для класса ОГКс (12,72%) является достаточно высокой. Это свидетельствует о склонности обученных моделей к ложному отнесению объектов класса ОГКи к классу ОГКс. Данный результат, в первую очередь, объясняется низкой повторяемостью объектов класса ОГКс. Во-вторых, существенное влияние как на процесс обучения, так и на процесс валидации может оказывать неполнота данных: а именно модель может оценивать вероятность принадлежности к классу ОГКс как высокую при наличии характерных условий развития опасной ОГК, но при отсутствии наблюдений ОЯ вблизи объекта в ближайшие сроки этот результат считается ошибочным. Подробная таблица сопряжённости факта наличия опасных явлений с диагнозом модели ИНС с динамическими предикторами, обученной на

усечённой обучающей выборке (лучшей модели), для контрольной выборки представлена в Таблице 16.

Таблица 16 – Таблица сопряжённости факта наличия опасных явлений с диагнозом модели ИНС с динамическими предикторами, обученной на усечённой обучающей выборке, для контрольной выборки

		База данных ОЯ		
		Нет ОЯ	Есть ОЯ	Итого
Результат автоматического распознавания	Диагноз			
	Нет объекта ОГК	1 563 863	4 608	1 568 471
	Есть объект ОГК	227 914	47 577	275 491
Итого		1 791 777	52 185	1 843 962

При этом, значение ложных тревог FAR (12,72%) оказалось значительно ниже, чем для аналогичных алгоритмов (порядка 50-70%), полученных другими исследователями.

На Рисунке 14 показаны рассчитанные на обучающей (зелёным) 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.

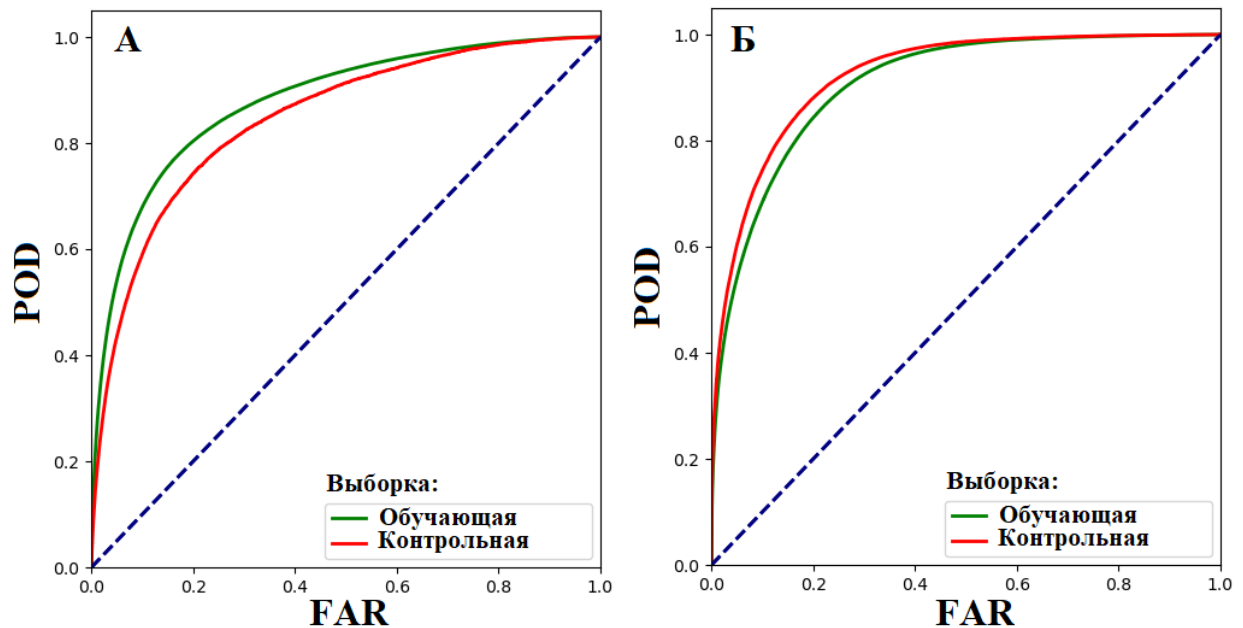


Рисунок 14– Рассчитанные на обучающей (зелёным) и контрольной (красным) выборках ROC-кривые для А) ЛР со статическими предикторами, обученной на полной выборке (худшей модели) и Б) ИНС с динамическими предикторами, обученной на усечённой выборке (лучшей модели)

3.4 Применение созданных методик и алгоритмов для детального анализа случая условий обледенения в кристаллической части облачности глубокой конвекции 31.08.22

Результаты работы описанного алгоритма показаны на примере случая мощного мезомасштабного конвективного комплекса (МКК), развивавшегося над Чёрным морем, вблизи Стамбула, с 05:00 до 11:20 ВСУ 31 августа 2022 года. На Рисунке 15 изображена ВГО МКК в 07:00 ВСУ по данным спутника Meteosat MSG в канале ИК 10,8, контуры МКК выделены красным цветом, контуры области пробивания тропопаузы – синим. В 07:00 ВСУ температура наиболее холодной области ВГО опустилась ниже -67°C – в этой области зафиксировано пробивание тропопаузы (ОТ выделено синим цветом), сама ВГО имеет характерную V-образную форму, “хвосты” которой вытянуты вдоль направления движения МКК (направление движения изображено красной стрелкой), что свидетельствует о сносе кристаллической облачности в этом направлении.

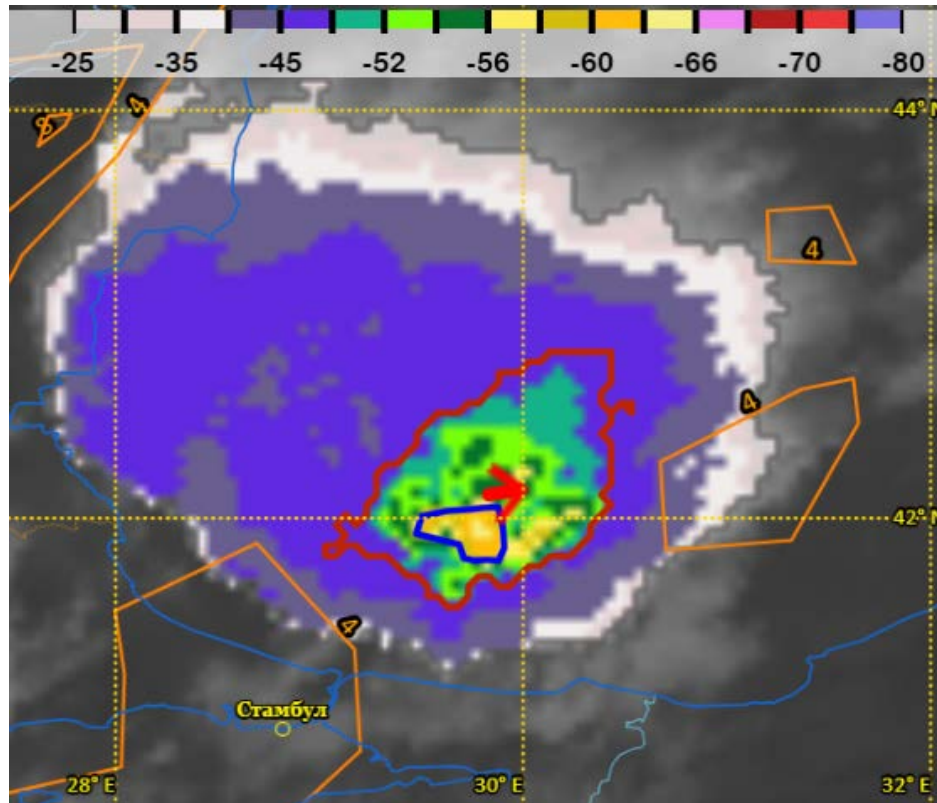


Рисунок 15 –Контурь ОТ, ОГК, радиационной температуры (°C) в диапазоне ИК 10,8 Meteosat MSG SEVIRI и изолинии потенциального вихря (PV, оранжевым цветом) на уровне 250 гПа, 07:00 ВСВ 31.08.2022

Рисунок 16 аналогичен Рисунку 15 с той лишь разницей, что на нём вместо измерений температуры в диапазоне ИК 10,8 изображены измерения температуры в диапазоне ИК 6,2, соответствующем полосе поглощения водяного пара. Очень низкие температуры в этом диапазоне наблюдаются внутри области пробивания тропопаузы – они свидетельствуют о выбросе переохлажденных капель и кристаллов мощными восходящими движениями в стратосферу.

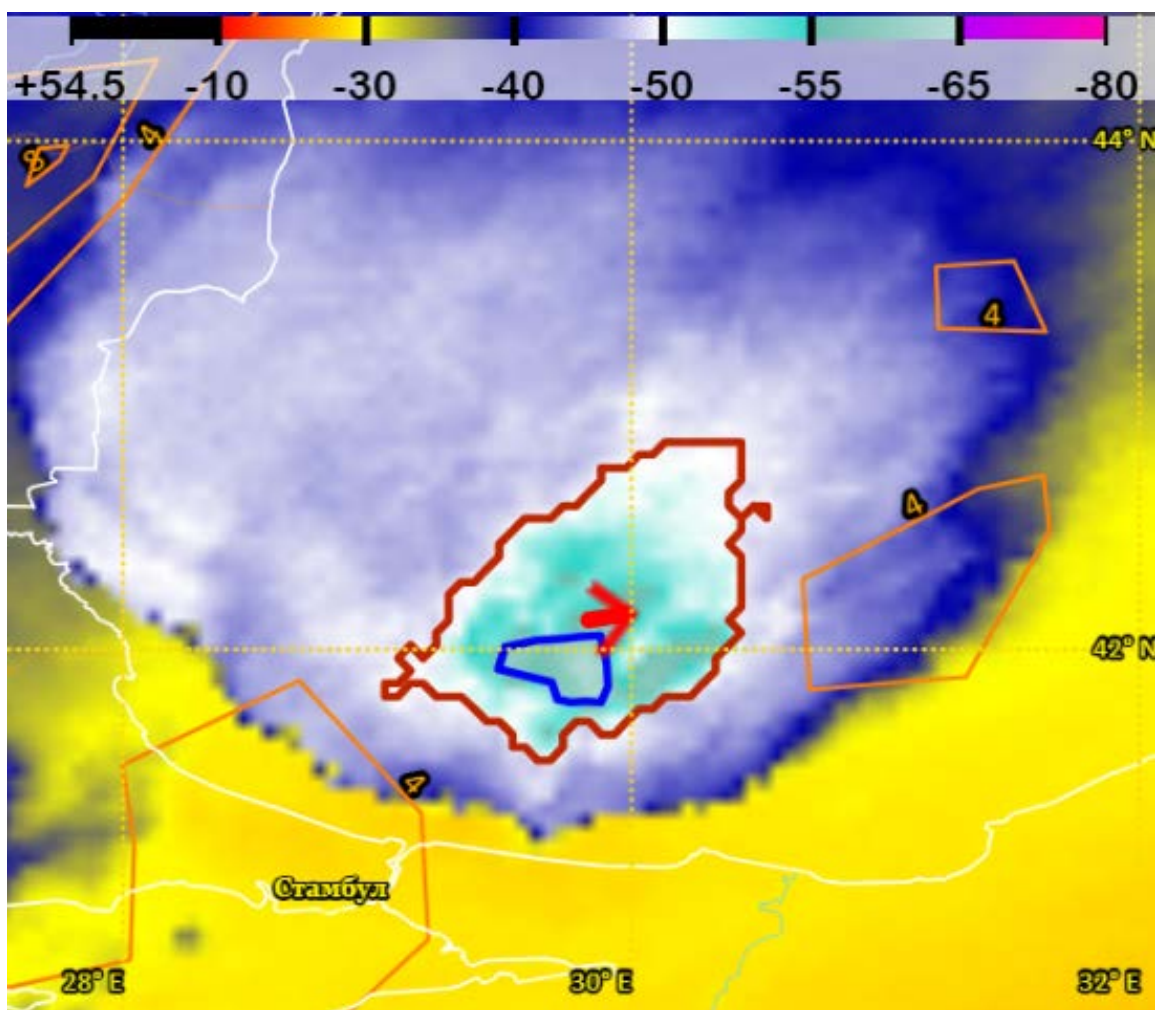


Рисунок 16 – Радиационная температура (°C, в соответствии со шкалой) диапазон измерений ИК 6,2 мм Meteosat MSG SEVIRI и изолинии потенциального вихря (PV, оранжевым цветом) на уровне 250 гПа, 07:00 ВСВ 31.08.2022

Восстановленная по измерениям радиационной температуры со спутника Meteosat MSG в диапазоне ИК 10,8 [93] максимальная интенсивность осадков (Рисунок 17) достигала 50 мм/час в зоне максимального развития облака (при пробивании тропопаузы).

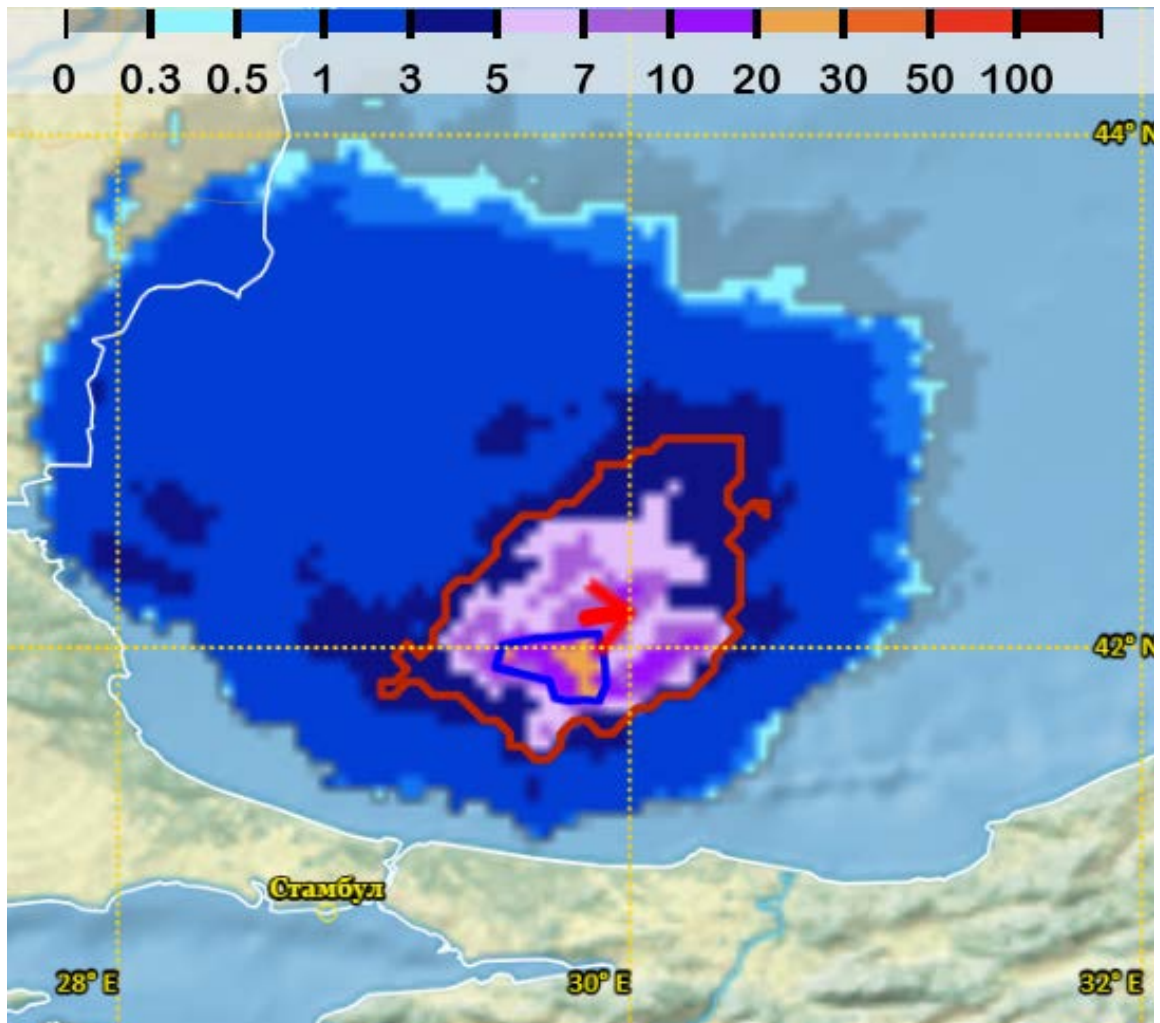


Рисунок 17 – Максимальная интенсивность осадков (мм/ч), восстановленная по измерениям радиационной температуры спутника Meteosat MSG в канале ИК 10,8, 07:00 ВСВ 31.08.2022

Реализованная система мониторинга ОГК позволила проследить за развитием МКК вблизи Стамбула от момента возникновения (инициации) в 05:00 ВСВ до распада в 11:20 ВСВ. На Рисунке 18 (синим цветом, по левой оси ординат) изображён график изменения минимальной температуры ВГО (самой «холодной» точки), показывающий, что в 07:10 ВСВ температура наиболее холодной области ВГО опустилась ниже -68°C . В этот же момент значение разности ИК 6,2 – ИК 10,8 достигло 3,12 К, что свидетельствует о пробивании тропопаузы – эта область выделена на Рисунках 12-13 синим контуром.

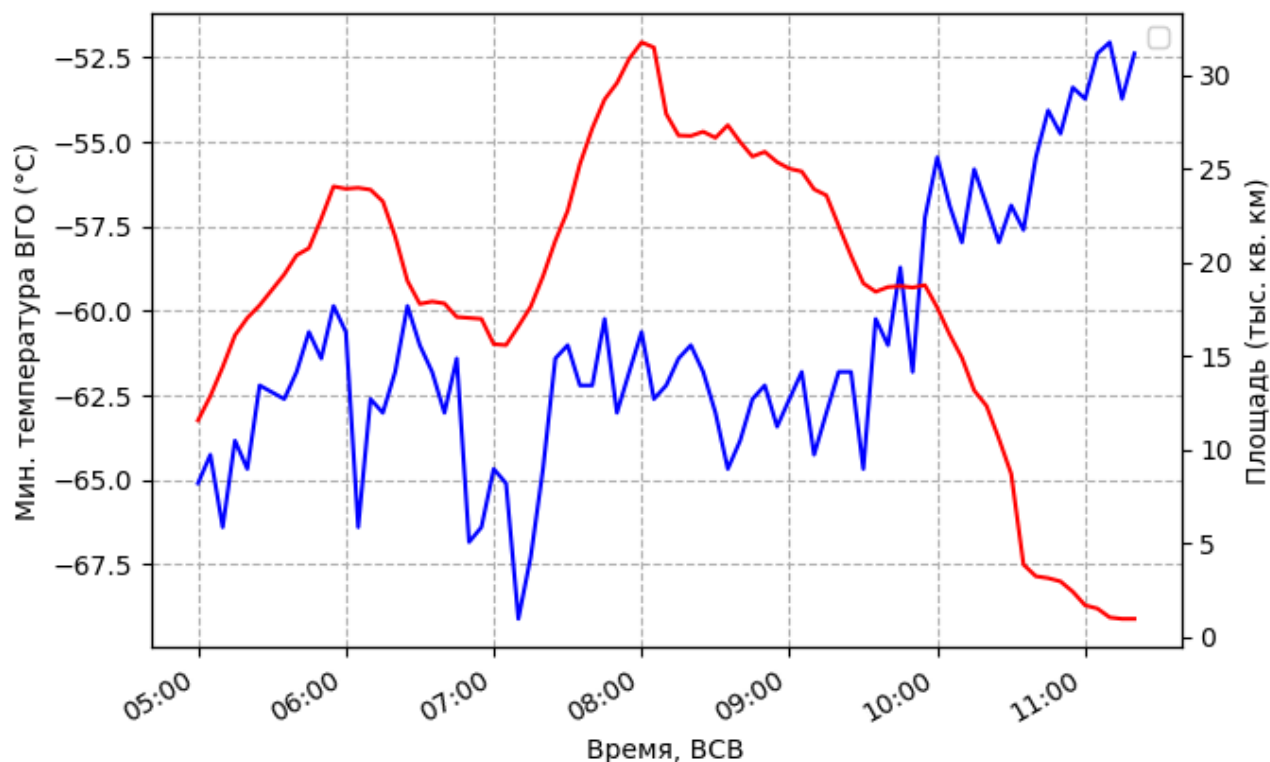


Рисунок 18 – Динамика изменения минимальной температуры ВГО МКК (°C, левая ось ординат, синим цветом) и площади ВГО МКК (тыс. кв. км, правая ось ординат, красным цветом) вблизи Стамбула, 31.08.2022

График изменения площади ВГО МКК, показанный на Рисунке 18, красным цветом демонстрирует быстрое расширение ВГО с 16 тыс. кв. км в 07:05 ВСВ до 32 тыс. кв. км в 08:00 ВСВ. Затем, площадь ВГО начала быстро уменьшаться вплоть до момента полного распада в 10:25 ВСВ. Важно отметить, что между изменением температуры ВГО и изменением её площади наблюдалась отрицательная корреляция, то есть во время интенсивного роста площади температура ВГО падала и наоборот.

На Рисунке 19 показана динамика изменения максимальной интенсивности осадков (мм/час), восстановленной по измерениям радиационной температуры в диапазоне ИК 10,8 [93] и диаметра ОГК. Резкое падение минимальной температуры ВГО около в 07:05 ВСВ сопровождалось ростом интенсивности осадков, затем значения параметров вернулись к средним значениям – около 20 мм/час. С 09:30 до 10:25 интенсивность осадков быстро снижалась по мере распада МКК.

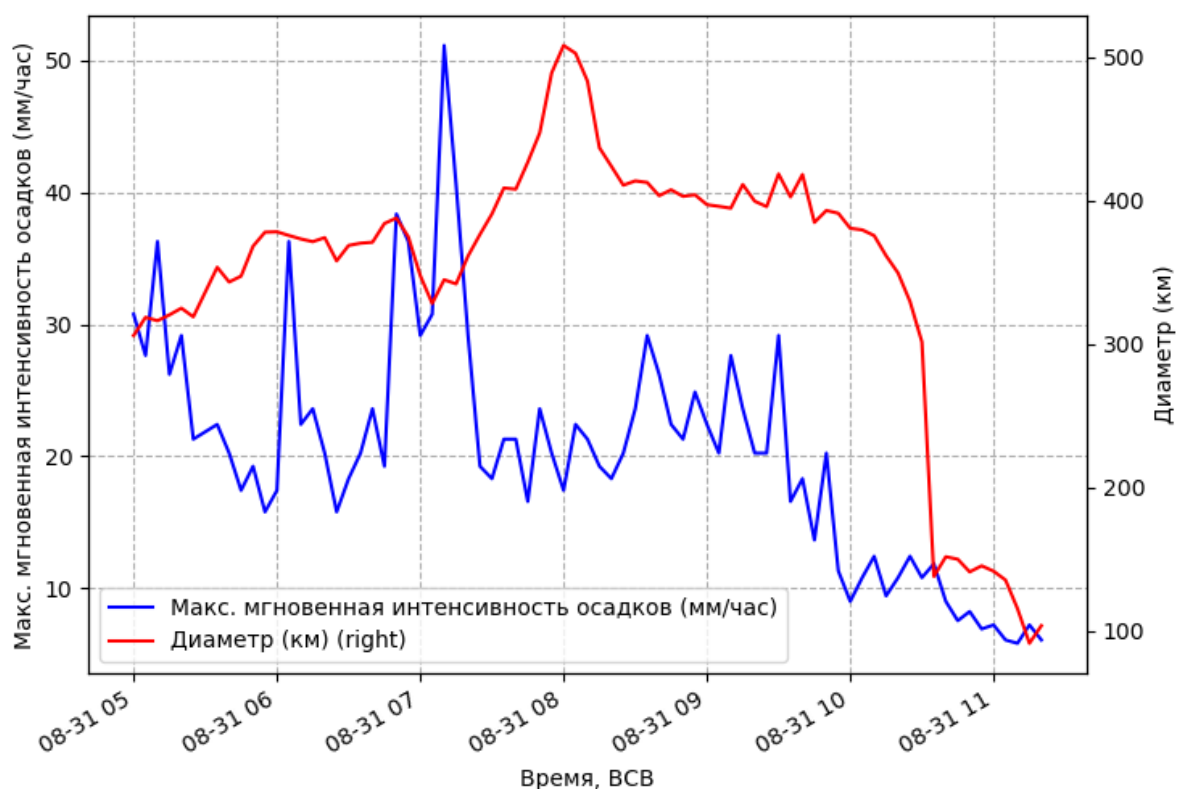


Рисунок 19 – Динамика изменения минимальной температуры ВГО МКК ($^{\circ}\text{C}$, левая ось ординат, синим цветом) и площади ВГО МКК (тыс. кв. км, правая ось ординат, красным цветом) вблизи Стамбула, 31.08.2022

3.5 Применение созданных методик и алгоритмов для детального анализа случая условий обледенения в кристаллической части облачности глубокой конвекции на примере случая 07.07.22

Также, был исследован случай мощной внутримассовой ОГК, наблюдавшейся над Москвой и Московской областью с 10:20 до 22:50 ВСВ 7 июля 2022 года. Для анализа использовались данные прибора SEVIRI спутника Meteosat MSG с периодом обновления 5 минут (режим быстрого сканирования, rapid scan). За рассматриваемый период на данной территории наблюдались опасные явления: ливни (32 случая в синоптических сводках КН-01, 18 случаев в базе данных ОЯ ESWD), грозы (64 случая в синоптических сводках КН-01, 2 случая в базе данных ОЯ ESWD), град (15 случаев в базе данных ОЯ ESWD).

Для проверки корректности результатов детектирования ОГК были дополнительно привлечены десятиминутные данные о максимальной из 11 уровней измерений отражаемости сети радаров ДМРЛ-С с разрешением 1 км. На их основе была рассчитана интенсивность осадков (мм/ч) [3] и построена карта (Рисунок 20), на которой видны очаги очень высокой интенсивности осадков до 100 мм/ч.

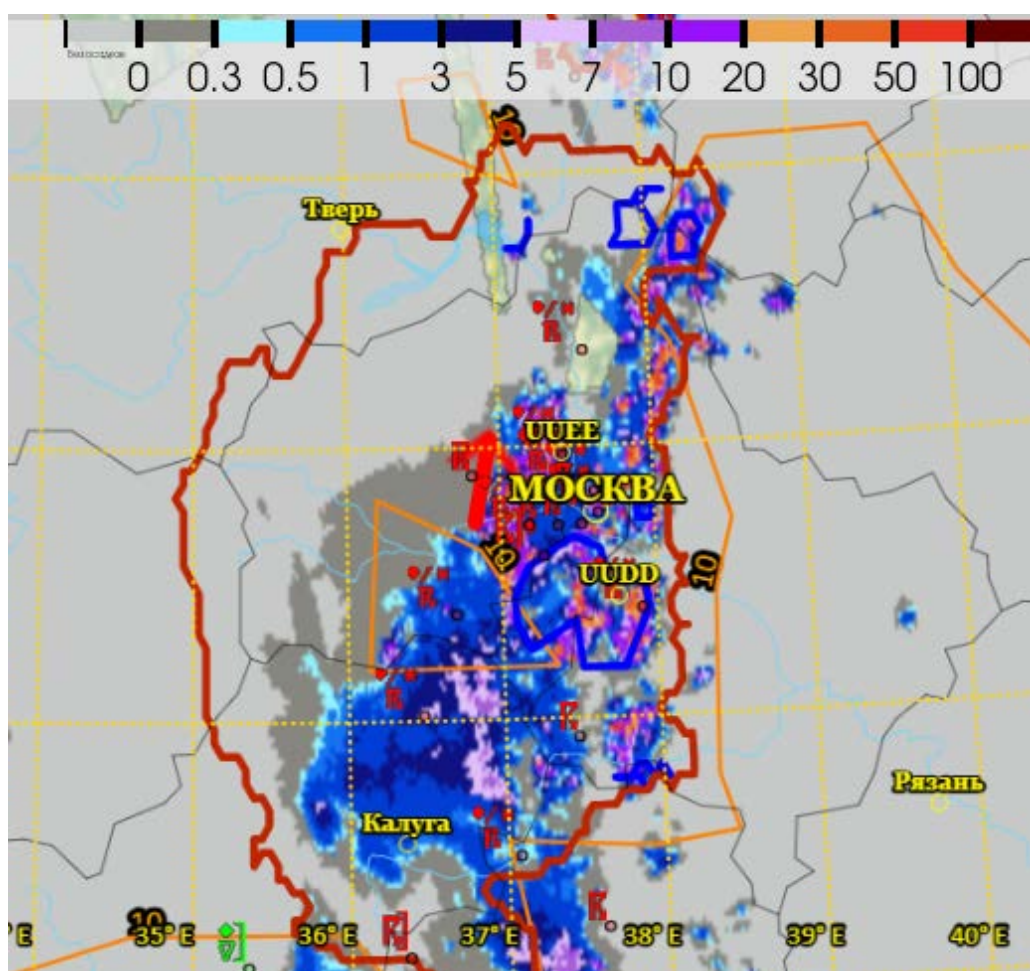


Рисунок 20 – Максимальная интенсивность осадков (мм/ч), восстановленная по измерениям радиолокационной отражаемости доплеровских радаров ДМРЛ-С и изолинии потенциального вихря (PV, оранжевым цветом) на уровне 250 гПа, 15:00 ВСВ 07.07.2022

Восстановленные по измерениям радиационной температуры со спутника Meteosat MSG в диапазоне ИК 10,8 [93] зоны высокой интенсивности осадков за

этот срок (Рисунок 21) занимают большую площадь и выглядят более сглаженными ввиду более низкого пространственного разрешения, но доступны для мониторинга по всей территории круглые сутки. Визуализация исходных измерений радиационной температуры представлена на Рисунке 22. Контуры МКК выделены красным цветом, контуры области пробивания тропопаузы – синим. ВГО имеет характерную овальную форму, её расположение согласуется с областями высокой интенсивности осадков на Рисунке 21.

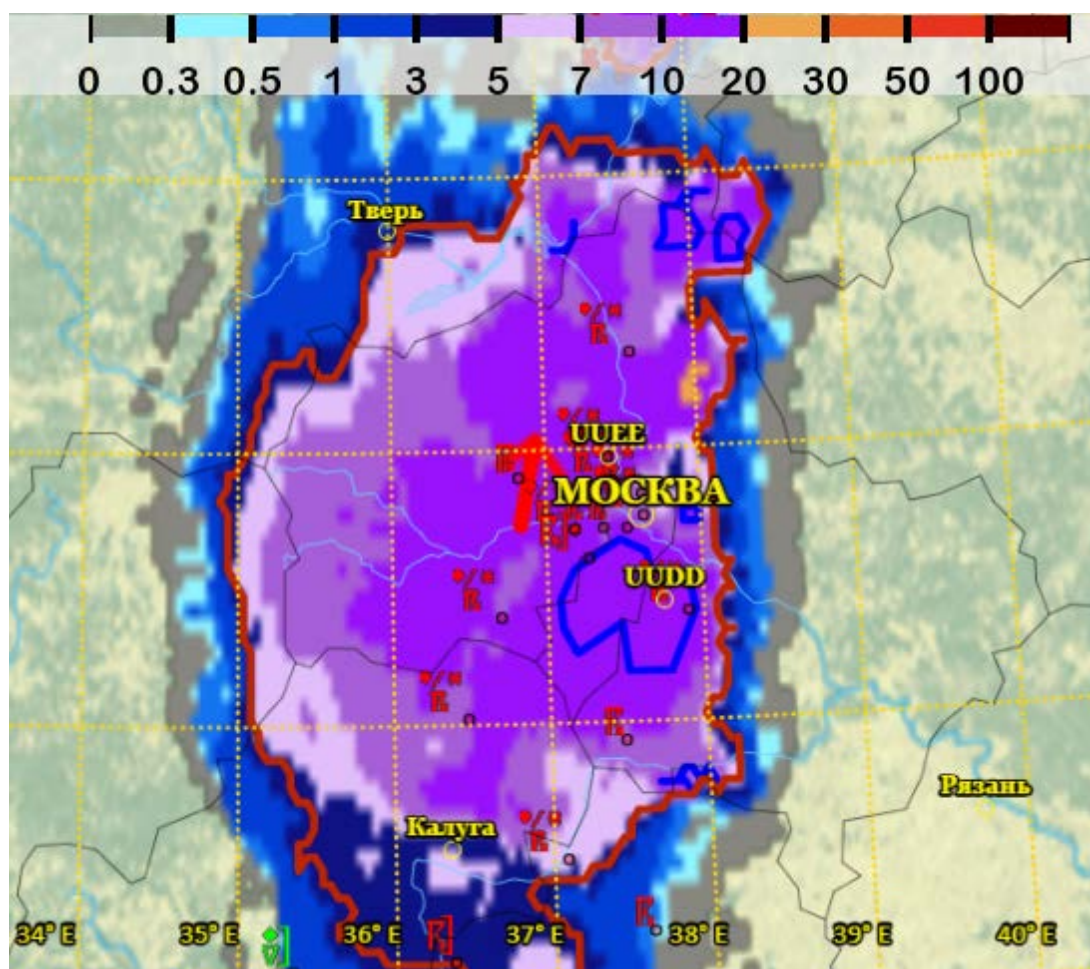


Рисунок 21 – Максимальная интенсивность осадков (мм/ч), восстановленная по измерениям радиационной температуры спутника Meteosat MSG в канале ИК 10,8, 15:00 ВСВ 07.07.2022

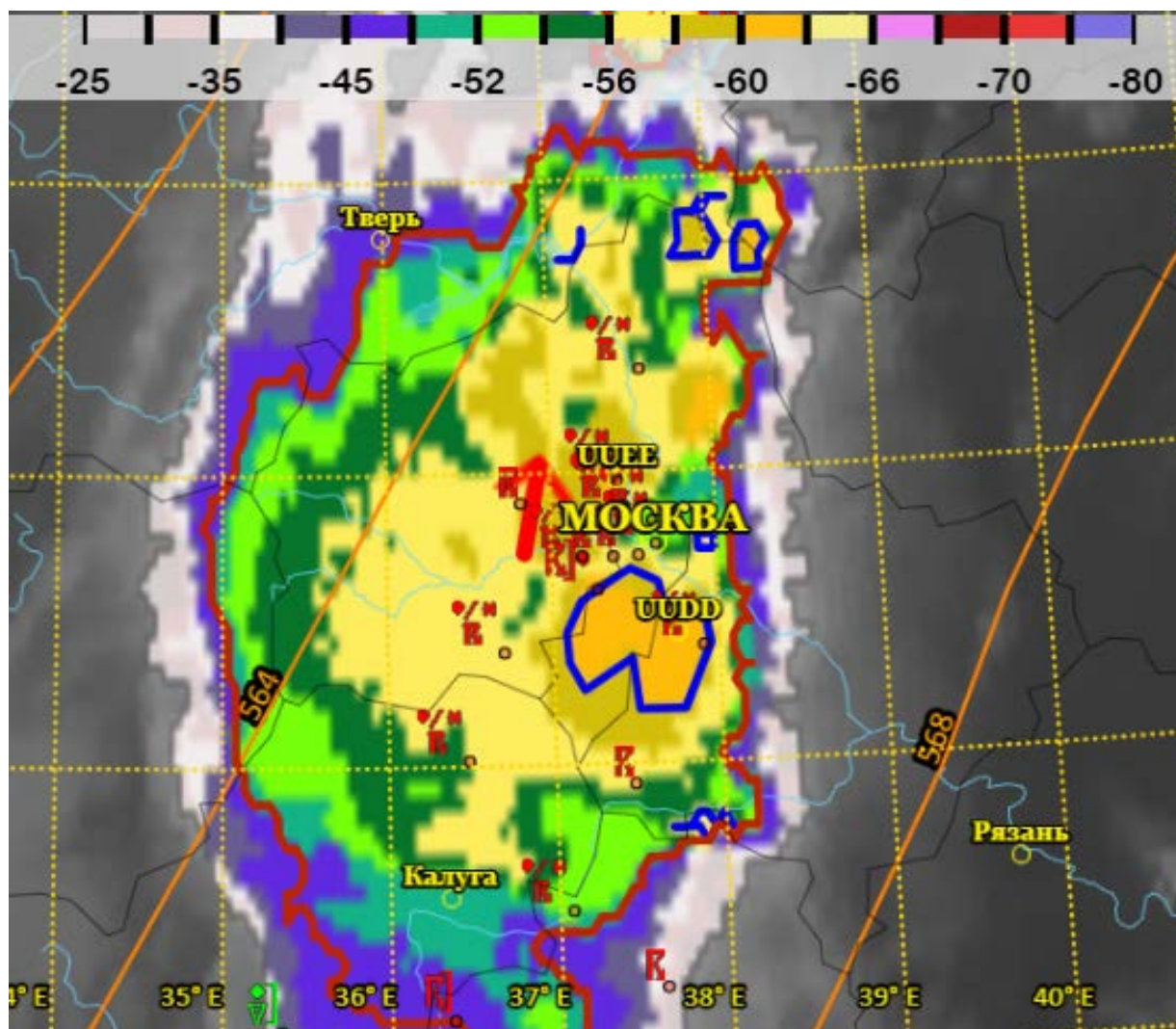


Рисунок 22 – Радиационная температура (°C) в диапазоне ИК 10,8 Meteosat MSG SEVIRI и изолинии геопотенциала на уровне 500 гПа, 15:00 ВСВ 07.07.2022

На Рисунке 23 изображены измерения температуры в диапазоне ИК 6,2, соответствующем полосе поглощения водяного пара, с наложением изолиний потенциального вихря (PV) на уровне 250 гПа по модели COSMO 6,6. Очень низкие температуры (ниже -60°C) в этом диапазоне наблюдаются внутри области пробивания тропопаузы – они свидетельствуют о выбросе переохлажденных капель и кристаллов мощными восходящими движениями в стратосферу.

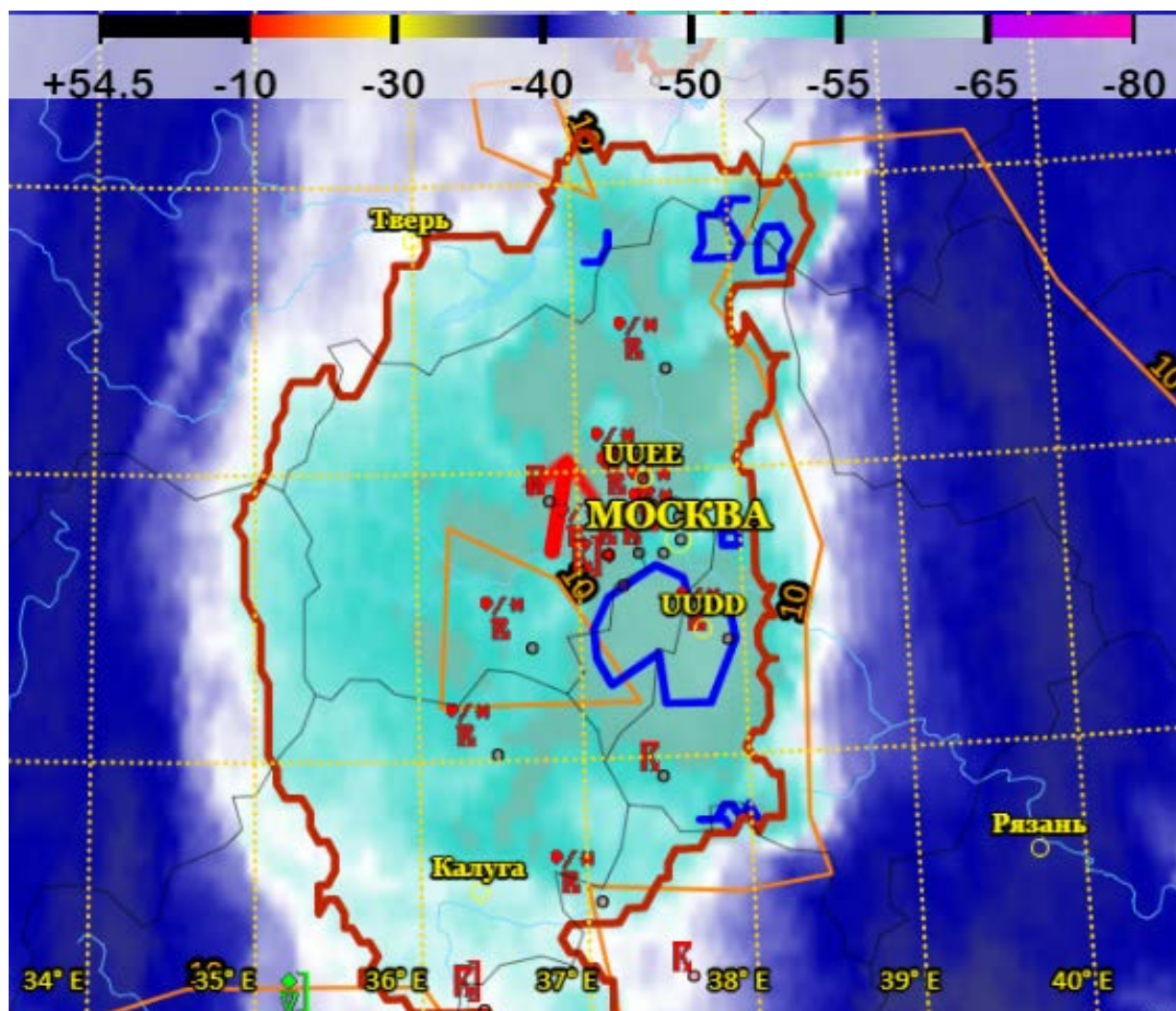


Рисунок 23 – Фрагмент снимка. Радиационная температура ($^{\circ}\text{C}$) в диапазоне ИК 6,2 Meteosat MSG SEVIRI, изолинии потенциального вихря на уровне 250 гПа (PV, оранжевым цветом), и значки гроз, ливней в 15:00 ВСУ 07.07.2022

На Рисунке 24 изображён снимок ВГО МКК в видимом канале высокого разрешения (1 км). Области, выделенные синим и красным цветом, имеют характерную для ОГК текстуру. ВГО достигла уровня тропопаузы и приобрела форму наковальни. Мощные восходящие движения привели к образованию отдельных «куполов», пробивающих тропопаузу.

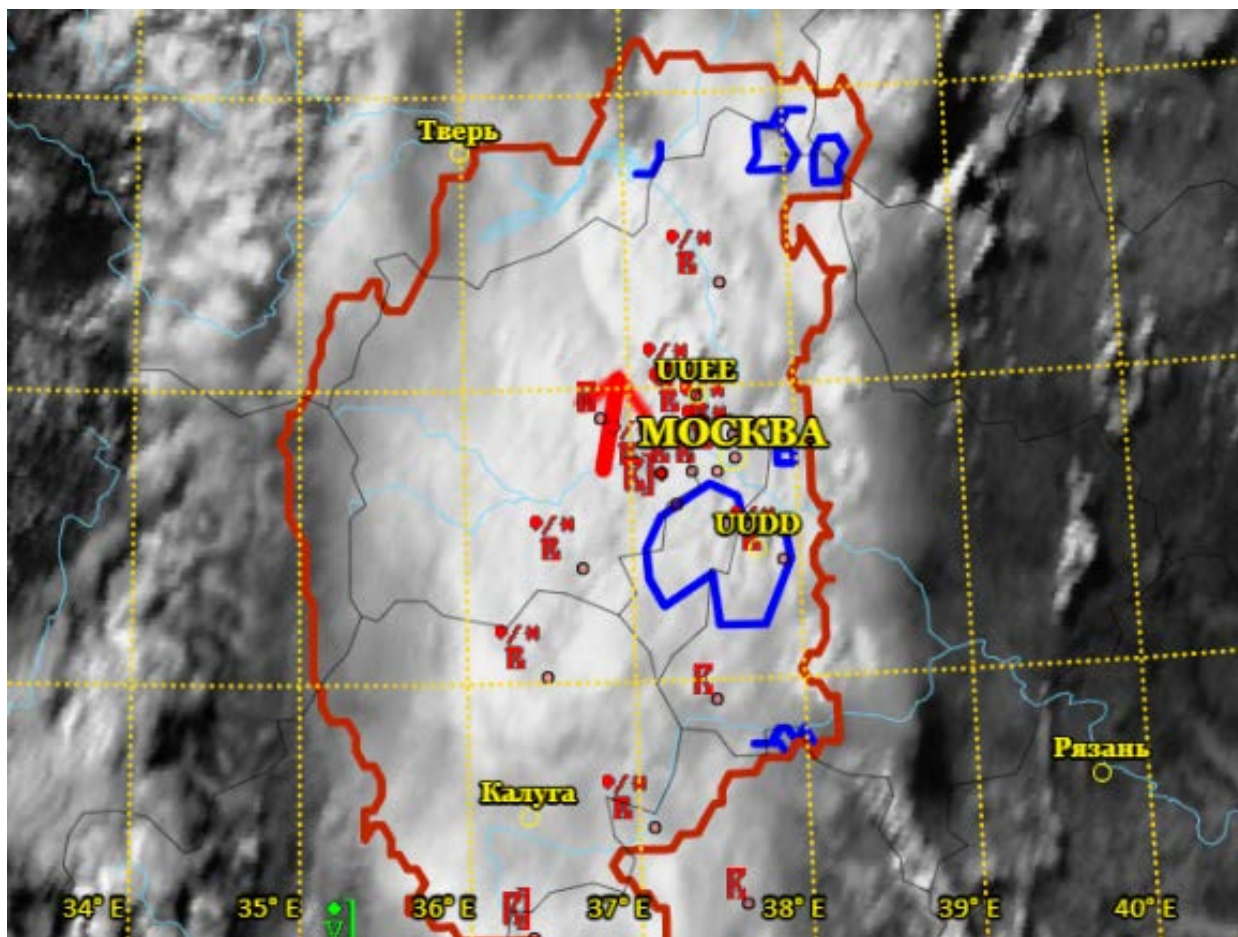


Рисунок 24 – Фрагмент снимка видимого канала высокого разрешения (1 км)
МИСЗ Meteosat MSG, 15:00 ВСВ 07.07.2022

Реализованная система мониторинга ОГК позволила проследить за развитием МКК над Москвой от момента возникновения (инициации) в 10:20 ВСВ до распада в 22:50 ВСВ. На Рисунке 25 (синим цветом, по левой оси ординат) изображён график изменения минимальной температуры ВГО (самой «холодной» точки), показывающий, что в 17:15 ВСВ температура наиболее холодной области ВГО опустилась ниже -64°C . В этот же момент значение разности ИК 6,2 – ИК 10,8 достигло 4,58 К, что также свидетельствует о пробивании тропопаузы – соответствующая область выделена синим контуром.

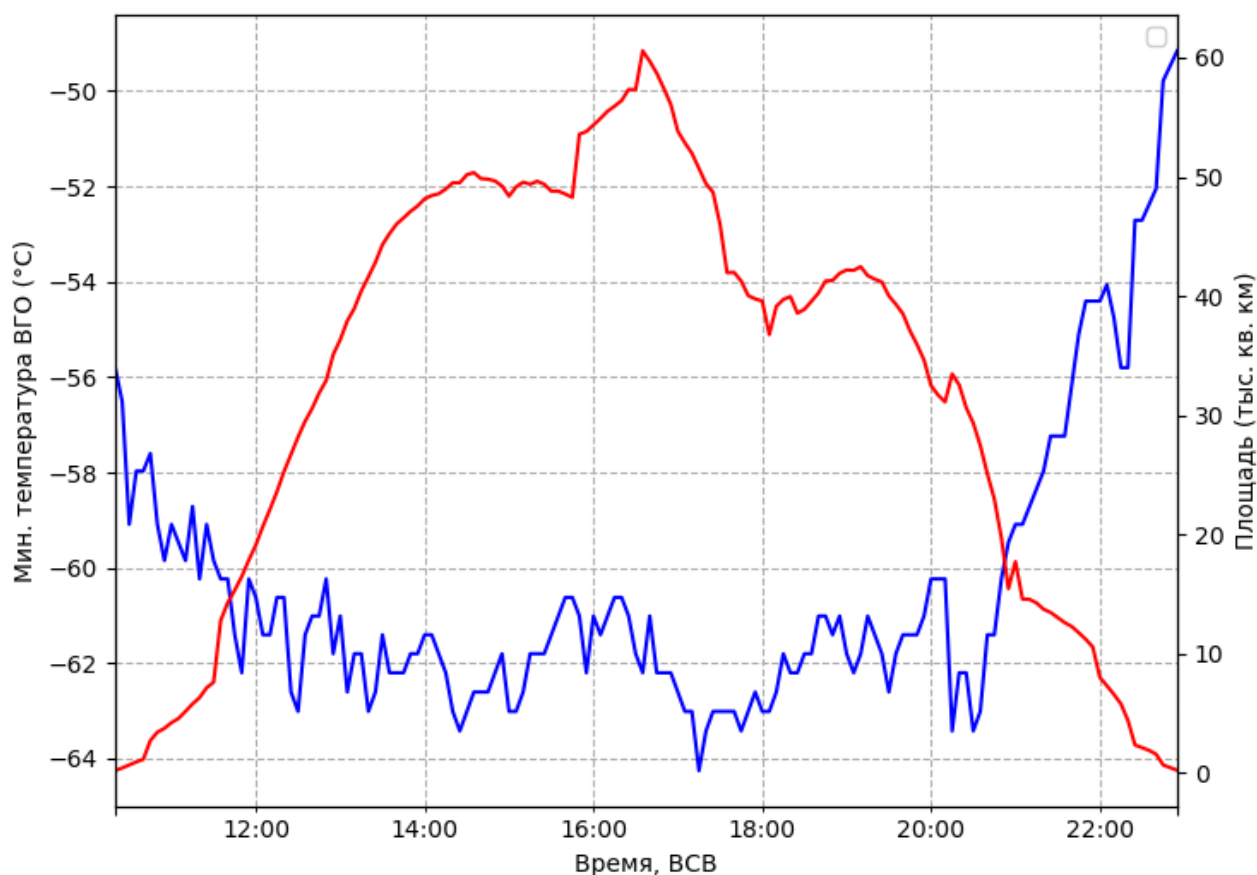


Рисунок 25 – Динамика изменения минимальной температуры ВГО МКС (°C, левая ось ординат, синим цветом) и площади ВГО МКС (тыс. кв. км, правая ось ординат, красным цветом) над Москвой, 07.07.2022

График изменения площади ВГО МКС, изображённый на Рисунке 25, красным цветом демонстрирует быстрое расширение ВГО со 150 кв. км в 10:20 ВСВ до 60,574 кв. км в 16:35 ВСВ. Затем, площадь ВГО начала быстро уменьшаться вплоть до момента полного распада в 22:50 ВСВ.

Падение минимальной температуры ВГО свидетельствовало об интенсивном вертикальном развитии облака, которое сопровождалось ростом интенсивности осадков. На Рисунке 26 показана динамика изменения максимальной интенсивности осадков (мм/час), восстановленной по измерениям радиационной температуры в диапазоне ИК 10,8 [93] и диаметра ОГК. График так же свидетельствует о быстром росте значений этих параметров с 10:20 до 16:35 ВСВ. Затем, с 16:40 до 22:50 ВСВ происходило быстрое ослабевание данного МКС.

Таким образом, процедура трекинга позволила проследить за эволюцией МКК от стадии зарождения (инициации) до распада и определить длительный период наибольшей интенсивности осадков. Видим, что anomальное количество осадков интенсивностью более 15 мм/мин выпадало около 10 ч.

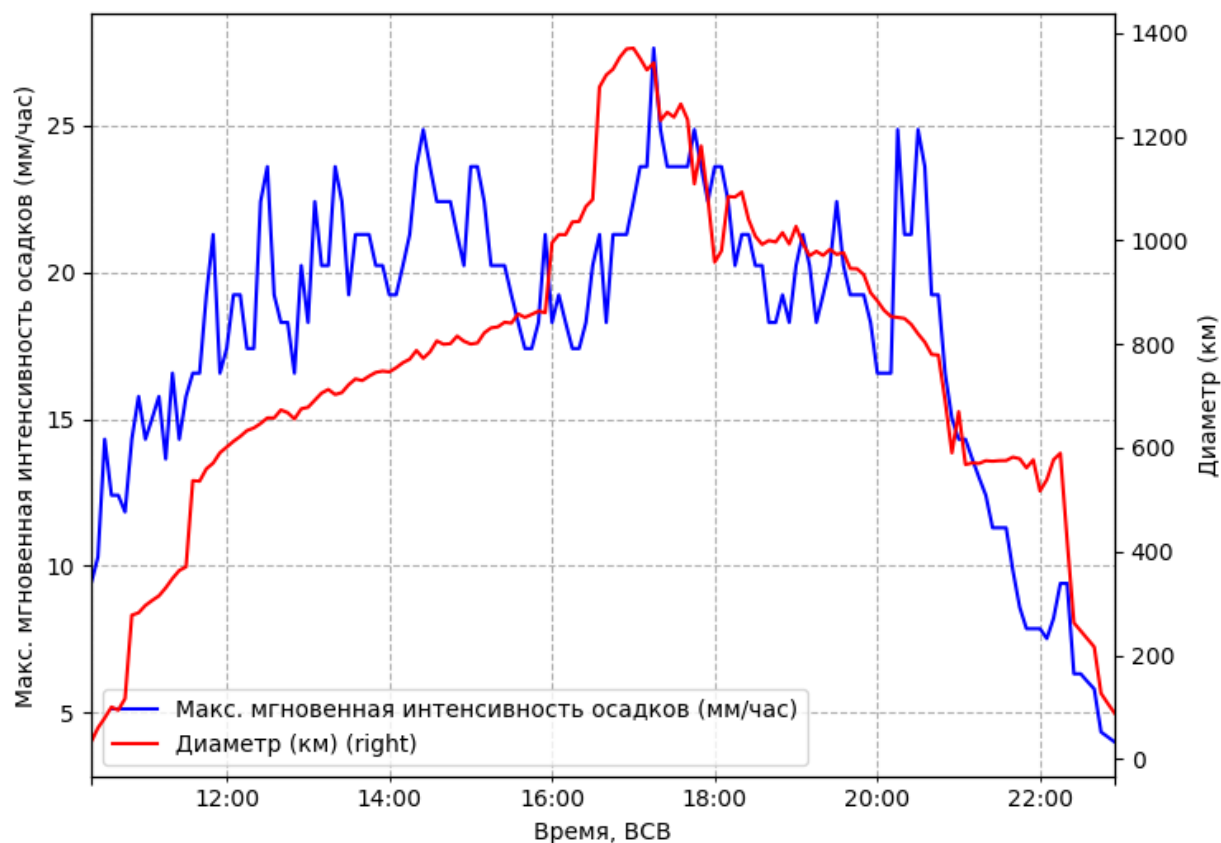


Рисунок 26 – Динамика изменения максимальной интенсивности осадков (мм/час, левая ось ординат, синим цветом), восстановленной по измерениям радиационной температуры в диапазоне ИК 10,8 [93], и диаметра ВГО ОГК (км, правая ось ординат, красным цветом) над Москвой, 07.07.2022

3.6 Применение созданных методик и алгоритмов для детального анализа условий обледенения в кристаллической части облачности глубокой конвекции на примере случая 10.05.2015

Далее исследован случай быстроразвивающейся мощной тропической ОГК, наблюдавшейся над городом Кайенна во Французской Гвиане с 19:00 до 22:30 ВСВ 10 мая 2015 года. Для анализа использовались данные прибора SEVIRI спутника Meteosat MSG с периодом обновления 15 мин и непосредственных измерений общего влагосодержания с помощью прибора ИКР2 в рамках исследовательских полётов кампании NAIC NIWC 2015.

На Рисунке 27 представлен фрагмент снимка видимого канала Meteosat MSG SEVIRI за срок 21:00 ВСВ 10.05.2022 с дополнительным наложением: контуров распознанной ОГК (красным цветом), вектора смещения ОГК (красной стрелкой), траектории полёта за период 20:45-21:00 (голубой линией) и точками, в которых наблюдалась влагосодержание более 1,5 г/м³ (голубые звёздочки). За данный срок по спутниковым данным среди многих облачных систем разного типа было выявлено несколько ОГК (выделены красным контуром), у части которых ВГО пробивала уровень тропопаузы. При этом, самолёт с прибором, измеряющим влагосодержание, пролетал в зоне развития лишь одного объекта ОГК.

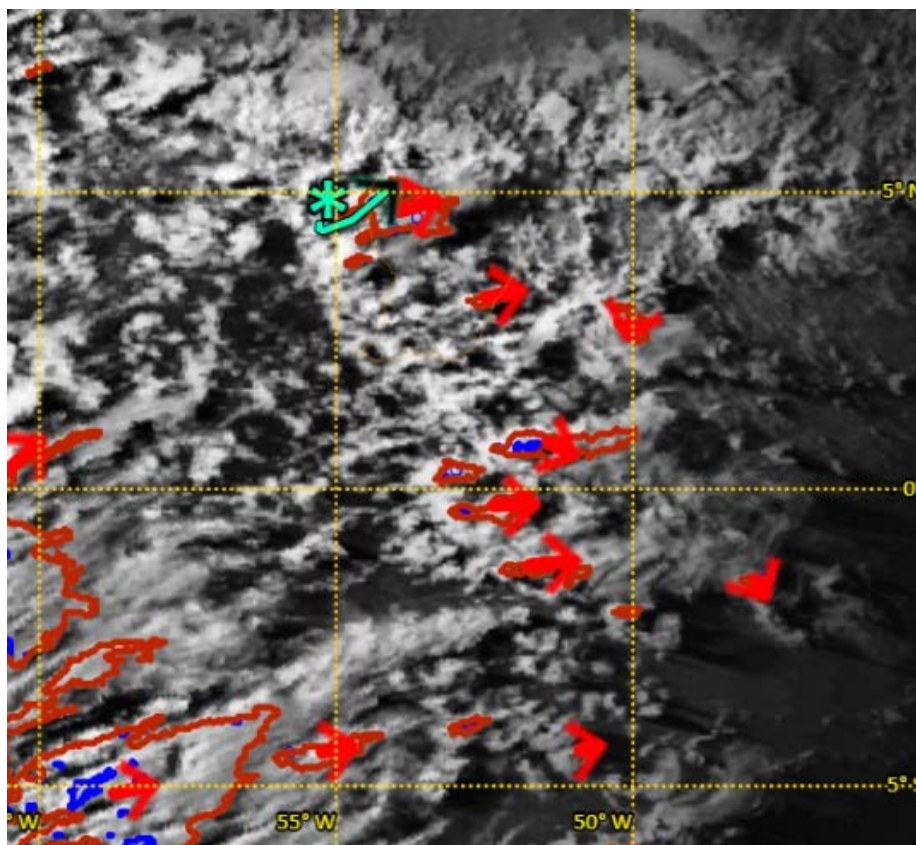


Рисунок 27 – Фрагмент снимка видимого канала Meteosat MSG SEVIRI за срок 21:00 ВСВ 10.05.2022 с дополнительным наложением: контуров распознанной ОГК (красным цветом), вектора смещения ОГК (красной стрелкой), траектории полёта за период 20:45-21:00 (голубой линией) и точками, в которых наблюдалась влагосодержание более 1,5 г/м³ (голубые звёздочки)

На Рисунке 28 представлен уменьшенный фрагмент этого же снимка за этот срок с целью показать ВГО этого объекта более детально. Области, выделенные синим и красным цветом, имеют характерную для ОГК текстуру. ВГО достигла уровня тропопаузы, после чего приобрела форму наковальни. Мощные восходящие движения привели к образованию ряда отдельных «куполов», пробивающих тропопаузу.

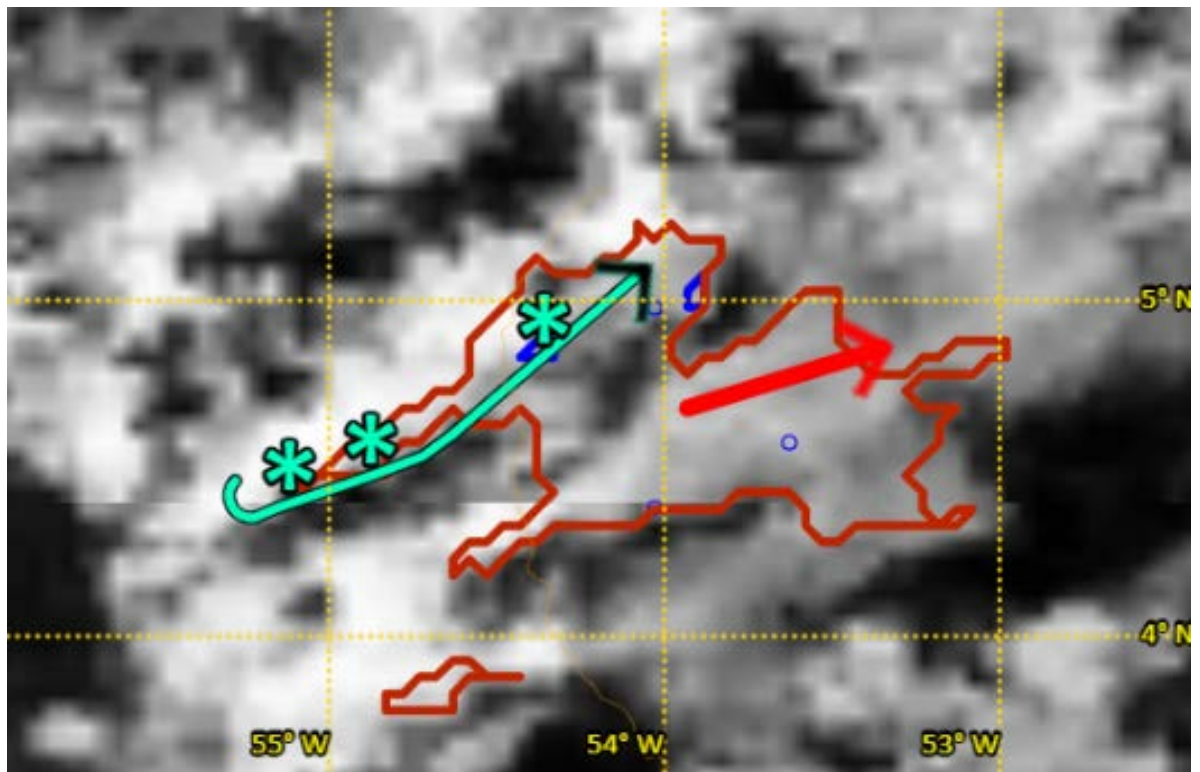


Рисунок 28 – Уменьшенный фрагмент снимка видимого канала Meteosat MSG SEVIRI за срок 21:00 ВСВ 10.05.2022 с дополнительным наложением: контуров распознанной ОГК (красным цветом), вектора смещения ОГК (красной стрелкой), траектории полёта за период 20:45-21:00 (голубой линией) и точками, в которых наблюдалась влагосодержание более 1,5 г/м³ (голубые звёздочки)

Высокая концентрация ледяных кристаллов (влагосодержание) наблюдалась в начале траектории, на самом краю ВГО ОГК - предположительно, в месте образования “хвоста” из-за сноса перистых облаков. Также, высокие значения наблюдались и при пролёте вблизи области пробивания тропопаузы, где температура ВГО была ниже -85 °С (см. Рисунок 29).

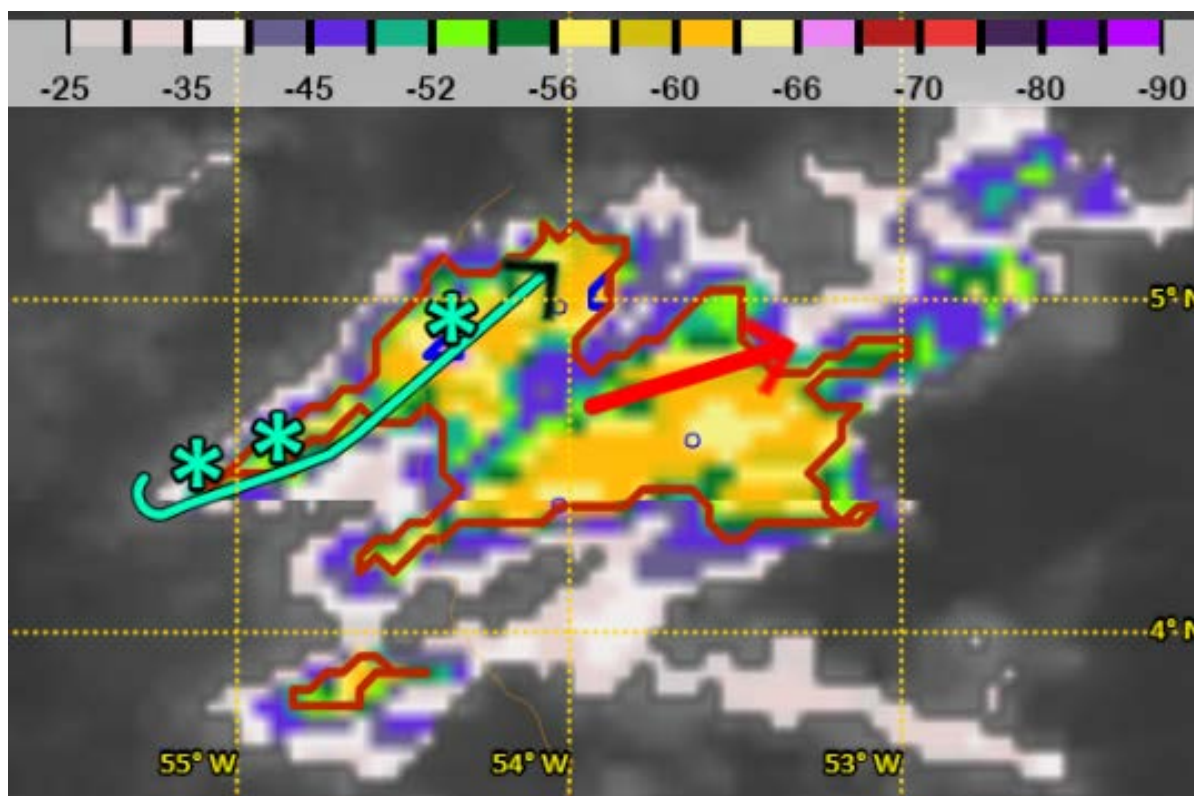


Рисунок 29 – Радиационная температура (°C) в диапазоне ИК 10,8 Meteosat MSG SEVIRI за срок 21:00 ВСВ 10.05.2022 с дополнительным наложением: контуров распознанной ОГК (красным цветом), вектора смещения ОГК (красной стрелкой), траектории полёта за период 20:45-21:00 (голубой линией) и точками, в которых наблюдалась влагосодержание более 1,5 г/м³ (голубые звёздочки)

На Рисунке 30 изображены измерения температуры в диапазоне ИК 6,2, соответствующем полосе поглощения водяного пара. Очень низкие температуры (ниже -60°C) в этом диапазоне наблюдаются внутри области пробивания тропопаузы – они свидетельствуют о выбросе переохлажденных капель и кристаллов мощными восходящими движениями в стратосферу.

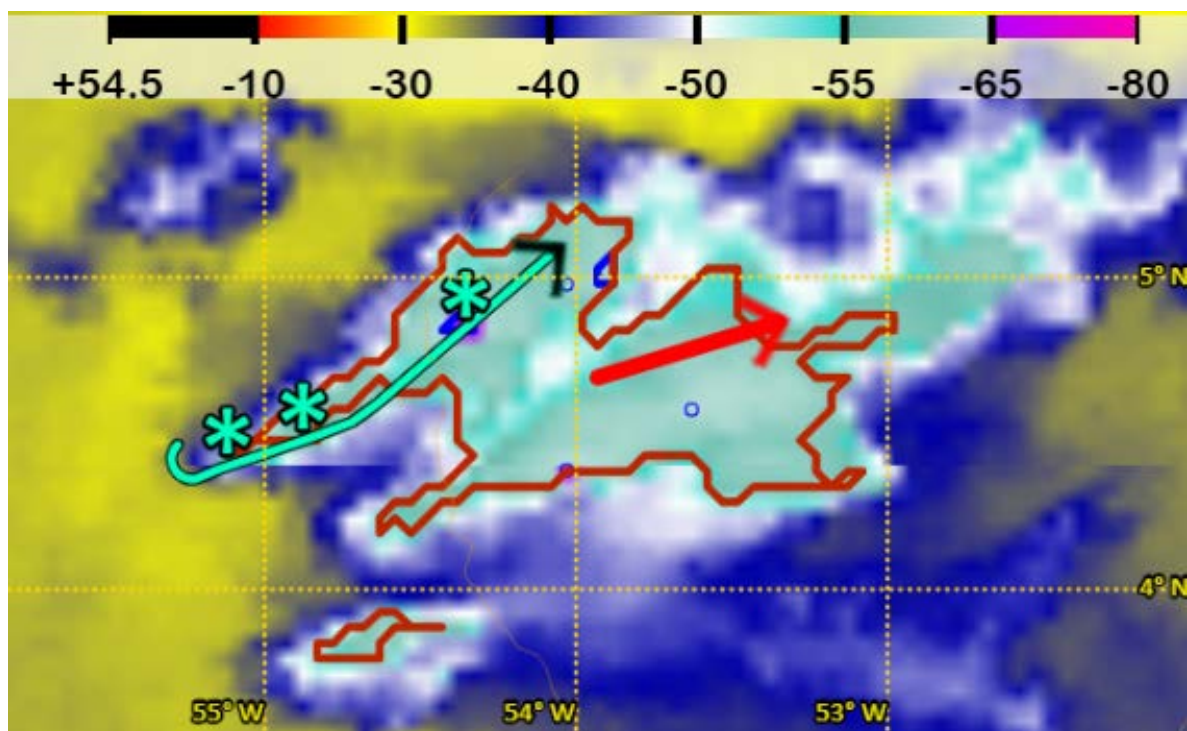


Рисунок 30 – Радиационная температура ($^{\circ}\text{C}$) в диапазоне ИК (ВП) 6,2 мкм Meteosat MSG SEVIRI за срок 21:00 ВCB 10.05.2022 с дополнительным наложением: контуров распознанной ОГК (красным цветом), вектора смещения ОГК (красной стрелкой), траектории полёта за период 20:45-21:00 (голубой линией) и точками, в которых наблюдалась влагосодержание более 1,5 г/м³ (голубые звёздочки)

Дополнительно, были проанализированы значения метеорологических величин, восстановленных по данным Meteosat MSG SEVIRI (продукт Optimal Cloud Analysis [16]). Согласно этим данным, высота ВГО на траектории полёта в период 20:45 – 21:00 варьировалась от 11 до 16,3 км, в то время как высота полёта была равна 11,9 км (см. Рисунок 30). То есть высокое влагосодержание наблюдалось в том числе ниже ВГО.

В Таблице 17 представлены максимальные значения высоты ВГО (км), размер ледяных частиц (мкм) и оптической толщины в зоне развития рассматриваемой ОГК (ограниченной контурами ОГК, как на Рисунке 31). Результаты соответствуют характерным диапазонам, описанным в Разделе 1.3 Главы 1.

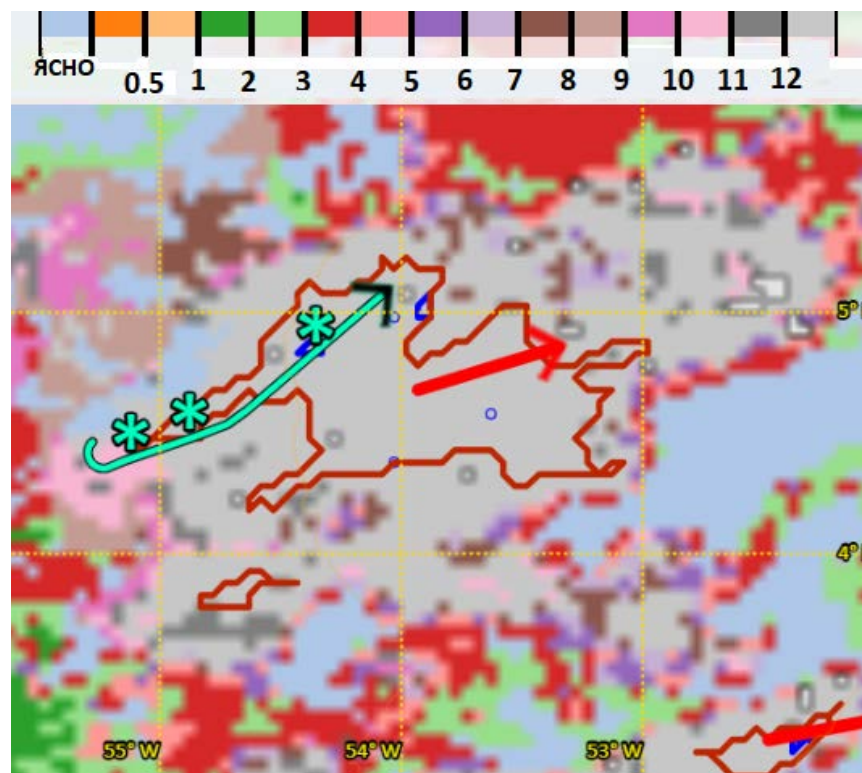


Рисунок 31 – Высота ВГО (км), рассчитанная по данным Meteosat MSG SEVIRI, за срок 21:00 ВСВ 10.05.2022 с дополнительным наложением: контуров распознанной ОГК (красным цветом), вектора смещения ОГК (красной стрелкой), траектории полёта за период 20:45-21:00 (голубой линией) и точками, в которых наблюдалось влагосодержание более 1,5 г/м³ (голубые звёздочки)

Таблица 17 – Максимальные внутри контура ОГК значения высот ВГО, размеров кристаллов, оптической толщины, восстановленных по данным Meteosat MSG (продукт Optimal Cloud Analysis [16])

Срок	Высота ВГО (км)	Размер ледяных частиц (мкм)	Оптическая толщина
2015-05-10 19:00:00	16,61	149,52	150,00
2015-05-10 19:15:00	16,47	109,49	150,00
2015-05-10 19:45:00	16,54	144,50	150,00
2015-05-10 20:00:00	16,63	149,31	150,00
2015-05-10 20:30:00	16,63	146,62	150,00
2015-05-10 20:45:00	16,63	149,65	150,00
2015-05-10 21:00:00	16,10	145,73	150,00
2015-05-10 21:15:00	15,20	149,91	16,00
2015-05-10 21:30:00	16,64	114,49	32,00
2015-05-10 21:45:00	14,18	114,49	32,00
2015-05-10 22:00:00	13,65	68,17	32,00
2015-05-10 22:15:00	13,36	68,17	14,98

Реализованная система мониторинга ОГК позволила проследить за развитием ОГК от момента возникновения (впервые распознанного как ОГК) в 19:00 ВСВ до распада в 22:30 ВСВ. На Рисунке 32 (синим цветом, по левой оси ординат) приведен график изменения минимальной температуры ВГО (самой «холодной» точки), показывающий, что в 19:15 ВСВ температура наиболее холодной области ВГО опустилась ниже -77°C . В этот же момент значение разности (ИК $6,2_{\text{mkm}}$ – ИК $10,8_{\text{mkm}}$) достигло 4°C , что свидетельствует о пробивании ВГО уровня тропопаузы – соответствующая область выделена синим контуром.

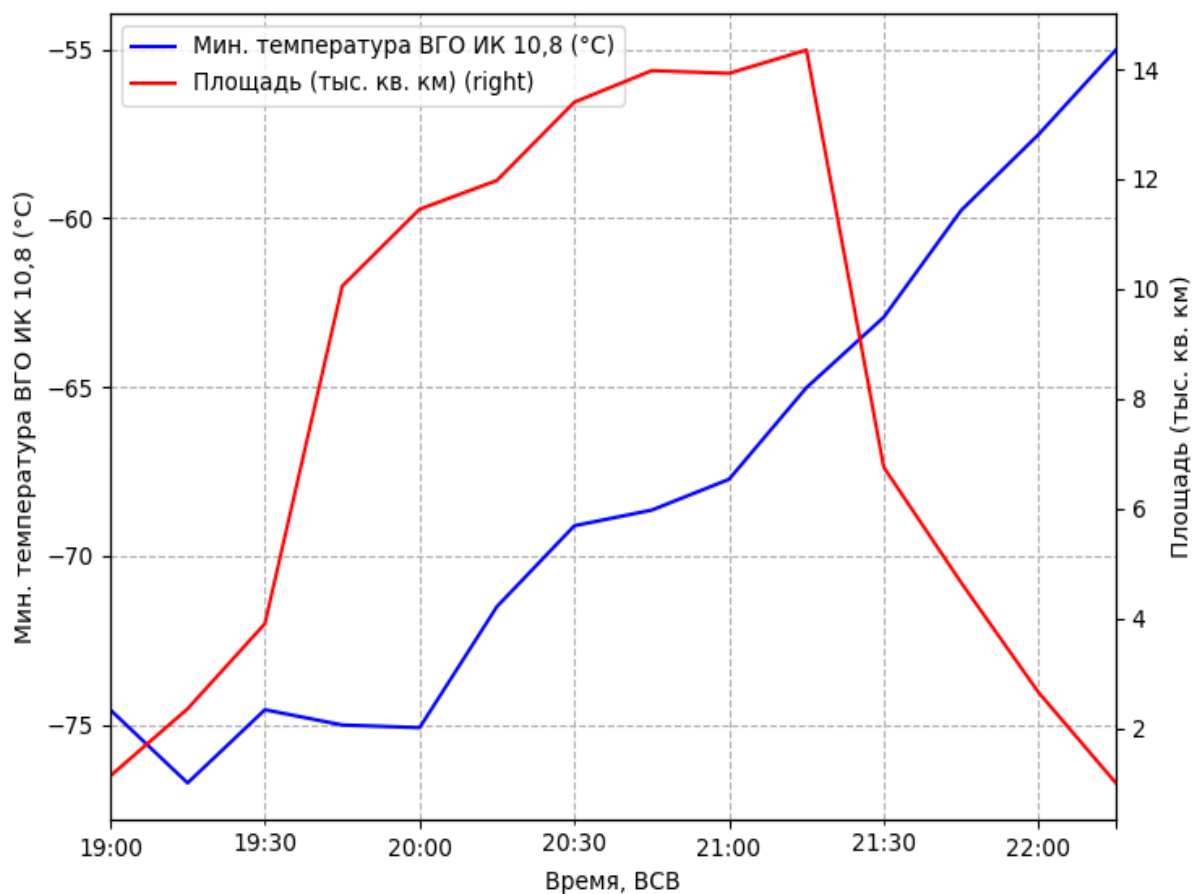


Рисунок 32 – Динамика изменения минимальной температуры ВГО МКК ($^{\circ}\text{C}$, синим цветом) и площади ВГО МКК (тыс. кв. км, красным цветом) над Кайенной, 10.05.2015. время ВСВ.

Хорошо видно, что площадь двух самых «холодных» изотерм -67°C и -72°C после 20:00 ВСВ начала резко уменьшаться, в то время как площадь внутри остальных изотерм менялась незначительно вплоть до 21:15 (см. Рисунок 33).

Таким образом можно считать, что МКК ослабевал в период 20:00-21:15 ВСВ, теряя интенсивность, но сохраняя большую площадь ВГО.

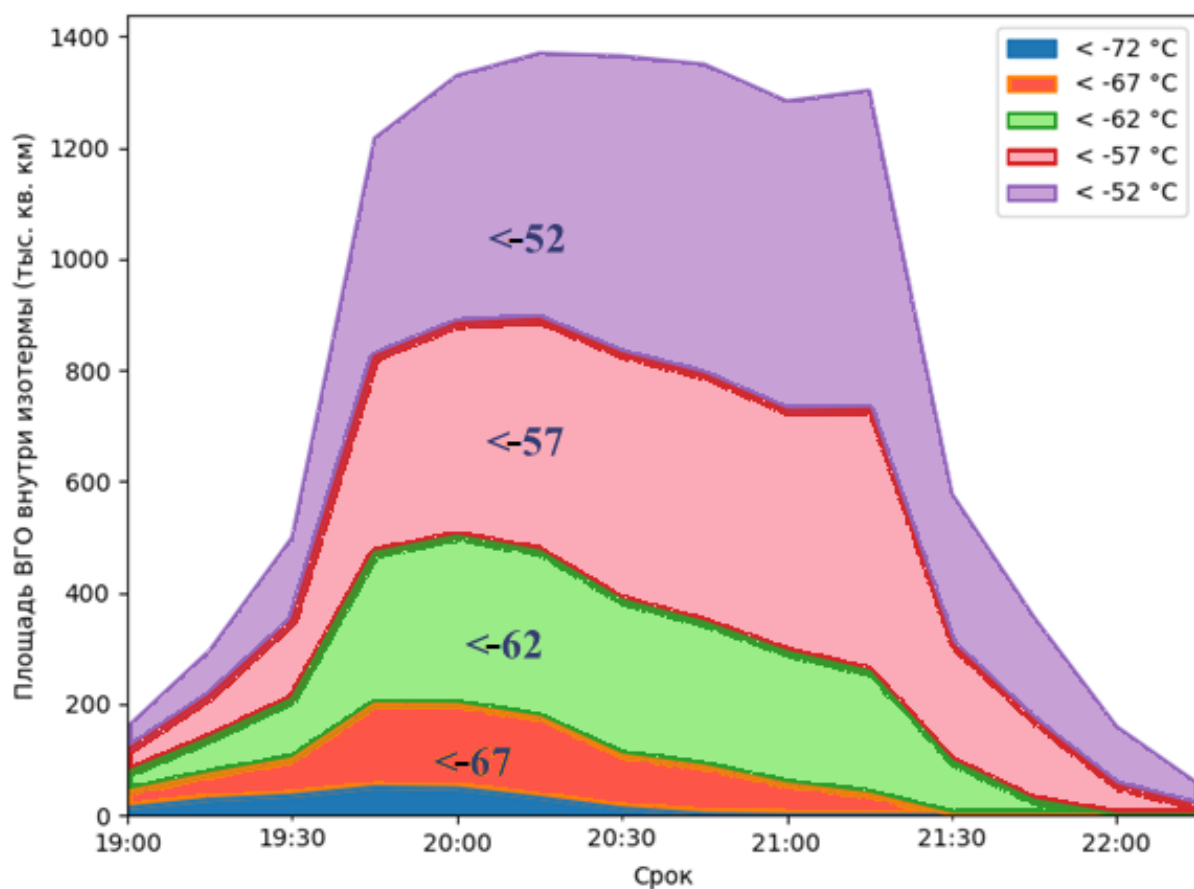


Рисунок 33 – Динамика изменения площади изотерм (тыс. кв. км) МКК, ограниченных контурами низких температур ВГО над Кайенной, 10.05.2015

График изменения площади МКК внутри изотерм ВГО, представленный на Рисунке 33, красным цветом демонстрирует быстрое расширение ВГО с 1 тыс. кв. км (около 10 км в диаметре) в 19:00 ВСВ до 14 тыс. кв. км (около 400 км в диаметре) в 21:15 ВСВ. Затем, площадь внутри изотерм минимальных значений ВГО начала быстро уменьшаться вплоть до момента полного распада в 22:50 ВСВ.

Падение минимальной температуры ВГО свидетельствовало об интенсивном вертикальном развитии облака, которое сопровождалось ростом интенсивности осадков. На Рисунке 34 показана динамика изменения максимальной интенсивности осадков (мм/час), восстановленной по измерениям радиационной

температуры в диапазоне ИК 10,8 [93] и диаметра ОГК (характеристики размера МКК). График так же свидетельствует о быстром росте значений этих параметров вначале в первые полчаса развития. Затем, с 20:00 ВСВ происходило быстрое уменьшение интенсивности (и размывание) данного МКК. Соответственно можно заключить, что в 21:00 ВСВ (момент наблюдения высокой концентрации ледяных кристаллов) интенсивность ОГК уже уменьшалась, то есть этот момент предшествовал началу стадии распада (или являлся её началом). Для данной стадии характерны низкая концентрации крупных ледяных частиц при недостаточно мощных восходящих движений и, как следствие, низкая радарная отражаемость. Концентрация мелких ледяных частиц практически не фиксируется большинством бортовых радарных измерений, поэтому на поверхности самолета отложений льда не наблюдается и опасными полеты в кристаллических облаках верхнего яруса ранее не считались. Таким образом, процедура трекинга позволила проследить за эволюцией МКК от стадии зарождения (инициации) до распада и определить период наибольшей интенсивности осадков.

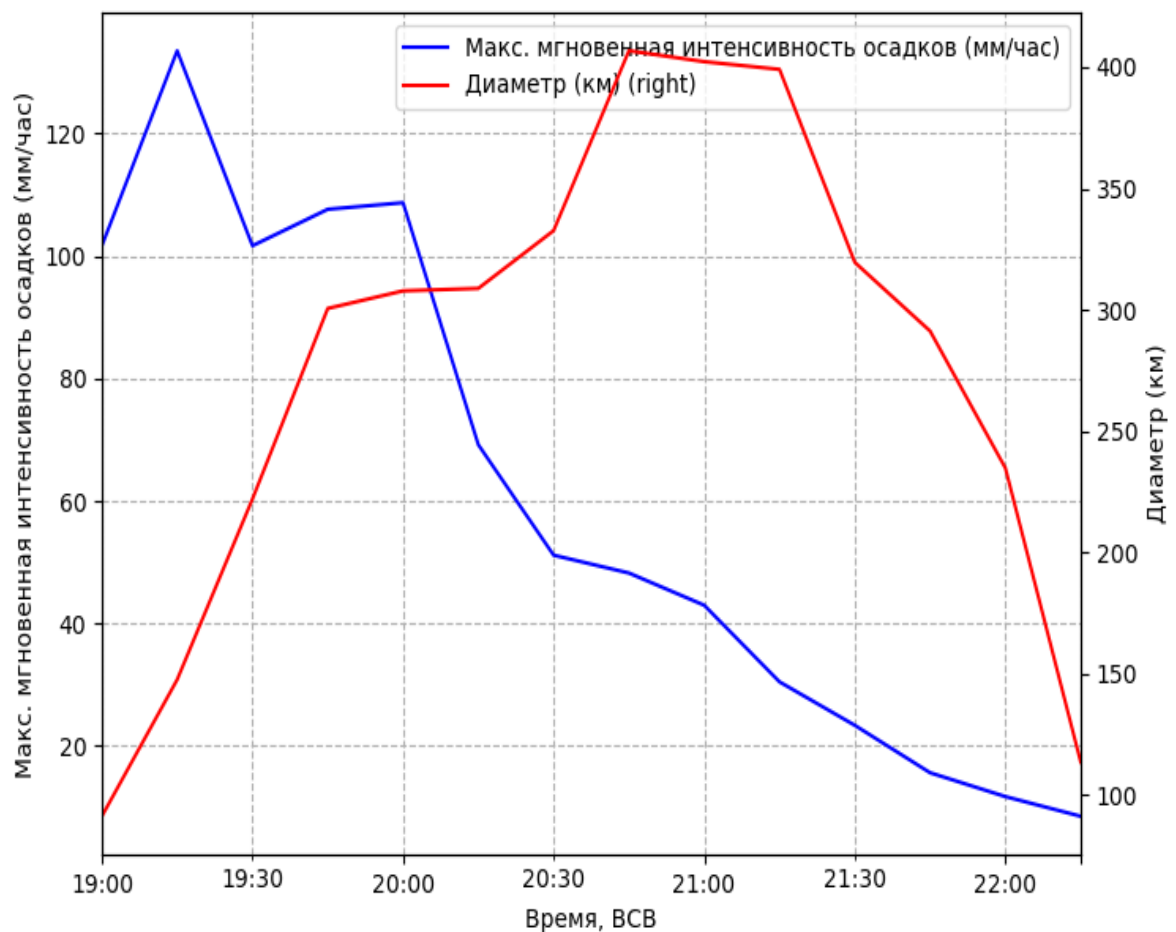


Рисунок 34 – Динамика максимальной мгновенной интенсивности осадков в зоне развития МКК ($^{\circ}\text{C}$, синим цветом) и диаметра ВГО МКК (км, красным цветом) над Кайенной, 10.05.2015

Выводы по Главе 3:

1. 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 умеренных широт.
2. Полученная статистика позволяет считать, что мощные МКС и МКК наблюдаются не так уж редко и в умеренных широтах ЕТР в тёплый период, а не только в тропиках, что, вероятно, связано с проникновением тропических воздушных масс и потеплением климата.

3. Распределение значений повторяемости ОГК свидетельствует о наличии долгоживущих МКС (не более 30 случаев), короткоживущих ОГК с опасными явлениями заметно больше, но за счет малого времени существования высокий риск обледенения двигателей будет заметно ниже.
4. Система мониторинга облачности глубокой конвекции (СМОГК) позволяет проследить за развитием ОГК. 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°C , во втором – до -69°C . Максимальная интенсивность осадков, при этом, в первом случае достигала 23,5 мм/час, во втором – 52 мм/час. Важно отметить, что стадии максимального развития рассмотренные облачные системы достигли за 3 и 6 часов соответственно, то есть их можно считать быстро развивающимися.
5. СМОГК была успешно применена для анализа случая быстроразвивающейся мощной тропической ОГК над городом Кайенна во Французской Гвиане 10 мая 2015 года с привлечением непосредственных измерений общего влагосодержания (лёдности), полученных с помощью самолётного зондирования в рамках экспериментальных полетов кампании «НАИС HIWC 2015». Благодаря разработанной методике удалось распознать и проследить за эволюцией ОГК, в которой наблюдалась высокая концентрация ледяных кристаллов (более 1,5 г/м³). Было установлено, 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 непосредственно перед быстрым уменьшением площади (распадом). Эти условия хорошо согласуются с описанными в литературе «неклассическими» случаями высокой концентрации ледяных кристаллов в ОГК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы были получены следующие основные результаты:

1. Всесторонне проанализировано состояние актуальной проблемы обледенения двигателей самолетов на верхних уровнях в зонах высокой концентрации ледяных кристаллов вблизи областей глубокой конвекции (ОГК): обсуждены имеющиеся фактические данные, включая информацию специальных летных экспериментов; возможности использования ИСЗ для распознавания опасных условий; разработанные и используемые в ряде стран алгоритмы распознавания областей глубокой конвекции, генерирующих зоны высокой концентрации ледяных кристаллов. Сделан вывод о возможности развития аналогичного алгоритма по данным геостационарного МИСЗ для территории европейской России, восполняя отсутствие измерений концентрации ледяных частиц в ОГК и их окрестностях использованием мирового опыта.

2. Развита новый метод распознавания мощных ОГК как зон высокого риска обледенения двигателей самолетов при полетах на верхних уровнях на основе данных геостационарных МИСЗ за 8 лет (2013-2020) над Европой путём сочетания классических пороговых методов и алгоритмов машинного обучения.

3. В приближении пороговых методов основными предикторами для распознавания ОГК как зон высокого риска обледенения двигателей принимаются характеристики радиационной температуры в инфракрасных каналах на верхней границе облаков (ВГО), интерпретируемые как характеристики вертикального развития ОГК, достигающих тропопаузы или пробивающих ее. Высота и температура тропопаузы определялись по результатам численного прогноза.

4. На стадии машинного обучения в качестве предикторов использован набор показателей, характеризующих распределение радиационной температуры на верхней границе ОГК, параметров формы контуров ОГК, аппроксимируемой эллипсом (так называемые статические предикторы) и характеристики изменения

температуры ВГО и смещения ОГК (динамические предикторы), всего около 100 предикторов. Машинное обучение производится методом градиентного бустинга; применены также метод искусственных нейронных сетей и логистической регрессии; обсуждены достоинства и недостатки методов и успешность распознавания ОГК с их помощью. Для целей создания оперативно используемого алгоритма оптимальными признаны методы градиентного бустинга и искусственных нейронных сетей.

5. Валидация результирующего комплексного метода проведена на контрольной выборке данных геостационары МИСЗ за 2020 год и показала высокий уровень предупрежденности явления (91,17%) при низкой доле ложных тревог (12,72%). Согласно этим результатам, качество детектирования ОГК по предлагаемому методу выше, чем у аналогов, разработанных ранее за рубежом. Метод используется в оперативном режиме.

6. Для наукастинга (прогноза до 1-2 ч) направления смещения ОГК и зон возможного обледенения двигателей использован метод оптического потока, примененный к последовательным снимкам объекта. Для установления соответствия между объектами (ОГК) на последовательных снимках разработан специальный алгоритм трекинга (слежения) как оптимизационный с единой целевой функцией. Валидация метода прогноза направления смещения ОГК на данных за июль-сентябрь 2024 г. показала наличие тесной корреляции между последовательными векторами смещения объекта.

7. Развита ранее автором и внедренная в оперативную прогностическую практику Гидрометцентра России система мониторинга облачности глубокой конвекции (СМОГК), представляющая собой интерактивный веб-интерфейс, усовершенствована применительно к задачам диссертации (СМОГК-2) и запатентована (свидетельство о государственной регистрации программ на ЭВМ (РИД) № 2022680485).

8. Анализ свойств ОГК в пределах используемой выборки данных геостационарных МИСЗ показывает, что мощные мезомасштабные конвективные системы (МКС) и комплексы (МКК) наблюдаются нередко и в умеренных широтах, над европейской территорией России, хотя и реже, чем в тропиках. Установлено наличие долгоживущих (более суток) МКС и МКК (175 объектов в пределах выборки), почти всегда сопровождающихся опасными явлениями по наземным наблюдениям, и наиболее долгоживущих (30 объектов в пределах выборки). Характеристики распознанных ОГК (размеры и динамика их изменения, температура ВГО) сходны с типичными для тропических ОГК.

9. Представленный в диссертации новый метод распознавания ОГК как зон высокого риска обледенения двигателей самолетов разработан на материалах геостационарных спутников Meteosat 8-11, по которым имелся архив данных. Дополнительно реализована возможность использования измерений российских геостационарных спутников Электро-Л № 2-4 и Арктика-М № 1-2. Представлен пример визуализации измерений в ИК 10,8 мкм каналах и комплексного монтажа данных российских МИСЗ.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АМСГ	Авиационная метеорологическая станция гражданская
АМЦ	Авиационный метеорологический центр
ВГО	Верхняя граница облака
ВСВ	Всемирное Скоординированное Время, совпадающее с временем по Гринвичу
ГБ	Градиентный бустинг
ИК	Инфракрасный участок спектра
ИНС	Искусственная нейронная сеть
КН-01	Код синоптической сети наблюдений
ЛР	Логистическая регрессия
МИСЗ	Метеорологический искусственный спутник Земли
МКК	Мезомасштабный конвективный комплекс
МКС	Мезомасштабная конвективная система
ОГК	Облачность глубокой конвекции
ОГКс	Класс подтверждённых объектов ОГК (от англ. confirmed – подтверждённый)
ОГКу	Класс неподтверждённых объектов ОГК (от англ. unconfirmed – неподтверждённый)
СМОГК	Система мониторинга глубокой конвекции
ОЯ	Опасное явление
РИД	Результат интеллектуальной деятельности
ЭВМ	Электронная вычислительная машина
УсОД	Условия обледенения двигателей
ЧПП	Численный прогноз погоды
ЦГМС	Центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды
ALPHA	ALgorithm for Prediction of HIWC Areas

API	Application Programming Interface
ATD	Arrival Time Difference
AUC	Area Under the Curve, площадь под ROC-кривой
BTD	Brightness Temperature Difference
BTW	Brightness Temperature Window
CALIPSO	Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations
CAPE	Convective available potential energy
Cb-TRAM	Cumulonimbus Tracking and Monitoring
CIP	Volume-averaged height-integrated radar reflectivity
CLOUDSAT	Cloud Satellite
COD	Cloud Optical Density
COG	Cloud optimized GeoTIFF
COSMO	Название негидростатической конечно-разностной модели атмосферы (Consortium of Small-scale MOdelling)
COSMO-Ru	Система краткосрочного прогноза погоды на основе негидростатических моделей атмосферы COSMO и ICON, реализованная в Российской Федерации в Гидрометеорологическом научно-исследовательском центре
CPP	Cloud Physical Parameter
ESWD	European Severe Weather Database
FAR	False alarm rate
FN	False negative
FP	False positive
GDCP	GOES-Derived Cloud Products
GFS	Global Forecast System
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite
HIWC	High ice water content- Высокая ледность
HRV	High Resolution Visible

ICON	Название негидростатической конечно-разностной модели атмосферы (ICOsahedral Nonhydrostatic)
IWC	Ice water content – Водность/ледность
KNMI	Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (Royal Netherlands Meteorological Institute)
LaRC	Langley Research Center
MSG	Meteosat Second Generation
MTSAT	Multifunctional Transport Satellites
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NWC SAF	Nowcasting Satellite Application Facility
OT	Overshooting top – Область пробивания тропопаузы
PHIWC	Probability of high ice water content
POD	Probability of detection
QC	Quality category
ReLU	Rectified linear unit
RDT	Rapidly developing thunderstorm
ROC	Receiver operating characteristic
SEVIRI	Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager
SIGMA	System of Icing Geographic Identification in Meteorology for Aviation
SYNOP	Surface synoptic observations
TN	True negative
TOOCAN	Tracking Of Organized Convection Algorithm using a 3D segmentationN
TP	True positive
VAHIRR	Volume-averaged height-integrated radar reflectivity
WV	Water vapor

СПИСОК ТЕРМИНОВ

вектор смещения: Направление и величина изменения позиции объекта или участка изображения между последовательными кадрами.

верхняя граница облачности: Граница между облачным слоем и свободным от облаков воздухом в атмосфере.

видимость: Расстояние, на котором можно отчетливо видеть объекты или источники света в атмосфере.

водность облаков: Массовая концентрация облачных капель в единице объема воздуха (г/м^3).

градиентный бустинг: Техника машинного обучения, основанная на создании ансамбля моделей (как правило, деревьев решений), каждая из которых улучшает предсказания предыдущей.

доля ложных тревога: Показатель, указывающий на долю неправильно спрогнозированных событий, которые не произошли в реальности.

кластеризация: Процесс группировки данных в кластеры на основании определенных признаков или характеристик.

купол пробивания тропопаузы (ОТ): Верхняя часть облака, пробивающая тропопаузу и поднимающаяся в стратосферу, часто ассоциируется с сильными вертикальными движениями воздуха.

лёдность облаков: Массовая концентрация облачных кристаллов в единице объема воздуха (г/м^3).

лёдосодержание облаков: Содержание облачных кристаллов в атмосферном столбе (г/м^2).

логистическая регрессия: Статистический метод, используемый для прогнозирования вероятности события на основе набора независимых переменных.

мезомасштабные конвективные системы (МКС): Крупные облачные системы, занимающие размеры порядка сотен километров и способные вызывать опасные метеорологические явления, такие как грозы, штормы и торнадо.

машинное зрение: Область искусственного интеллекта, специализирующаяся на обработке и анализе изображений с помощью компьютеров.

методы машинного обучения: Алгоритмы и модели, позволяющие компьютерам учиться на данных и делать прогнозы или принимать решения без явного программирования.

наблюдение объекта ОГК: Состояние объекта ОГК, наблюдаемое со спутника, в определенный момент времени (срок).

обледенение двигателей в ледяных кристаллах (ice crystal icing): Процесс накопления льда на внутренних компонентах авиационных двигателей, вызванный контактом с переохлажденными каплями воды или ледяными кристаллами в атмосфере на больших высотах, что может привести к нарушению работы двигателей и потере тяги.

объект ОГК: Кластер пикселей на спутниковом снимке, выделенный пороговым методом распознавания, предположительно относящийся к верхней границе конвективной ячейки или системы.

оперативный режим: Режим работы системы, при котором данные обновляются в реальном времени и используются для немедленного принятия решений.

оптическая толщина облаков: Интенсивность ослабления радиационного потока облачными каплями и кристаллами в атмосферном столбе (безразмерная).

предупрежденность: Показатель, характеризующий долю правильно спрогнозированных событий (например, опасных явлений) среди всех реально произошедших событий.

прямая радиация: Радиация, приходящая к земной поверхности непосредственно от диска Солнца.

повторяемость: Частота возникновения определенного метеорологического явления или состояния атмосферы в определенное время и на определенной территории.

разбиение выборки: Процедура деления исходной выборки данных на подгруппы для анализа или обучения модели.

распознавание: Идентификация и классификация объектов, событий или явлений на основе данных или сигналов.

синоптические наблюдения: Комплексные метеорологические наблюдения, проводимые на регулярной основе в определенных точках земного шара, направленные на получение данных о текущем состоянии атмосферы и погодных условиях.

трекинг: Процесс отслеживания движения объектов или явлений во времени с использованием последовательных данных или изображений.

тропопауза: Переходный слой между тропосферой и стратосферой, где происходит резкое изменение температуры и плотности воздуха.

турбулентность: Неупорядоченное движение воздуха, характеризующееся хаотическими изменениями скорости и направления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисова В. В., Шакина Н. П. Использование потенциального вихря Эртеля для расчета высоты и температуры тропопаузы // Труды Гидрометцентра СССР. 1989. № 305. С. 98–117.
2. Геоостационарный гидрометеорологический космический комплекс «Электро-Л»: веб-сайт АО «Российские космические системы». URL: <https://russianspacesystems.ru/bussines/dzz/elektro-l/> (дата обращения: 25.09.2023).
3. Довиак Р., Зрнич Д. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 512 с.
4. Иванова А. Обледенение двигателей самолетов в ледяных кристаллах: пути решения проблемы // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 2 (368). С. 95–109.
5. Киктев Д. Б., Муравьев А. В., Бундель А. Ю. Методические рекомендации по верификации метеорологических прогнозов. М.: Типография АМА ПРЕСС, 2021. 94 с.
6. Космический аппарат типа «Арктика-М»: веб-сайт АО «Российские космические системы». URL: <https://russianspacesystems.ru/bussines/dzz/orbitalnaya-gruppirovka-ka-dzz/arktika-m/> (дата обращения: 26.09.2023).
7. РД 52.27.284-91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиографических прогнозов: руководящий документ от 25.01.1991 № 52.27.284-91: дата введения 01.01.1992 / Комитет гидрометеорологии при кабинете министров СССР. М.: Госгидромет СССР, 1991.
8. Руководство по прогнозированию метеорологических условий для авиации / под ред. К. Г. Абрамович, А. А. Васильева. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 301 с.

9. Чернокульский А. В., Козлов Ф. А., Курганский М. В., Мохов И. И., Шихов А. Н., Ярынич Ю. И. Опасные явления погоды конвективного характера в России: статистика, межгодовая изменчивость, риски возникновения в 21 веке // Международная молодежная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде – 2019. С. 234–239.
10. Шакина Н. П. Лекции по динамической метеорологии. М.: ТРИАДА ЛТД, 2013. 248 с.
11. Шакина Н. П., Горлач И. А., Скриптунова Е. Н., Комасько Н. Н. Обледенение двигателей самолета в кристаллических облаках: анализ случая // Метеорология и гидрология. 2014. № 2. С. 85–91.
12. 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.
13. 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.
14. Шишов А. Е., Горлач И. А. Свидетельство о государственной регистрации программы на ЭВМ (РИД) № 2022680485 от 01.11.2022. Система мониторинга облачности глубокой конвекции (СМОГК). ФГБУ «Гидрометцентр России», 2022.
15. Шишов А., Горлач И. Алгоритм распознавания и мониторинга облачности глубокой конвекции по данным МИСЗ на основе целочисленного программирования // Труды Гидрометцентра России. 2020. Т. 376. № 2. С. 39–59.
16. Abadi M., Barham P. TensorFlow: a system for large-scale machine learning // Proceedings of the 12th USENIX Conference on Operating Systems Design and Implementation. Savannah, GA, USA: USENIX Association, 2016. Pp. 265–283.
17. Adams R. Seeded Region Growing // Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on. 1994. Vol. 16. Pp. 641–647.

18. Adler R. Detection of Severe Midwest Thunderstorms Using Geosynchronous Satellite Data // *Monthly Weather Review*. 1985. Vol. 113. Pp. 131–137.
19. Adler R. F., Markus M. J., Fenn D. D., Szejwach G., Shenk W. E. Thunderstorm Top Structure Observed by Aircraft Overflights with an Infrared Radiometer // *Journal of Climate and Applied Meteorology*. 1983. Vol. 22. No. 4. Pp. 579–593.
20. Aicardi-Vila D., Musé P., Alonso-Suárez R. A comparison of satellite cloud motion vectors techniques to forecast intra-day hourly solar global horizontal irradiation // *Solar Energy*. 2022. Vol. 233. Pp. 46–60.
21. Bedka K. Analysis and Automated Detection of Ice Crystal Icing Conditions Using Geostationary Satellite Datasets and In Situ Ice Water Content Measurements. SAE International, 2019.
22. Bedka K. Overshooting cloud top detections using MSG SEVIRI Infrared brightness temperatures and their relationship to severe weather over Europe // *Atmospheric Research*. 2011. Vol. 99. No. 2. Pp. 175–189.
23. Bedka K. Satellite Signatures Associated with Significant Convectively-Induced Turbulence Events // 13th Conference on Aviation, Range and Aerospace Meteorology. 2007. Pp. 226–227.
24. Bedka K., Brunner J., Dworak R., Feltz W., Otkin J., Greenwald T. Objective Satellite-Based Detection of Overshooting Tops Using Infrared Window Channel Brightness Temperature Gradients // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2010. Vol. 49. No. 2. Pp. 181–202.
25. Bedka K., Khlopenkov K. A Probabilistic Multispectral Pattern Recognition Method for Detection of Overshooting Cloud Tops Using Passive Satellite Imager Observations // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2016. Vol. 55. Pp. 1983–2005.
26. Berendes T. A., Mecikalski J. R., MacKenzie W. M., Bedka K. M., Nair U. S. Convective cloud identification and classification in daytime satellite imagery using standard deviation limited adaptive clustering // *Journal of Geophysical Research*. 2008. Vol. 113. No. D20.

27. Bergstra J., Bengio Y. Random Search for Hyper-Parameter Optimization // Journal of Machine Learning Research. 2012. Vol. 13 (February). Pp. 281–305.
28. Bouguet J.-Y. Pyramidal implementation of the Lucas Kanade feature tracker. Intel Corporation, Microprocessor Research Labs, 2000.
29. Bravin M. A Continuing Investigation of Diurnal and Location Trends in an Ice Crystal Icing Engine Event Database. SAE International, 2019.
30. Bravin M. An Investigation into Location and Convective Lifecycle Trends in an Ice Crystal Icing Engine Event Database. SAE International, 2015.
31. Brunner J. C., Ackerman S. A., Bachmeier A. S., Rabin R. M. A Quantitative Analysis of the Enhanced-V Feature in Relation to Severe Weather // Weather and Forecasting. 2007. Vol. 22. No. 4. Pp. 853–872.
32. Carvalho L. M. V. A Satellite Method to Identify Structural Properties of Mesoscale Convective Systems Based on the Maximum Spatial Correlation Tracking Technique (MASCOTTE) // Journal of Applied Meteorology. 2001. Vol. 40. No. 10. Pp. 1683–1701.
33. Defazio A., Bach F. SAGA: A Fast Incremental Gradient Method With Support for Non-Strongly Convex Composite Objectives // Advances in Neural Information Processing Systems. 2014. Vol. 2.
34. Defer E. An operational geostationary satellite data product for detecting high ice water content. 2017.
35. Defer E. Low orbiting space-borne high IWC retrievals in the framework of the European HAIC project: from case studies to regional and seasonal distributions. 2017.
36. Direction des Opérations M.-F. T. (MFT). Algorithm Theoretical Basis Document for the Convection Product Processors of the NWC/GEO. NWC SAF, 2019.
37. Direction des Opérations M.-F. T. (MFT). Algorithm Theoretical Basis Document for the Convection Product Processors of the NWC/GEO. NWC SAF, 2019. Pp. 268–279.

38. ESWD data format specification. Version 1.60 and 1.60-csv: Technical Report. European Severe Storms Laboratory, 2019-01. URL: <https://www.essl.org/media/publications/essl-report-2019-01.pdf>.
39. Fiolleau T. An Algorithm for the Detection and Tracking of Tropical Mesoscale Convective Systems Using Infrared Images From Geostationary Satellite // *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*. 2013. Vol. 51. Pp. 4302–4315.
40. Franklin C. N., Protat A., Leroy D., Fontaine E. Controls on phase composition and ice water content in a convection-permitting model simulation of a tropical mesoscale convective system // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2016. Vol. 16. No. 14. Pp. 8767–8789.
41. Fridlind A., Ackerman A., Grandin A., Dezitter F., Weber M., Strapp J., Korolev A., Williams C. High ice water content at low radar reflectivity near deep convection – Part 1: Consistency of in situ and remote-sensing observations with stratiform rain column simulations // *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*. 2015. Vol. 15. Pp. 16505–16550.
42. Friedman J. H. Stochastic gradient boosting // *Computational Statistics & Data Analysis*. 2002. Vol. 38. No. 4. Pp. 367–378.
43. Gonzalez R. C., Woods R. E. *Digital Image Processing*. 2nd ed. USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 2001.
44. Grzych M. L. Avoiding Convective Weather and Ice-Crystal Icing Engine Events // *AERO (Boeing Quarterly Publication)*. 2010. No. 39. Pp. 23–28.
45. Haggerty J. A., Rugg A., Potts R., Protat A., Strapp J. W., Ratvasky T., Bedka K., Grandin A. Development of a Method to Detect High Ice Water Content Environments Using Machine Learning // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2020. Vol. 37. No. 4. Pp. 641–663.
46. Han D. A Novel Framework of Detecting Convective Initiation Combining Automated Sampling, Machine Learning, and Repeated Model Tuning from Geostationary Satellite Data // *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11. P. 1454.

47. Han H. Detection of Convective Initiation Using Meteorological Imager Onboard Communication, Ocean, and Meteorological Satellite Based on Machine Learning Approaches // *Remote Sensing*. 2015. Vol. 7. Pp. 9184–9204.
48. Hasler A. F., Shenk W. E., Skillman W. C. Wind Estimates from Cloud Motions: Results from Phases I, II and III of an In Situ Aircraft Verification Experiment // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 1977. Vol. 16. No. 8. Pp. 812–815.
49. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. *The Elements of Statistical Learning*: Springer Series in Statistics. New York, NY, USA: Springer New York Inc., 2001.
50. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. *The Elements of Statistical Learning*: Springer Series in Statistics. Springer New York Inc, 2001. Pp. 129–248.
51. Hoinka K. P. Statistics of the Global Tropopause Pressure // *Monthly Weather Review*. 1998. Vol. 126. No. 12. Pp. 3303–3325.
52. Holmlund K. The Utilization of Statistical Properties of Satellite-Derived Atmospheric Motion Vectors to Derive Quality Indicators // *Weather Forecasting*. 1998. Vol. 13. Pp. 1093–1104.
53. Homeyer C. R., Pan L. L., Dorsi S. W., Avallone L. M., Weinheimer A. J., O'Brien A. S., DiGangi J. P., Zondlo M. A., Ryerson T. B., Diskin G. S., Campos T. L. Convective transport of water vapor into the lower stratosphere observed during double-tropopause events // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2014. Vol. 119. No. 18. Pp. 10,941–10,958.
54. Hu M.-K. Visual pattern recognition by moment invariants // *IRE Transactions on Information Theory*. 1962. Vol. 8. No. 2. Pp. 179–187.
55. Hu Y., McFarquhar G. M. Dependence of Ice Microphysical Properties On Environmental Parameters: Results from HAIC-HIWC Cayenne Field Campaign // *Journal of Atmospheric Science*. 2021. No. 78. Pp. 2957–2981. DOI: 10.1175/JAS-D-21-0015.1.
56. Huang Y., Wu W., McFarquhar G. M., Wang X., Morrison H., Ryzhkov A., Hu Y., Wolde M., Nguyen C., Schwarzenboeck A., Milbrandt J., Korolev A. V., Heckman I. Microphysical processes producing high ice water contents (HIWCs) in tropical

- convective clouds during the HAIC-HIWC field campaign: Evaluation of simulations using bulk microphysical schemes // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2021. Vol. 21. No. 9. Pp. 6919–6944.
57. Jewett C. Adjusting thresholds of satellite-based convective initiation interest fields based on the cloud environment // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2013. Vol. 118. No 22. Pp. 649–660.
 58. Ke G., Meng Q. LightGBM: A Highly Efficient Gradient Boosting Decision Tree // *Advances in Neural Information Processing Systems*. Под редакцией I. Guyon и др. Curran Associates, Inc., 2017. Vol. 30.
 59. King G., Zeng L. Logistic Regression in Rare Events Data // *Political Analysis*. 2001. Vol. 9. No. 2. Pp. 137–163.
 60. Korolev A., Qu Z. High Ice Water Content in Tropical Mesoscale Convective Systems (a Conceptual Model) // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2024. [В печати].
 61. Lawson R. P., Angus L. J., Heymsfield A. J. Cloud Particle Measurements in Thunderstorm Anvils and Possible Weather Threat to Aviation // *Journal of Aircraft*. 1998. Vol. 35. No. 1. Pp. 113–121.
 62. Lee S., Han H. Detection of Deterministic and Probabilistic Convection Initiation Using Himawari-8 Advanced Himawari Imager Data // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2017. Vol. 10. Pp. 1859–1874.
 63. Leroy D., Fontaine E., Schwarzenboeck A., Strapp J., Korolev A., McFarquhar G., Dupuy R., Gourbeyre C., Lilie L., Protat A. Ice Crystal Sizes in High Ice Water Content Clouds. Part II: Statistics of Mass Diameter Percentiles in Tropical Convection Observed During the HAIC/HIWC Project // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2017. Vol. 34. Pp. 117–136.
 64. Lucas B. D., Kanade T. An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision // *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence*. 1981. Vol. 2. Pp. 674–679.

65. Maddox R. Mesoscale Convective Complexes (USA) // Bulletin, American Meteorological Society. 1980. Vol. 61. Pp. 1374–1387.
66. Maini A., Agrawal V. Satellite Technology Principles and Applications. 2nd ed. John Wiley & Sons, 2011.
67. Martin D. W., Kohrs R. A., Mosher F. R., Medaglia C. M., Adamo C. Over-Ocean Validation of the Global Convective Diagnostic // Journal of Applied Meteorology and Climatology. 2008. Vol. 47. No. 2. Pp. 525–543.
68. Mason J. The Ice Particle Threat to Engines in Flight // American Institute of Aeronautics; Astronautics. 2006.
69. Mathee R. Geostationary Infrared Methods for Detecting Lightning-Producing Cumulonimbus Clouds // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2013. Vol. 118. No. 12. Pp. 6580–6592.
70. Mecikalski J. R. Cloud-Top Properties of Growing Cumulus Prior to Convective Initiation as Measured by Meteosat Second Generation. Part I: Infrared Fields // Journal of Applied Meteorology and Climatology. 2010. Vol. 49. No. 3. Pp. 521–534.
71. Mecikalski J. R. Probabilistic 0–1-h Convective Initiation Nowcasts that Combine Geostationary Satellite Observations and Numerical Weather Prediction Model Data // Journal of Applied Meteorology and Climatology. 2015. Vol. 54. Pp. 150–161.
72. Mecikalski J. R., Williams J. Probabilistic 0–1-h Convective Initiation Nowcasts that Combine Geostationary Satellite Observations and Numerical Weather Prediction Model Data // Journal of Applied Meteorology and Climatology. 2015. Vol. 54. Pp. 150–161.
73. Moisselin J.-M. The use of rapidly developing thunderstorm (RDT) in the High Altitude Ice-Crystals (HAIC) project. 2017.
74. Negri A. J. Cloud-top Structure of Tornadic Storms on 10 April 1979 from Rapid Scan and Stereo Satellite Observations // Bulletin of the American Meteorological Society. 1982. Vol. 63. No. 10. Pp. 1151–1159.
75. OGC Cloud Optimized GeoTIFF Standard 1.0. Open Geospatial Consortium, 2023-07-14. URL: <http://www.opengis.net/doc/is/COG/1.0>.

76. Proctor F. High Ice Water Concentrations in the 19 August 2015 Coastal Mesoconvective System. American Institute of Aeronautics; Astronautics, 2017.
77. Protat A., Delanoë J., Strapp J. W. et al. The Measured Relationship between Ice Water Content and Cloud Radar Reflectivity in Tropical Convective Clouds // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2016. Vol. 55. No. 8. Pp. 1707–1729.
78. Qu Z., Barker H. W., Korolev A. V. et al. Evaluation of a high-resolution numerical weather prediction models simulated clouds using observations from CloudSat, GOES-13 and in situ aircraft // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2018. Vol. 144. No. 715. Pp. 1681–1694.
79. Ramanathan V. A Lagrangian Approach for Deriving Cloud Characteristics from Satellite Observations and Its Implication to Cloud Parameterization // *Journal of Geophysical Research*. 1997. Vol. 1022.
80. Rädler A. T., Groenemeijer P., Faust E., Sausen R., Púčik T. Frequency of severe thunderstorms across Europe expected to increase in the 21st century due to rising instability // *npj Climate and Atmospheric Science*. 2019. Vol. 2. No. 30.
81. Salembier P. Morphological operators for image and video compression // *IEEE Transactions on Image Processing*. 1996. Vol. 5. Pp. 881–898.
82. Setvák M., Lindsey D. T., Rabin R. M., Wang P. K., Demeterová A. Indication of water vapor transport into the lower stratosphere above midlatitude convective storms: Meteosat Second Generation satellite observations and radiative transfer model simulations // *Atmospheric Research*. 2008. Vol. 89. No. 1. Pp. 170–180.
83. Setvák M., Rabin R. M., Wang P. K. Contribution of the MODIS instrument to observations of deep convective storms and stratospheric moisture detection in GOES and MSG imagery // *Atmospheric Research*. 2007. Vol. 83. No. 2–4. Pp. 505–518.
84. Shi J., Tomasi C. Good Features to Track // *9th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 1994. Pp. 593–600.
85. Shukla B. P. A Source Apportionment Approach to Study the Evolution of Convective Cells: An Application to the Nowcasting of Convective Weather Systems

- // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2012. Vol. 5. No. 1. Pp. 242–247.
86. Shwartz-Ziv R., Armon A. Tabular data: Deep learning is not all you need // Information Fusion. 2022. Vol. 81. Pp. 84–90.
 87. Stanford M. W., Varble A., Zipser E. et al. A ubiquitous ice size bias in simulations of tropical deep convection // Atmospheric Chemistry and Physics. 2017. Vol. 17. No. 15. Pp. 9599–9621.
 88. Strabala K. Cloud properties inferred from 8–12 μm data // Journal of Applied Meteorology. 1994. Vol. 33. Pp. 212–229.
 89. Strapp J. The High Ice Water Content Study of Deep Convective Clouds: Report on Science and Technical Plan. 2016.
 90. Suzuki S. Topological Structural Analysis of Digital Images by Border Following. 1984. Vol. 30.
 91. Thomas C. Data Assimilation for Convective-Cell Tracking on Meteorological Image Sequences // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2010. Vol. 48. Pp. 3162–3177.
 92. Tischio R. M., Weiss G. M. Identifying Classification Algorithms Most Suitable for Imbalanced Data. 2019.
 93. W.M.O. Meteorology—A three-dimensional science // WMO Bulletin. 1961. Vol. 6. No. 4. Pp. 126–167.
 94. Wiens K. C., Rutledge S. A., Tessendorf S. A. The 29 June 2000 Supercell Observed during STEPS. Part II: Lightning and Charge Structure // Journal of the Atmospheric Sciences. 2005. Vol. 62. No. 12. Pp. 4151–4177.
 95. Yost C., Bedka K., Minnis P. et al. A Prototype Method for Diagnosing High Ice Water Content Probability Using Satellite Imager Data // Atmospheric Measurement Techniques. 2018. Vol. 11. Pp. 1615–1637.
 96. Youden W. Index for rating diagnostic tests // Cancer. 1950. Vol. 3. Pp. 32–35.

97. Zinner T. Cb-TRAM: Tracking and monitoring severe convection from onset over rapid development to mature phase using multi-channel Meteosat-8 SEVIRI data // Meteorology and Atmospheric Physics. 2008. Vol. 101. Pp. 191–210.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Рисунок 1. Схема работы системы мониторинга ОГК

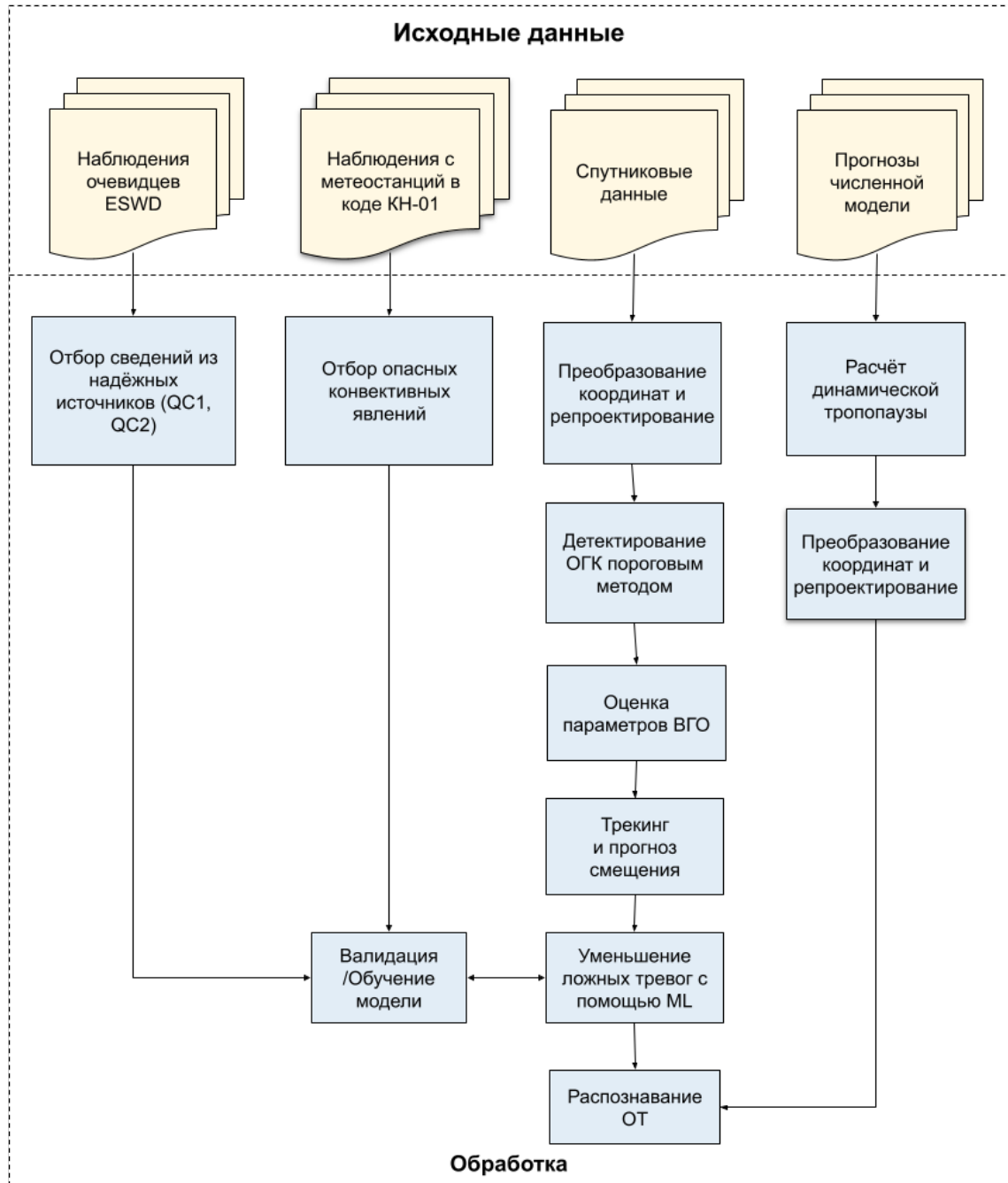


Таблица 1. Описание обработчиков в составе Системы мониторинга облачности глубокой конвекции (СМОГК)

Код обработчика	Исходные данные	Выходные данные	Шаг по времени	Разрешение
MeteosatProcessor	Измерения спутника Meteosat-11 MSG SEVIRI	Карты в веб-интерфейсе, информация об объектах ОГК	5-60 мин	3-5 км
HrvProcessor	Видимый канал высокого разрешения Meteosat-11 MSG SEVIRI	Карты в веб-интерфейсе	15 мин	1 км
ElectroArktikaProcessor	Измерения в ИК диапазоне спутников Электро-Л №2-4 и Арктика-М №1 (монтаж)	Карты в веб-интерфейсе	15 мин	4 км
ElectroArktikaHrvProcessor	Измерения в видимом диапазоне высокого разрешения спутников Электро-Л №2-4 и Арктика-М №1 (монтаж)	Карты в веб-интерфейсе	15 мин	1 км
SynopProcessor	Данные метеорологических станций в формате кодов SYNOP	Векторная графика для карт в веб-интерфейсе	1 час	-
CosmoHmcDbProcessor	Прогностические поля модели COSMO 6,6: ветер, температура, геопотенциал	Векторная графика для карт в веб-интерфейсе	3 часа	6,6 км
CloudTopGribProcessor	Прогностические поля модели COSMO 6,6	Карты в веб-интерфейсе, векторная графика для карт в веб-интерфейсе	1 час	6,6 км
MetarHmcDbProcessor	Синоптические сводки в формате METAR	Векторная графика для карт в веб-интерфейсе	30 мин	-
WarepHmcDbProcessor	Синоптические сводки из БД WAREP	Векторная графика для карт в веб-интерфейсе	30 мин	-
RadarProcessor	Радарные данные ДМРЛ-С	Векторная графика для карт в веб-интерфейсе	10 мин	
HimawariProcessor	Измерения в ИК-диапазоне спутника Himawari-8	Карты в веб-интерфейсе	10 мин	

Таблица 2. Описание статических параметров верхней границы облака, используемых при обучении моделей машинного обучения

№	Код	Описание/Интерпретация	Канал для расчёта
1	IR_108_200_0_205_0	Количество пикселей с температурой от 200 до 205 К	ИК 10,8
2	IR_108_205_0_210_0	Количество пикселей с температурой от 205 до 210 К	ИК 10,8
3	IR_108_210_0_215_0	Количество пикселей с температурой от 210 до 215 К	ИК 10,8
4	IR_108_215_0_220_0	Количество пикселей с температурой от 215 до 220 К	ИК 10,8
5	IR_108_220_0_225_0	Количество пикселей с температурой от 220 до 225 К	ИК 10,8
6	IR_108_225_0_230_0	Количество пикселей с температурой от 225 до 230 К	ИК 10,8
7	IR_108_230_0_235_0	Количество пикселей с температурой от 230 до 235 К	ИК 10,8
8	IR_108_235_0_240_0	Количество пикселей с температурой от 235 до 240 К	ИК 10,8
9	WV_062_mns_IR_108_mns10_0_mns5_0	Количество пикселей с разностью температуры в двух каналах от -10 до -5 К	ИК 6,2 - ИК 10,8
10	WV_062_mns_IR_108_mns5_0_0_0	Количество пикселей с разностью температуры в двух каналах от -5 до 0 К	ИК 6,2 - ИК 10,8
11	WV_062_mns_IR_108_0_0_5_0	Количество пикселей с разностью температуры в двух каналах от 0 до 5 К	ИК 6,2 - ИК 10,8
12	WV_062_mns_IR_108_5_0_10_0	Количество пикселей с разностью температуры в двух каналах от 5 до 10 К	ИК 6,2 - ИК 10,8
13	WV_062_mns_WV_073_mns10_0_mns5_0	Количество пикселей с разностью температуры в двух каналах от -10 до -5 К	ИК 6,2 - ИК 7,3
14	WV_062_mns_WV_073_mns5_0_0_0	Количество пикселей с разностью температуры в двух каналах от -5 до 0 К	ИК 6,2 - ИК 7,3
15	WV_062_mns_WV_073_0_0_5_0	Количество пикселей с разностью температуры в двух каналах от 0 до 5 К	ИК 6,2 - ИК 7,3
16	WV_062_mns_WV_073_5_0_10_0	Количество пикселей с разностью температуры в двух каналах от 5 до 10 К	ИК 6,2 - ИК 7,3
17	WV_062_200_0_205_0	Количество пикселей с температурой от 200 до 205 К	ИК 6,2
18	WV_062_205_0_210_0	Количество пикселей с температурой от 205 до 210 К	ИК 6,2
19	WV_062_210_0_215_0	Количество пикселей с температурой от 210 до 215 К	ИК 6,2
20	WV_062_215_0_220_0	Количество пикселей с температурой от 215 до 220 К	ИК 6,2
21	WV_062_220_0_225_0	Количество пикселей с температурой от 220 до 225 К	ИК 6,2
22	WV_062_225_0_230_0	Количество пикселей с температурой от 225 до 230 К	ИК 6,2
23	WV_062_230_0_235_0	Количество пикселей с температурой от 230 до 235 К	ИК 6,2
24	WV_062_235_0_240_0	Количество пикселей с температурой от 235 до 240 К	ИК 6,2
25	area	Площадь ВГО (кв. км)	ИК 10,8

26	el_angle	Угол наклона большей оси описывающего эллипса относительно оси X	ИК 10,8
27	el_axis_ratio	Отношение меньшей оси описывающего эллипса к большей	ИК 10,8
28	el_ecc	Эксцентриситет описывающего эллипса	ИК 10,8
29	el_major	Длина большей оси описывающего эллипса (км)	ИК 10,8
30	hu_1	Момент Хью 1-го порядка	ИК 10,8
31	hu_2	Момент Хью 2-го порядка	ИК 10,8
32	hu_3	Момент Хью 3-го порядка	ИК 10,8
33	hu_4	Момент Хью 4-го порядка	ИК 10,8
34	hu_5	Момент Хью 5-го порядка	ИК 10,8
35	hu_6	Момент Хью 6-го порядка	ИК 10,8
36	hu_7	Момент Хью 7-го порядка	ИК 10,8
37	solidity	Показатель выпуклости контура ВГО (от 0 до 1)	ИК 10,8
38	t_avg_IR_108	Средняя температура ВГО в диапазоне ИК	ИК 10,8
39	t_avg_WV_062	Средняя температура ВГО в диапазоне ИК	ИК 6,2
40	t_avg_WV_062_mns_IR_108	Средняя разность температуры ВГО в двух диапазонах ИК	ИК 6,2 - ИК 10,8
41	t_avg_WV_062_mns_WV_073	Средняя разность температуры ВГО в двух диапазонах ИК	ИК 6,2 - ИК 7,3
42	t_max_IR_108	Максимальная температура ВГО в диапазоне ИК	ИК 10,8
43	t_max_WV_062	Максимальная температура ВГО в диапазоне ИК	ИК 6,2
44	t_max_WV_062_mns_IR_108	Максимальная разность температуры ВГО в двух диапазонах ИК	ИК 6,2 - ИК 10,8
45	t_max_WV_062_mns_WV_073	Максимальная разность температуры ВГО в двух диапазонах ИК	ИК 6,2 - ИК 7,3
46	t_min_IR_108	Минимальная температура ВГО в диапазоне ИК	ИК 10,8
47	t_min_WV_062	Минимальная температура ВГО в диапазоне ИК	ИК 6,2
48	t_min_WV_062_mns_IR_108	Минимальная разность температуры ВГО в двух диапазонах ИК	ИК 6,2 - ИК 10,8
49	t_min_WV_062_mns_WV_073	Минимальная разность температуры ВГО в двух диапазонах ИК	ИК 6,2 - ИК 7,3
50	t_std_IR_108	Ср. кв. отклонение температуры ВГО в диапазоне ИК	ИК 10,8
51	t_std_WV_062	Ср. кв. отклонение температуры ВГО в диапазоне ИК	ИК 6,2
52	t_std_WV_062_mns_IR_108	Ср. кв. отклонение разности температуры ВГО в двух диапазонах ИК	ИК 6,2 - ИК 10,8
53	t_std_WV_062_mns_WV_073	Ср. кв. отклонение разности температуры ВГО в двух диапазонах ИК	ИК 6,2 - ИК 7,3

Таблица 3. Описание динамических параметров верхней границы облака, используемых при обучении моделей машинного обучения

№	Код	Описание/Интерпретация	Канал для расчёта
54	time_since_birth	Продолжительность жизни на момент наблюдения (мин)	-
55	t_avg_IR_108_chg_15	Прирост средней температуры ВГО в диапазоне ИК за 15 минут (К)	ИК 10,8
56	t_avg_WV_062_chg_15	Прирост средней температуры ВГО в диапазоне ИК за 15 минут (К)	ИК 6,2
57	t_avg_WV_062_mns_IR_108_chg_15	Прирост средней разности температуры ВГО в двух диапазонах ИК за 15 минут (К)	ИК 6,2 - ИК 10,8
58	t_avg_WV_062_mns_WV_073_chg_15	Прирост средней разности температуры ВГО в двух диапазонах ИК за 15 минут (К)	ИК 6,2 - ИК 7,3
59	t_max_IR_108_chg_15	Прирост максимальной температуры ВГО в диапазоне ИК за 15 минут (К)	ИК 10,8
60	t_max_WV_062_chg_15	Прирост максимальной температуры ВГО в диапазоне ИК за 15 минут (К)	ИК 6,2
61	t_max_WV_062_mns_IR_108_chg_15	Прирост максимальной разности температуры ВГО в двух диапазонах ИК за 15 минут (К)	ИК 6,2 - ИК 10,8
62	t_max_WV_062_mns_WV_073_chg_15	Прирост максимальной разности температуры ВГО в двух диапазонах ИК за 15 минут (К)	ИК 6,2 - ИК 7,3
63	t_min_IR_108_chg_15	Прирост минимальной температуры ВГО в диапазоне ИК за 15 минут (К)	ИК 10,8
64	t_min_WV_062_chg_15	Прирост минимальной температуры ВГО в диапазоне ИК за 15 минут (К)	ИК 6,2
65	t_min_WV_062_mns_IR_108_chg_15	Прирост минимальной разности температуры ВГО в двух диапазонах ИК за 15 минут (К)	ИК 6,2 - ИК 10,8
66	t_min_WV_062_mns_WV_073_chg_15	Прирост минимальной разности температуры ВГО в двух диапазонах ИК за 15 минут (К)	ИК 6,2 - ИК 7,3
67	t_std_IR_108_chg_15	Прирост ср. кв. отклонения температуры ВГО в диапазоне ИК за 15 минут (К)	ИК 10,8
68	t_std_WV_062_chg_15	Прирост ср. кв. отклонения температуры ВГО в диапазоне ИК за 15 минут (К)	ИК 6,2
69	t_std_WV_062_mns_IR_108_chg_15	Прирост ср. кв. отклонения разности температуры ВГО в двух диапазонах ИК за 15 минут (К)	ИК 6,2 - ИК 10,8
70	t_std_WV_062_mns_WV_073_chg_15	Прирост ср. кв. отклонения разности температуры ВГО в двух диапазонах ИК за 15 минут (К)	ИК 6,2 - ИК 7,3
71	t_avg_IR_108_chg_30	Прирост средней температуры ВГО в диапазоне ИК за 30 минут (К)	ИК 10,8
72	t_avg_WV_062_chg_30	Прирост средней температуры ВГО в диапазоне ИК за 30 минут (К)	ИК 6,2
73	t_avg_WV_062_mns_IR_108_chg_30	Прирост средней разности температуры ВГО в двух диапазонах ИК за 30 минут (К)	ИК 6,2 - ИК 10,8
74	t_avg_WV_062_mns_WV_073_chg_30	Прирост средней разности температуры ВГО в двух диапазонах ИК за 30 минут (К)	ИК 6,2 - ИК 7,3
75	t_max_IR_108_chg_30	Прирост максимальной температуры ВГО в диапазоне ИК за 30 минут (К)	ИК 10,8
76	t_max_WV_062_chg_30	Прирост максимальной температуры ВГО в диапазоне ИК за 30 минут (К)	ИК 6,2

77	t_max_WV_062_mns_IR_108_chg_30	Прирост максимальной разности температуры ВГО в двух диапазонах ИК за 30 минут (К)	ИК 6,2 - ИК 10,8
78	t_max_WV_062_mns_WV_073_chg_30	Прирост максимальной разности температуры ВГО в двух диапазонах ИК за 30 минут (К)	ИК 6,2 - ИК 7,3
79	t_min_IR_108_chg_30	Прирост минимальной температуры ВГО в диапазоне ИК за 30 минут (К)	ИК 10,8
80	t_min_WV_062_chg_30	Прирост минимальной температуры ВГО в диапазоне ИК за 30 минут (К)	ИК 6,2
81	t_min_WV_062_mns_IR_108_chg_30	Прирост минимальной разности температуры ВГО в двух диапазонах ИК за 30 минут (К)	ИК 6,2 - ИК 10,8
82	t_min_WV_062_mns_WV_073_chg_30	Прирост минимальной разности температуры ВГО в двух диапазонах ИК за 30 минут (К)	ИК 6,2 - ИК 7,3
83	t_std_IR_108_chg_30	Прирост ср. кв. отклонения температуры ВГО в диапазоне ИК за 30 минут (К)	ИК 10,8
84	t_std_WV_062_chg_30	Прирост ср. кв. отклонения температуры ВГО в диапазоне ИК за 30 минут (К)	ИК 6,2
85	t_std_WV_062_mns_IR_108_chg_30	Прирост ср. кв. отклонения разности температуры ВГО в двух диапазонах ИК за 30 минут (К)	ИК 6,2 - ИК 10,8
86	t_std_WV_062_mns_WV_073_chg_30	Прирост ср. кв. отклонения разности температуры ВГО в двух диапазонах ИК за 30 минут (К)	ИК 6,2 - ИК 7,3
87	t_avg_IR_108_chg_60	Прирост средней температуры ВГО в диапазоне ИК за 60 минут (К)	ИК 10,8
88	t_avg_WV_062_chg_60	Прирост средней температуры ВГО в диапазоне ИК за 60 минут (К)	ИК 6,2
89	t_avg_WV_062_mns_IR_108_chg_60	Прирост средней разности температуры ВГО в двух диапазонах ИК за 60 минут (К)	ИК 6,2 - ИК 10,8
90	t_avg_WV_062_mns_WV_073_chg_60	Прирост средней разности температуры ВГО в двух диапазонах ИК за 60 минут (К)	ИК 6,2 - ИК 7,3
91	t_max_IR_108_chg_60	Прирост максимальной температуры ВГО в диапазоне ИК за 60 минут (К)	ИК 10,8
92	t_max_WV_062_chg_60	Прирост максимальной температуры ВГО в диапазоне ИК за 60 минут (К)	ИК 6,2
93	t_max_WV_062_mns_IR_108_chg_60	Прирост максимальной разности температуры ВГО в двух диапазонах ИК за 60 минут (К)	ИК 6,2 - ИК 10,8
94	t_max_WV_062_mns_WV_073_chg_60	Прирост максимальной разности температуры ВГО в двух диапазонах ИК за 60 минут (К)	ИК 6,2 - ИК 7,3
95	t_min_IR_108_chg_60	Прирост минимальной температуры ВГО в диапазоне ИК за 60 минут (К)	ИК 10,8
96	t_min_WV_062_chg_60	Прирост минимальной температуры ВГО в диапазоне ИК за 60 минут (К)	ИК 6,2
97	t_min_WV_062_mns_IR_108_chg_60	Прирост минимальной разности температуры ВГО в двух диапазонах ИК за 60 минут (К)	ИК 6,2 - ИК 10,8
98	t_min_WV_062_mns_WV_073_chg_60	Прирост минимальной разности температуры ВГО в двух диапазонах ИК за 60 минут (К)	ИК 6,2 - ИК 7,3
99	t_std_IR_108_chg_60	Прирост ср. кв. отклонения температуры ВГО в диапазоне ИК за 60 минут (К)	ИК 10,8
100	t_std_WV_062_chg_60	Прирост ср. кв. отклонения температуры ВГО в диапазоне ИК за 60 минут (К)	ИК 6,2
101	t_std_WV_062_mns_IR_108_chg_60	Прирост ср. кв. отклонения разности температуры ВГО в двух диапазонах ИК за 60 минут (К)	ИК 6,2 - ИК 10,8

102	t_std_WV_062_mns_WV_073_chg_60	Прирост ср. кв. отклонения разности температуры ВГО в двух диапазонах ИК за 60 минут (К)	ИК 6,2 - ИК 7,3
103	area_prc_chg_15	Прирост площади ВГО за 15 минут (кв. км)	ИК 10,8
104	area_prc_chg_30	Прирост площади ВГО за 30 минут (кв. км)	ИК 10,8
105	area_prc_chg_60	Прирост площади ВГО за 60 минут (кв. км)	ИК 10,8
106	t_avg_IR_108_chg_15_avg	Средний 15-минутный прирост средней температуры ВГО в диапазоне ИК	ИК 10,8
107	t_avg_WV_062_chg_15_avg	Средний 15-минутный прирост средней температуры ВГО в диапазоне ИК за 15 минут (К)	ИК 6,2
108	t_avg_WV_062_mns_IR_108_chg_15_avg	Средний 15-минутный прирост средней разности температуры ВГО в двух диапазонах ИК за 15 минут (К)	ИК 6,2 - ИК 10,8
109	t_avg_WV_062_mns_WV_073_chg_15_avg	Средний 15-минутный прирост средней разности температуры ВГО в двух диапазонах ИК за 15 минут (К)	ИК 6,2 - ИК 7,3
110	t_max_IR_108_chg_15_avg	Средний 15-минутный прирост максимальной температуры ВГО в диапазоне ИК за 15 минут (К)	ИК 10,8
111	t_max_WV_062_chg_15_avg	Средний 15-минутный прирост максимальной температуры ВГО в диапазоне ИК за 15 минут (К)	ИК 6,2
112	t_max_WV_062_mns_IR_108_chg_15_avg	Средний 15-минутный прирост максимальной разности температуры ВГО в двух диапазонах ИК за 15 минут (К)	ИК 6,2 - ИК 10,8
113	t_max_WV_062_mns_WV_073_chg_15_avg	Средний 15-минутный прирост максимальной разности температуры ВГО в двух диапазонах ИК за 15 минут (К)	ИК 6,2 - ИК 7,3
114	t_min_IR_108_chg_15_avg	Средний 15-минутный прирост минимальной температуры ВГО в диапазоне ИК за 15 минут (К)	ИК 10,8
115	t_min_WV_062_chg_15_avg	Средний 15-минутный прирост минимальной температуры ВГО в диапазоне ИК за 15 минут (К)	ИК 6,2
116	t_min_WV_062_mns_IR_108_chg_15_avg	Средний 15-минутный прирост минимальной разности температуры ВГО в двух диапазонах ИК за 15 минут (К)	ИК 6,2 - ИК 10,8
117	t_min_WV_062_mns_WV_073_chg_15_avg	Средний 15-минутный прирост минимальной разности температуры ВГО в двух диапазонах ИК за 15 минут (К)	ИК 6,2 - ИК 7,3
118	t_std_IR_108_chg_15_avg	Средний 15-минутный прирост ср. кв. отклонения температуры ВГО в диапазоне ИК за 15 минут (К)	ИК 10,8
119	t_std_WV_062_chg_15_avg	Средний 15-минутный прирост ср. кв. отклонения температуры ВГО в диапазоне ИК за 15 минут (К)	ИК 6,2
120	t_std_WV_062_mns_IR_108_chg_15_avg	Средний 15-минутный прирост ср. кв. отклонения разности температуры ВГО в двух диапазонах ИК за 15 минут (К)	ИК 6,2 - ИК 10,8
121	t_std_WV_062_mns_WV_073_chg_15_avg	Средний 15-минутный прирост ср. кв. отклонения разности температуры ВГО в двух диапазонах ИК за 15 минут (К)	ИК 6,2 - ИК 7,3
122	area_prc_chg_15_avg	Средний 15-минутный прирост площади ВГО (%)	ИК 10,8

Таблица 4. Описание исходной выборки с учетом повторяемости случаев
ОГК (как объектов), размера и продолжительности жизни

Продолжительность (часы)	Размер (кв. км)	Количество объектов	Кол-во ОГКс	Доля ОГКс (%)
< 1	0-25	3 092 084	4 158	0,13
	25-80	2 319 257	3 724	0,16
	80-310	2 915 293	7 409	0,25
	310-700	1 196 588	5 293	0,44
	700-100000	1 012 924	9 633	0,95
	100000-200000	77	7	9,09
	> 200000	6	0	0,00
	Итого	10 536 229	30 224	0,29
1-6	0-25	634	3	0,47
	25-80	1 732	5	0,29
	80-310	5 526	69	1,25
	310-700	16 374	417	2,55
	700-100000	112 215	14 114	12,58
	100000-200000	130	48	36,92
	> 200000	21	5	23,81
	Итого	136 632	14 661	10,73
6-12	80-310	1	0	0,00
	310-700	12	0	0,00
	700-100000	8 114	3 481	42,90
	100000-200000	352	231	65,62
	> 200000	53	31	58,49
	Итого	8 532	3 743	43,87
12-24	700-100000	1 383	752	54,37
	100000-200000	305	246	80,66
	> 200000	100	72	72,00
	Итого	1 788	1 070	59,84
24+	700-100000	97	55	56,70
	100000-200000	48	38	79,17
	> 200000	30	23	76,67
	Итого	175	116	66,29
	Итого	10 683 356	49 814	0,47