



Условия, благоприятные для обледенения двигателей самолётов при полётах над верхней границей кучево-дождевой облачности

Шишов А.Е.,
Горлач И.А.,
Гидрометцентр России

XXII Конференция “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из
космоса”

Москва, 11-15 ноября 2024 г.

Обледенение двигателей в кристаллической части мощной (глубокой) конвективной облачности

Чаще всего наблюдалось при следующих условиях:

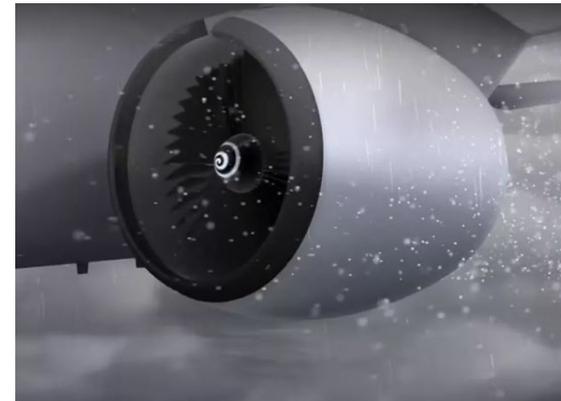
- 1. Большие высоты (8-12 км);**
- 2. Низкие температуры (от -37°C до -55°);**
- 3. Полеты вблизи облачности глубокой конвекции;**
- 4. Интенсивность турбулентности — слабая-умеренная градация;**
- 5. Таяние ледяных кристаллов при столкновении с лобовым стеклом;**
- 6. Отсутствие сильного обледенения корпуса;**
- 7. Радарная отражаемость (на борту самолета) - ниже пороговых величин ($<14-20$ dBz).**

Актуальность

Обледенение двигателей (ice crystal icing) приводит к:

- угрозе жизни экипажа, пассажиров.
- риску больших убытков авиакомпаний вследствие авиакатастроф;
- высокой стоимости ремонта повреждённых двигателей.

Известно > 170 случаев с 1990 г.



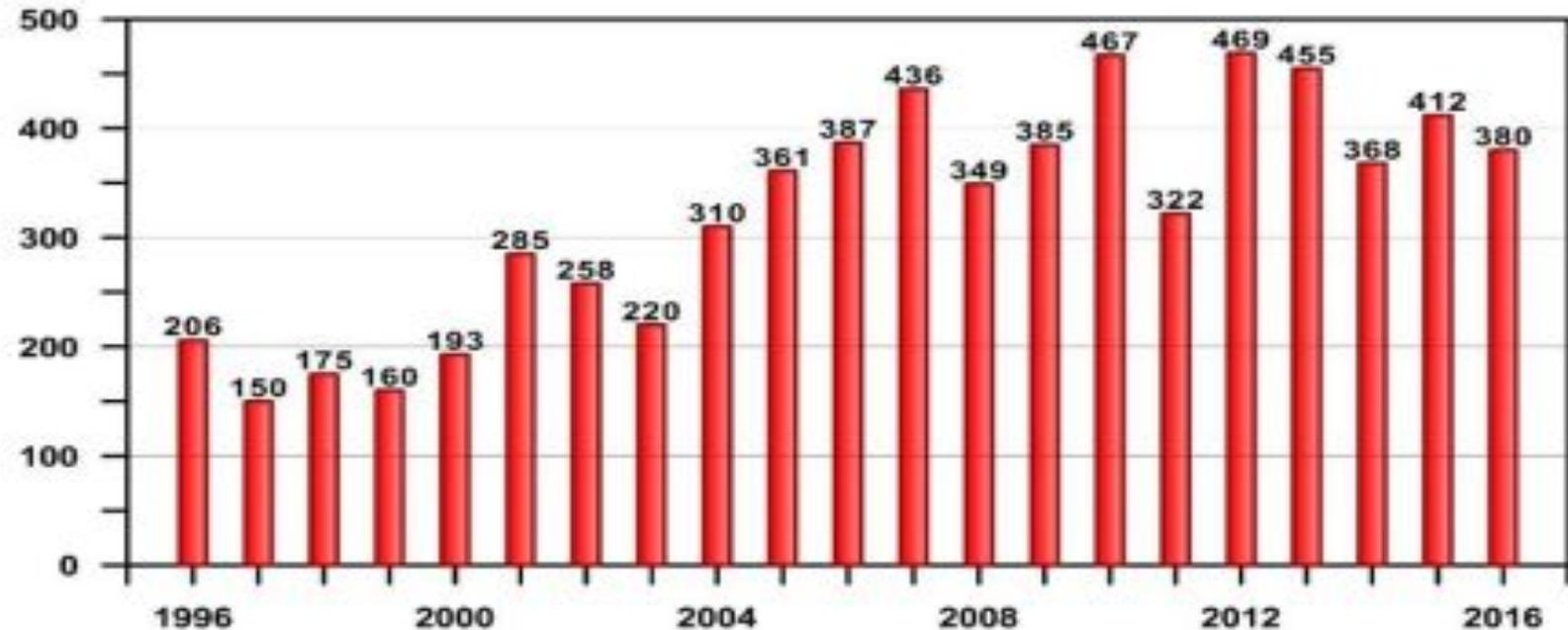
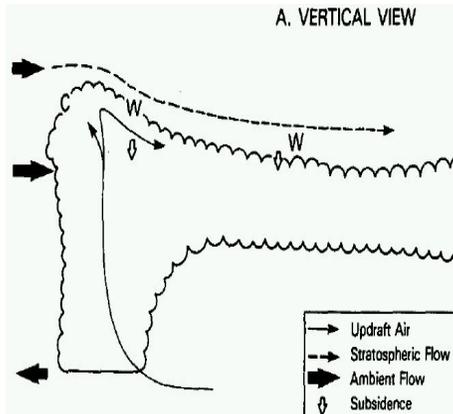
Необходимость полётов вблизи мощной кучево-дождевой облачности. МКК, МКС и повышения высот полетов над ВГО обусловлена:

1. Расширением географии полётов;
2. Повышением плотности трафика полётов;
3. Бурным развитием авиационной техники.



Актуальность

Рост повторяемости опасных явлений и усиление конвективных процессов в атмосфере



(Акентьева Е. М. , Александров Е. И. и др. **Доклад о Климатических рисках на территории Российской Федерации – Климатический центр Росгидромета, Санкт-Петербург, 2017, 106 с.**)

Наблюдается тенденция роста рисков обледенения воздушных судов.

Актуальность

Повышение временного и пространственного разрешения измерений геостационарных спутников

Исходные данные	Шаг по времени	Пространственное разрешение
Измерения спутника Meteosat-11 MSG SEVIRI	5-60 мин	3-5 км
Видимый канал высокого разрешения Meteosat-11 MSG SEVIRI	15 мин	1 км
Измерения в ИК диапазоне спутников Электро-Л №2-4 и Арктика-М №1 (монтаж)	15 мин	4 км
Измерения в видимом диапазоне высокого разрешения спутников Электро-Л №2-4 и Арктика-М №1 (монтаж)	15 мин	1 км
Измерения в ИК-диапазоне спутника Himawari-8	10 мин	3-5 км

Спутниковые данные покрывают всю территорию РФ и доступны круглые сутки

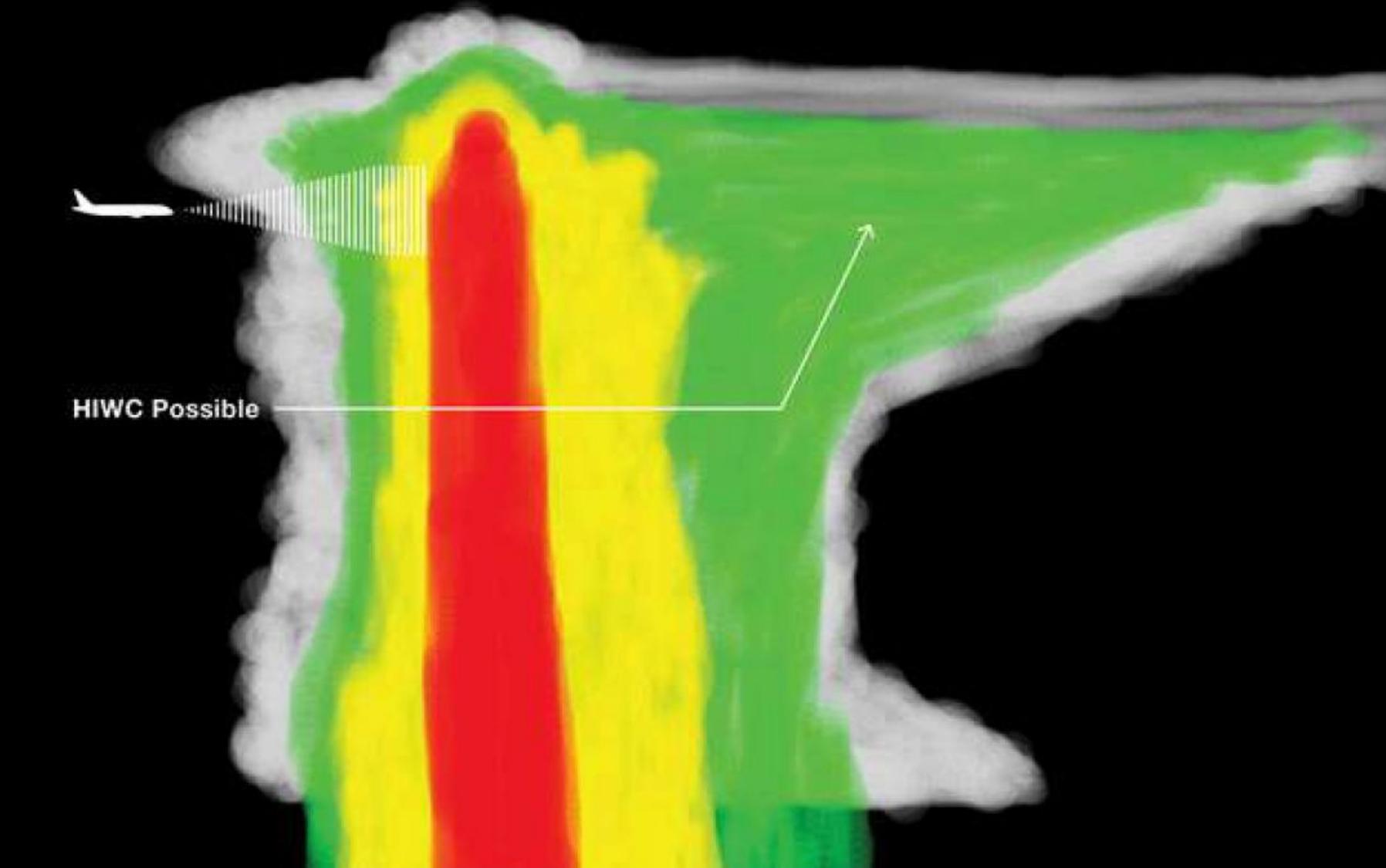
Пути решения проблемы обледенения
технический вариант:
. РАЗРАБОТКА УСТОЙЧИВЫХ К ОБЛЕДЕНЕНИЮ
ДВИГАТЕЛЕЙ

- + Позволит самолётам безопасно летать в зонах высокой лёдности
 - Применимо только к новым судам.
 - Требуется глубокое понимание физики процесса.
 - Требуются репрезентативные выборки измерений лёдности in situ.

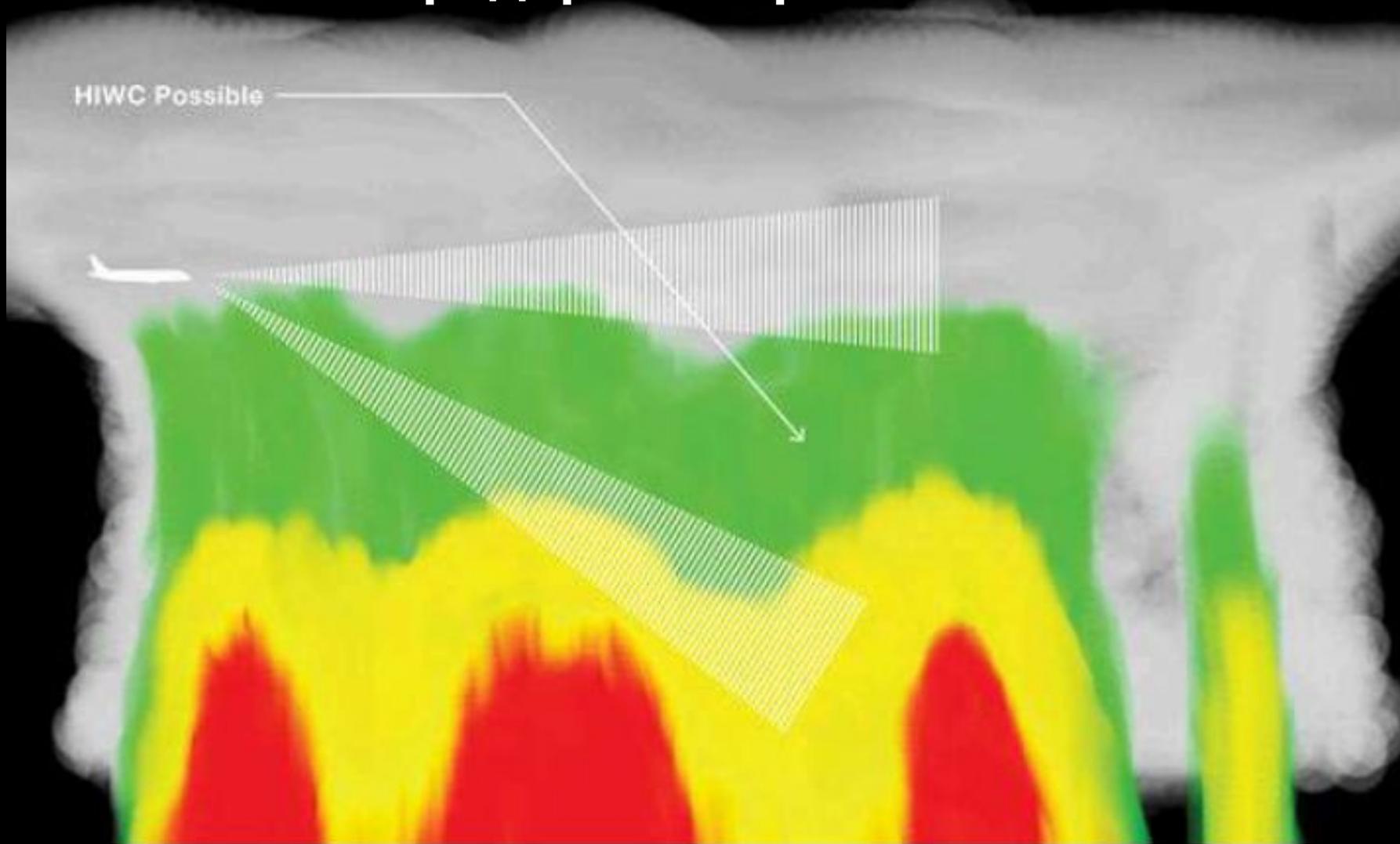
Оптимальнее:
РАСПОЗНАВАНИЕ ЗОН ВЫСОКОГО СОДЕРЖАНИЯ
ЛЕДЯНЫХ КРИСТАЛЛОВ (HIWC)

- + Позволит самолётам обходить вероятные зоны HIWC
- + Применимо к новым и старым воздушным судам.
- Требуется репрезентативные выборки измерений лёдности in situ.
- + Измерения лёдности можно заменить данными о случаях обледенения.

Классический случай - мощная ОГК, высокая радарная отражаемость



Неклассический случай - ОГК в стадии распада или слияния ячеек, низкая радарная отражаемость



ЛЁТНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИЗМЕРЕНИЮ ЛЁДНОСТИ

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

Большинство алгоритмов распознавания зон высокой лёдности опираются на данные этих экспериментов!

ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ОБЛЕДЕНЕНИЯ при скоплении крупных кристаллов над ОГК

Год	Авторы	Метод	Результат
1998	Lawson R.P., Angus L.J.	Анализ данных бортовых датчиков и радаров.	Случаи потери тяги могли быть вызваны высокой концентрацией ледяных кристаллов (High Ice Water Content — HIWC)
2015	Fridlind	Симуляции на основе численной модели облака и измерений размера ледяных частиц.	Удалось обосновать процесс формирования областей с высокой концентрацией ледяных кристаллов, но с низкой радарной отражаемостью .
2016	Protat	Анализ зависимости между водностью облака и отражаемостью радара, работающего на частоте 95 ГГц.	Разработан алгоритм оценки значения первого показателя на основе значения второго; относительное отклонение (ошибка) составило менее 30%.
2017	Proctor	Анализ результатов трёхмерной симуляции эволюции МКС.	Установлено, что области с содержанием ледяных кристаллов более 2 г/м ³ могут существовать и вне самой активной фазы штормового облака.

АЛГОРИТМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ

Алгоритм	Данные геостационарных спутников	Данные облачных радаров	Выходные поля численного прогноза погоды	Наземные радары	Тип вывода
NASA LaRC	Да	Нет	Нет	Нет	Вероятность HIWC
NCAR ALPHA	Да	Нет	Да	Да	Вероятность HIWC
Himawari	Да	Нет	Нет	Нет	Маска HIWC
CIP (NCAR)	Да	Нет	Нет	Да	Маска HIWC
SIGMA (Meteo-France)	Да	Нет	Да	Да	Маска HIWC
GDCP (NASA)	Да	Нет	Да	Нет	Маска HIWC
CPP	Да	Да	Нет	Нет	Маска HIWC

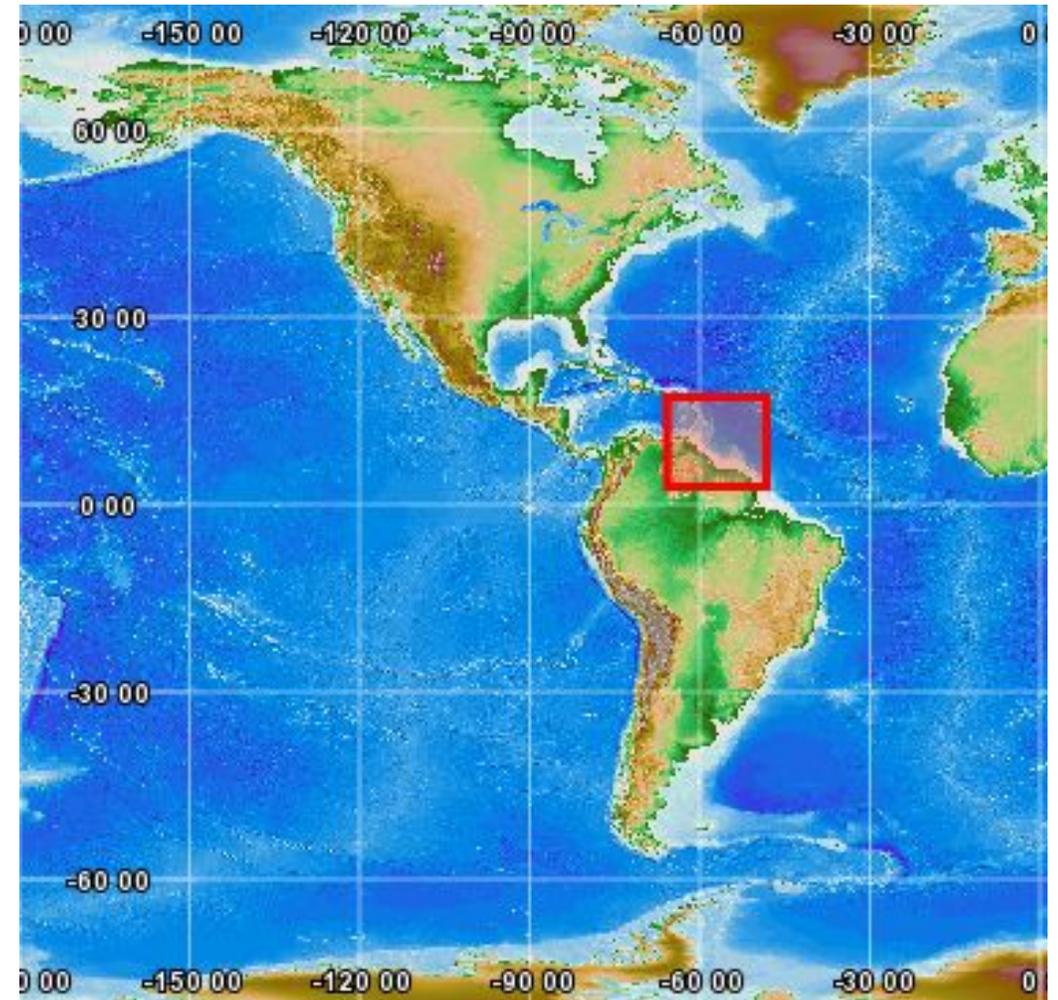
Большинство алгоритмов неприменимо для территории России

Исходные данные для исследования

Период: 9-29 мая 2015 г.

Исходные данные	Шаг по времени	Пространственное разрешение
Измерения спутника Meteosat-10 MSG SEVIRI	15 мин	3-4 км
Непосредственные измерения общего влагосодержания с помощью самолётного зондирования	2 сек	-

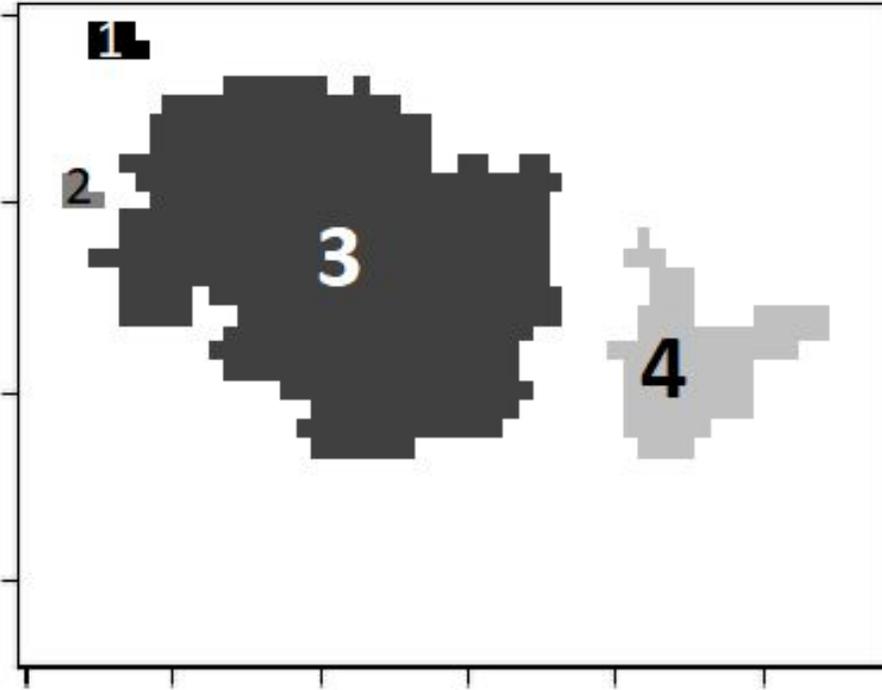
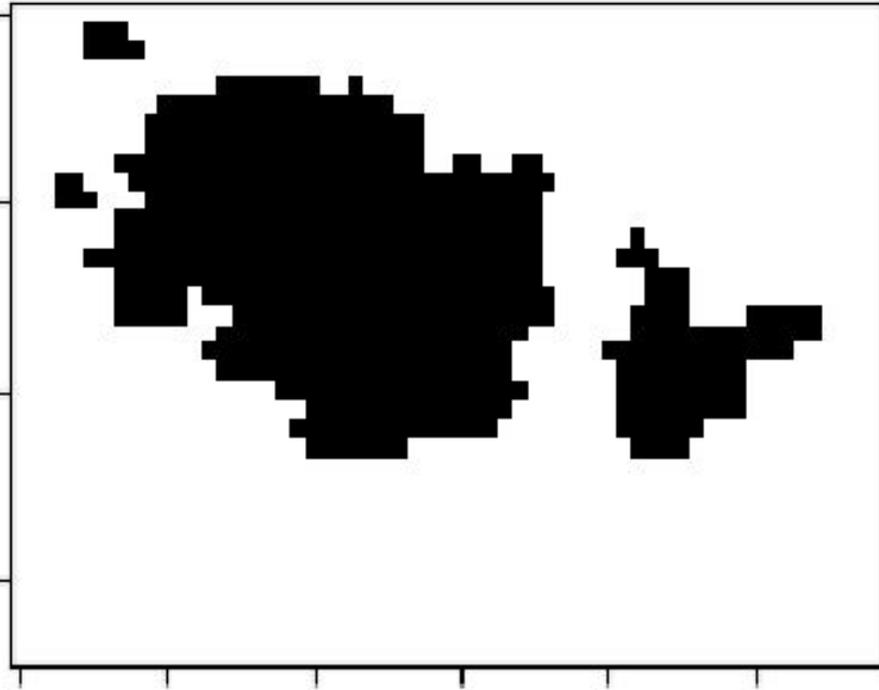
Регион: Французская Гвиана
(от 10 град. ю.ш. до 25 град. с.ш.,
от 75 до 18 град. з.д.)



Этап 1. Выделение маски ОГК и масок объектов

Канал (диапазон ИК) или разность	Критерий отнесения к ОГК	Интерпретация
IR 10,8	$< 225 \text{ K}$	Характерный диапазон для оценки температуры верхней части облака.
IR 10,8 - WV 6,2	$> -4 \text{ K}$	Характерные значения для оценки вертикальной мощности облака.
WV 6,2 - WV 7,3	$> -4 \text{ K}$	Дополнительные характерные значения для оценки верхней части мощного облака.

Этап 1. Выделение маски ОГК и масок объектов



Выделение маски ОГК

(0,1 – присвоение каждому пикселю значение Нет ОГК или Есть ОГК)

Выделение масок объектов

(номера объектов - 1,2,...K – объединение в группы пикселей)

Этап 2. Расчёт характеристик объектов. Параметры распределения температуры

Показатель	Интерпретация
Минимальная температура ВГО (К)	Температура купола.
Максимальная температура ВГО (К)	Температура нижней части облака.
Средняя температура ВГО (К)	Средняя температура верхней границы.
Среднее квадратичное отклонение температуры ВГО (К)	Неравномерность распределения температуры (абсолютный показатель).
Коэффициент вариации температуры ВГО (К)	Неравномерность распределения температуры (относительный показатель).

+ Те же показатели за предыдущие сроки (t-15 мин, t-30 мин, t-60 мин)

Этап 2а. Расчёт характеристик объектов.

Параметры формы контуров ВГО

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



Этап 3. Подготовка данных для машинного обучения и

Предикторы (X)	валидации	Целевая переменная (Y)
<ol style="list-style-type: none">1. Параметры распределения температуры ВГО за текущий срок (t).2. Параметры формы ВГО за текущий срок (t).3. Параметры распределения температуры ВГО за предыдущие сроки (t-15, t-30, t-60).4. Параметры формы ВГО за текущий срок (t-15, t-30, t-60).		<p>Признак подтвержденности ОГК, т.е. наблюдения вблизи выделенного контура конвективных опасных явлений (ОЯ).</p>

Целевая (минимизируемая) функция - бинарная кросс-энтропия:

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

где N — количество наблюдений в обучающей выборке.

Этап 4. Сверхкраткосрочный прогноз направления смещения выделенных контуров ОГК

По данным геостационарного МИСЗ на основе метода оптического потока

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

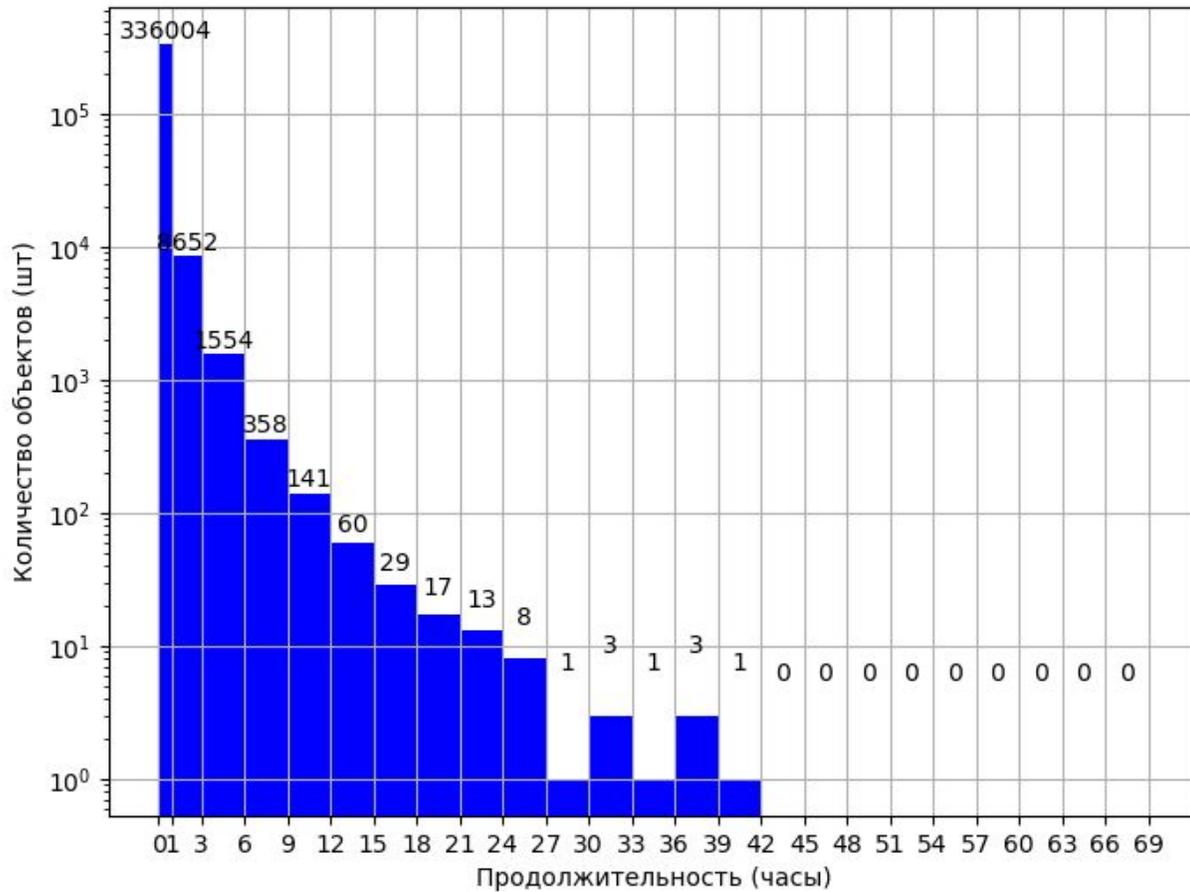
Алгоритм:

1. Выбор наиболее примечательных пикселей (с наибольшим градиентом).
2. Построение векторов оптического потока с помощью метода Лукаса-Канаде для каждого из выбранных пикселей.
3. Исключение отклоняющихся векторов (более, чем на 90° от не менее половины других векторов).
4. Расчёт среднего вектора смещения (для всего объекта ОГК).

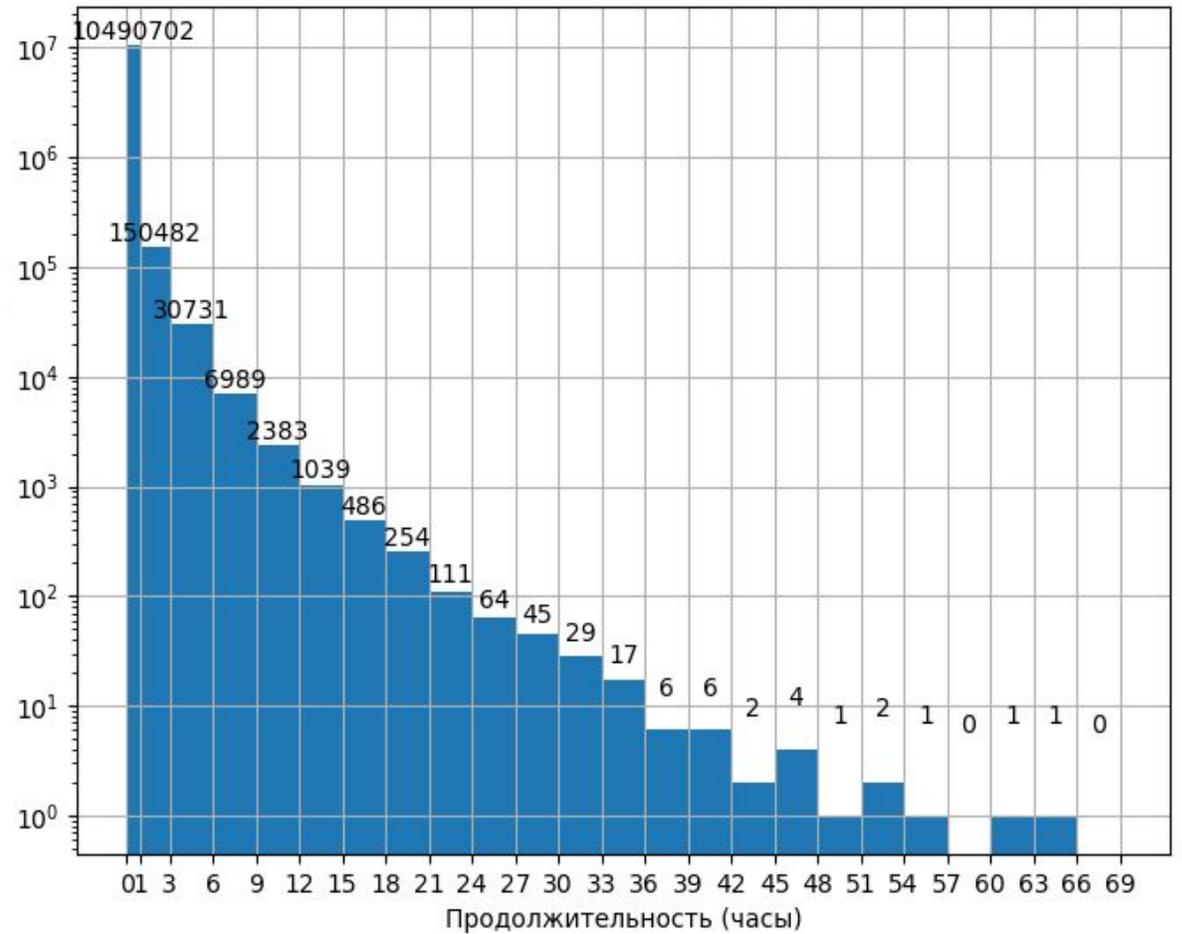
$$\bar{d}_t = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K d_{tk}$$

Повторяемость ОГК в зависимости от продолжительности жизни

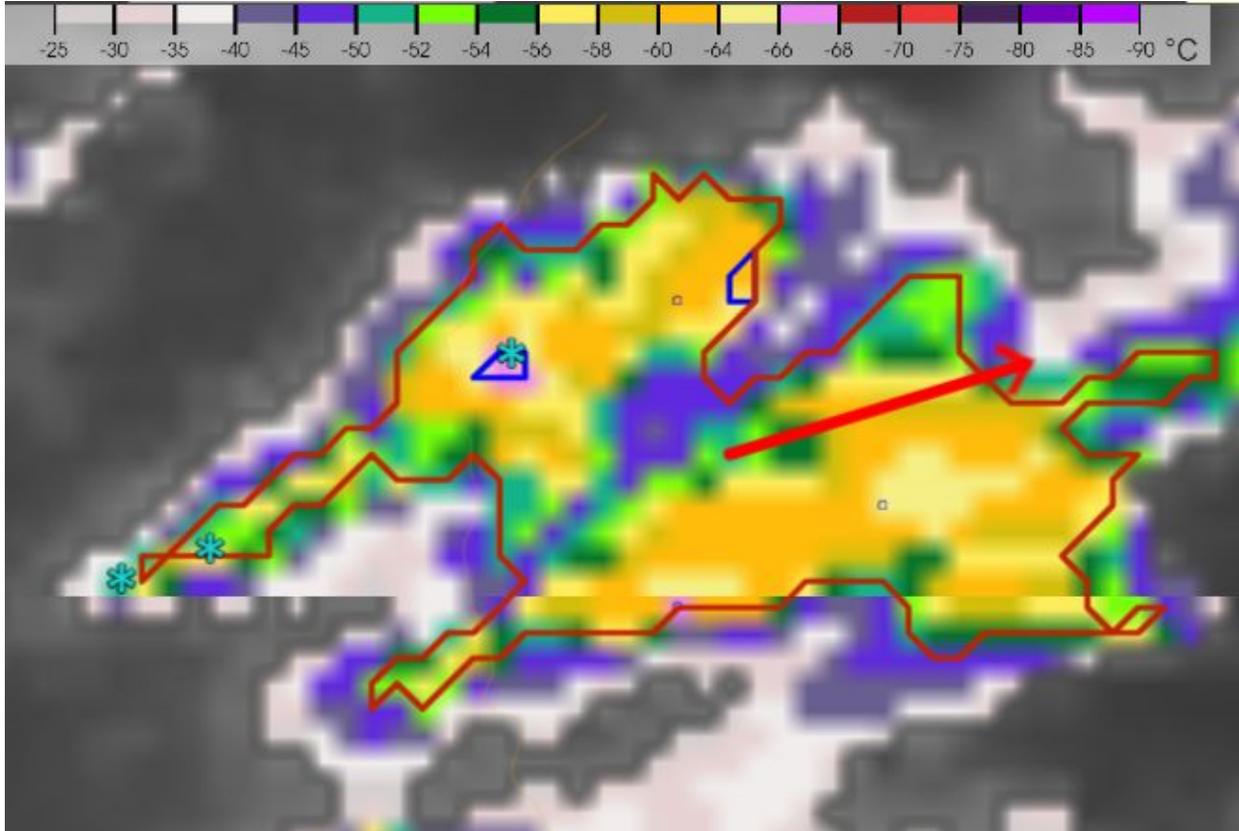
Кайенна, май 2015



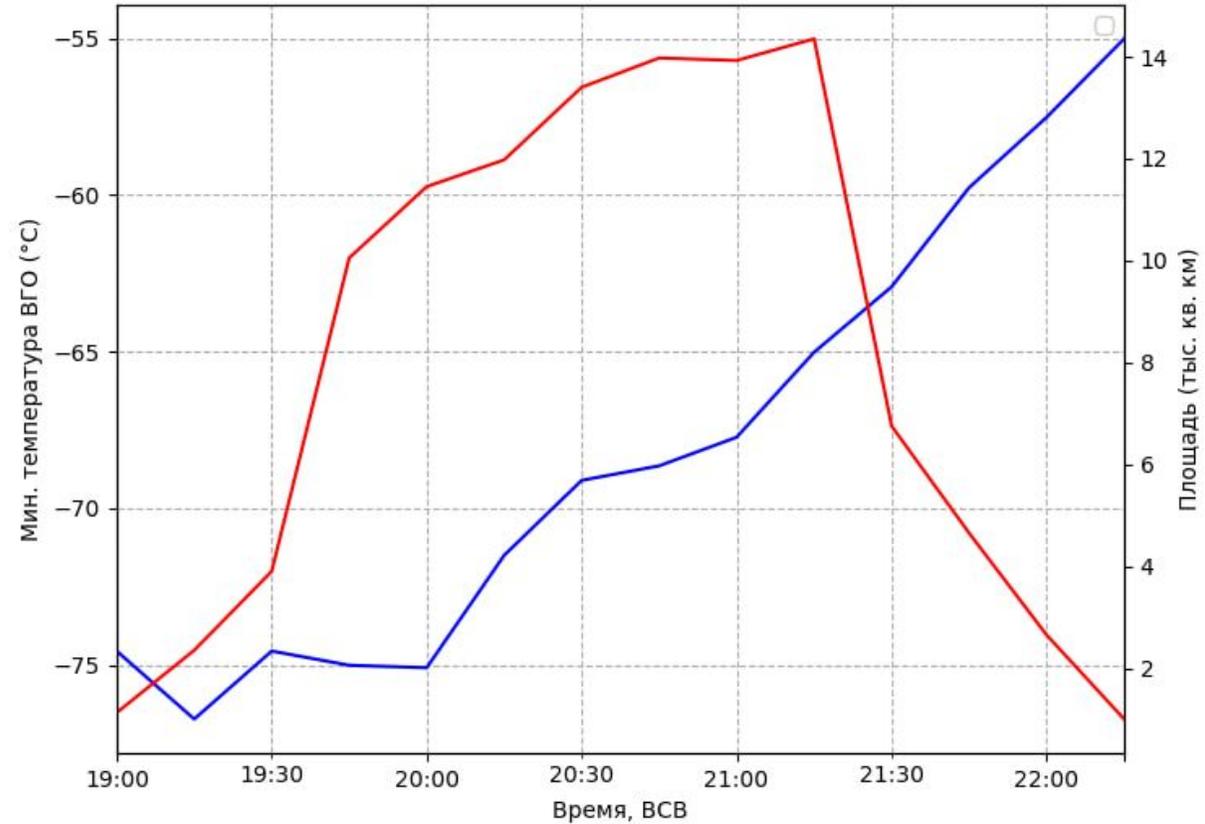
ЕТР, 2013-2020



Случай 10.05.15 21:00 ВСВ (ИК 10,8)

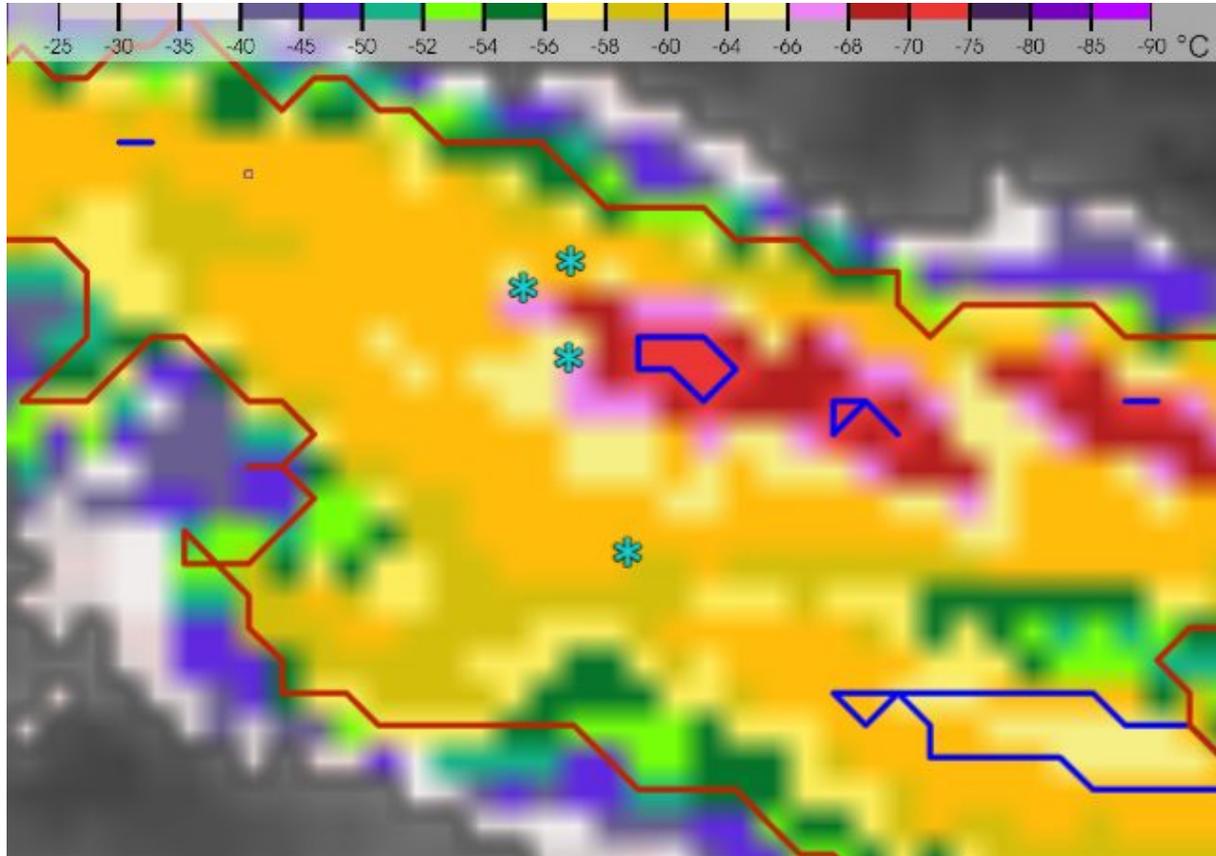


*-точки, где влагосодержание не менее $1,5 \text{ г/м}^3$

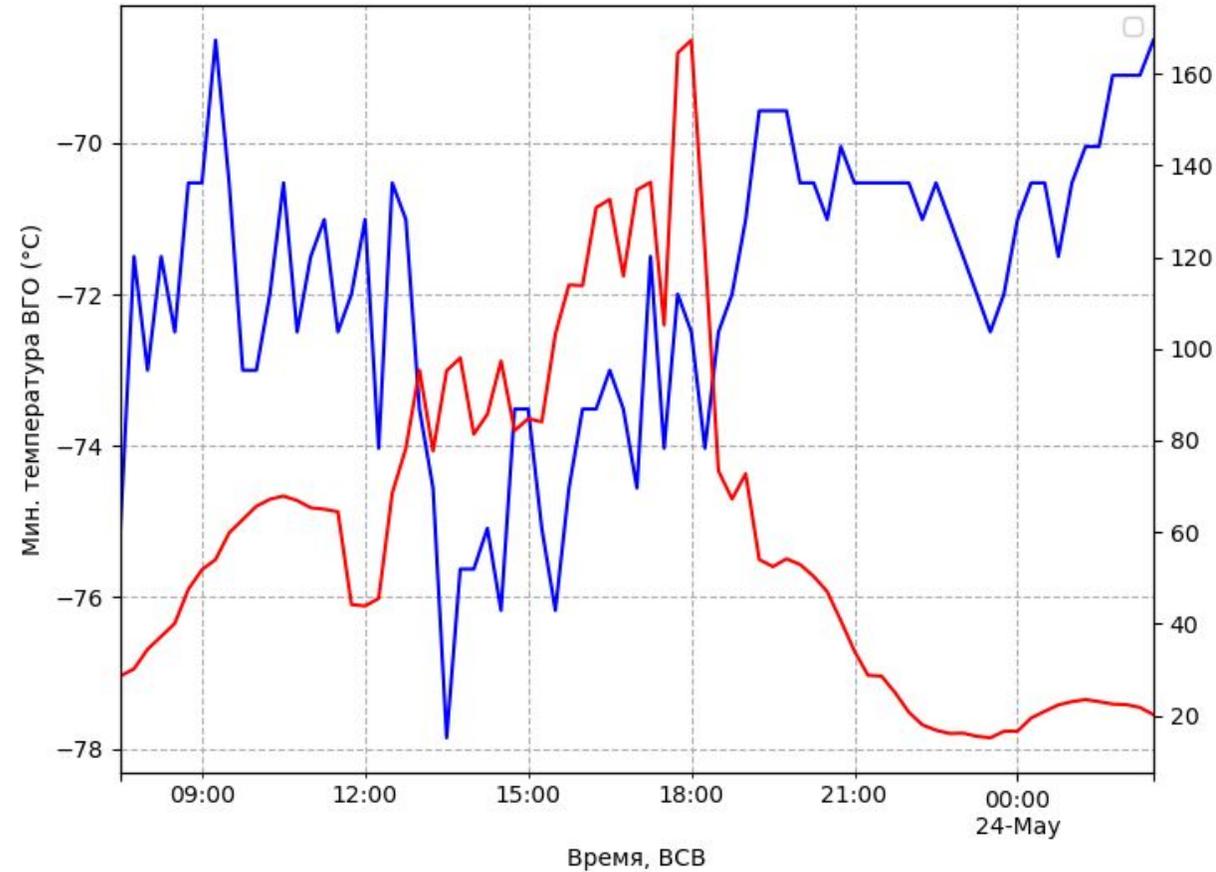


красным - площадь ВГО (тыс. км²)
синим - мин. темп-ра ВГО (°C)

Случай 23.05.15 11:15 ВСВ (ИК 10,8)

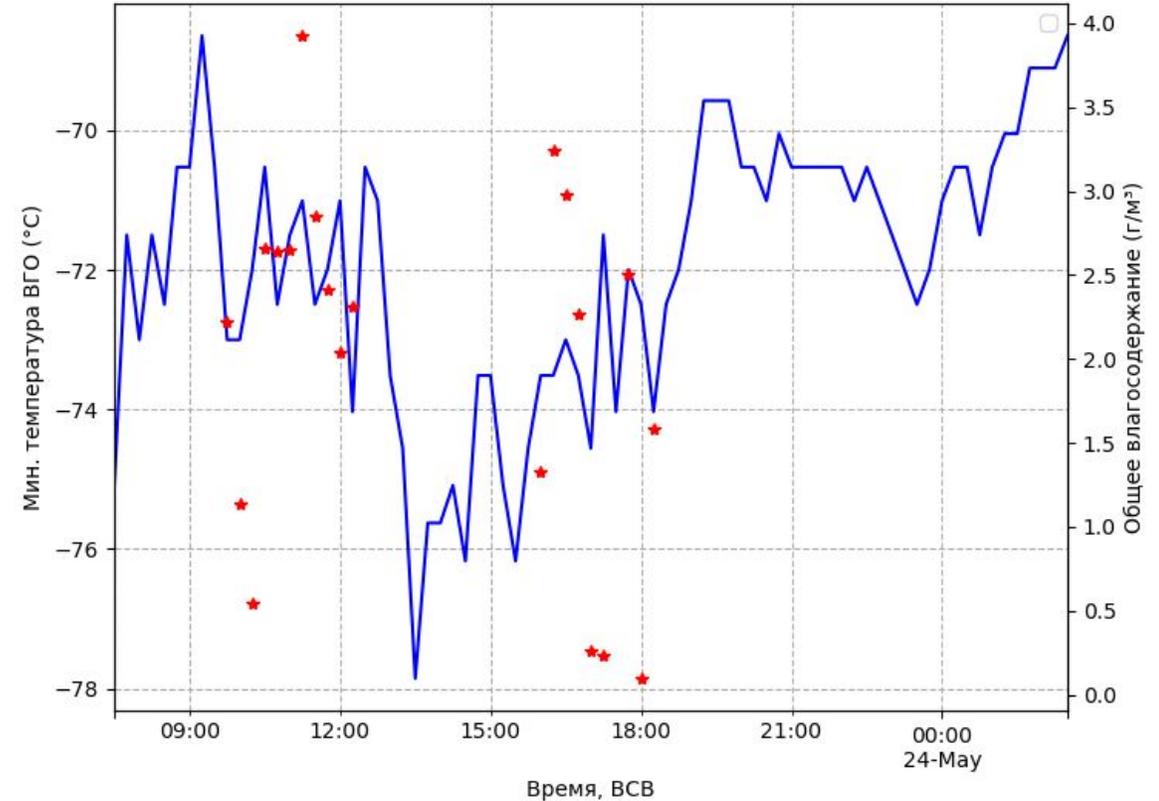
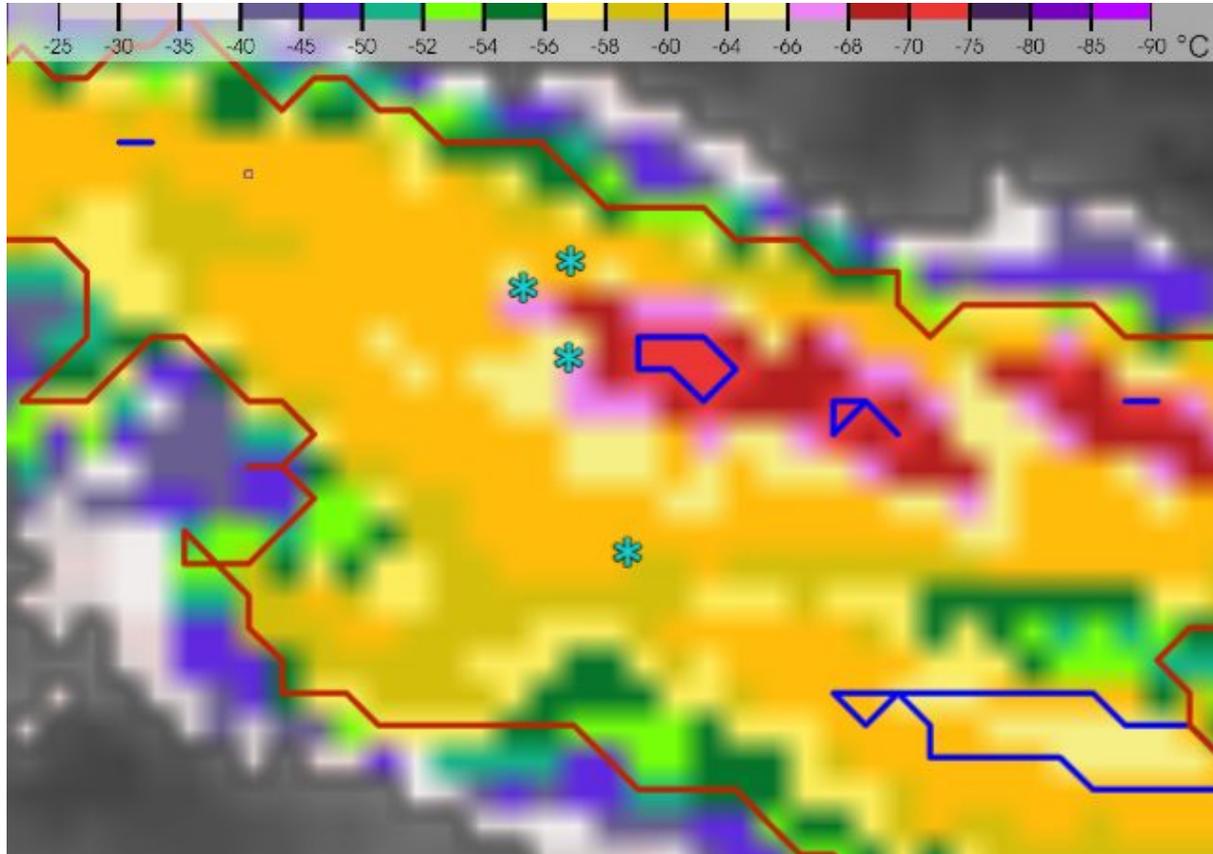


*-точки, где влагосодержание не менее $1,5 \text{ г/м}^3$



красным - площадь ВГО (тыс. км²)
синим - мин. темп-ра ВГО (°C)

Случай 23.05.15 11:15 ВСВ (ИК 10,8)



*-точки, где влагосодержание **красным** - общее влагосодержание (г/м³)
не менее 1,5 г/м³ **синим** - мин. темп-ра ВГО (°C)

Выводы

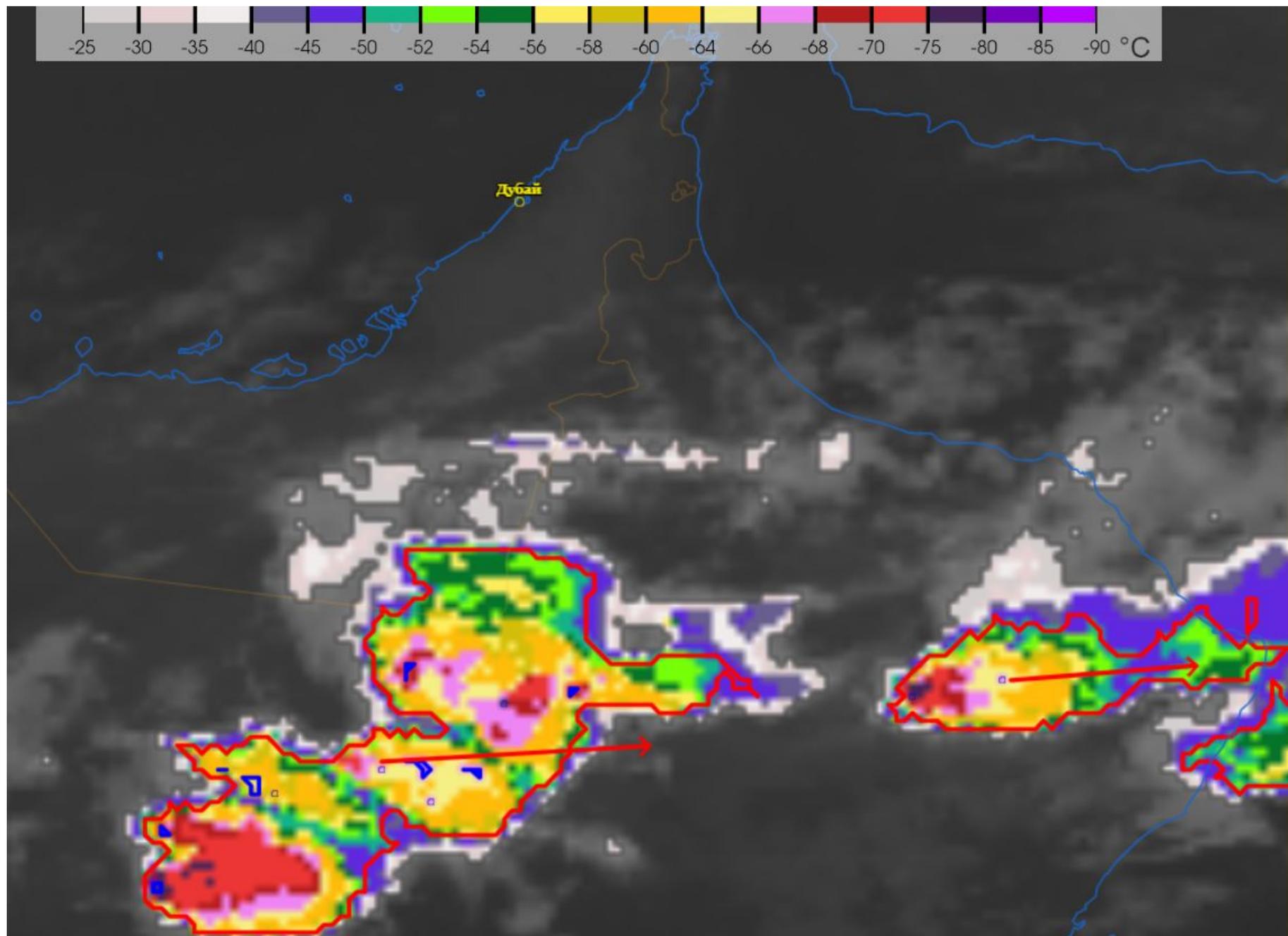
1. Результаты исследования подтверждают, что зоны высокого риска обледенения двигателей самолетов формируются вблизи или внутри кристаллического слоя верхней границы облачности глубокой конфекции (ОГК).
2. Систему автоматического детектирования ОГК на основе данных геостационарных МИСЗ можно использовать для обнаружения условий обледенения двигателей воздушных судов, однако непосредственных измерений влагосодержания (лёдности) для калибровки пока недостаточно.
3. Повышение временного и пространственного разрешения спутниковых данных, а также формирование репрезентативной выборки непосредственных измерений влагосодержания (лёдности) в ОГК позволит повысить качество алгоритмов распознавания условий обледенения двигателей воздушных судов.

Спасибо за внимание!

Благодарим НИЦ Планета за информационное обеспечение
цифровой информацией

15.07.2022
00:00 ВСВ

ОГК над
Аравийски
м п-овом



Канал: IR 10,8 (Электро-Л и Арктика-М)

Явления

Радары



Измерения | Продукты

COSMO	ICON
6.6	26с.ш. 57в.д.
Макс. радарная отражаемость:	неизвестно
Высота ВГО по ДМРЛ (м):	неизвестно
IR 10,8 (Электро-Л и Арктика-М):	201.09 К -72.06°C

Ветер: Приземный

Изолинии: Давление у поверхности

16.04.2024

17:30

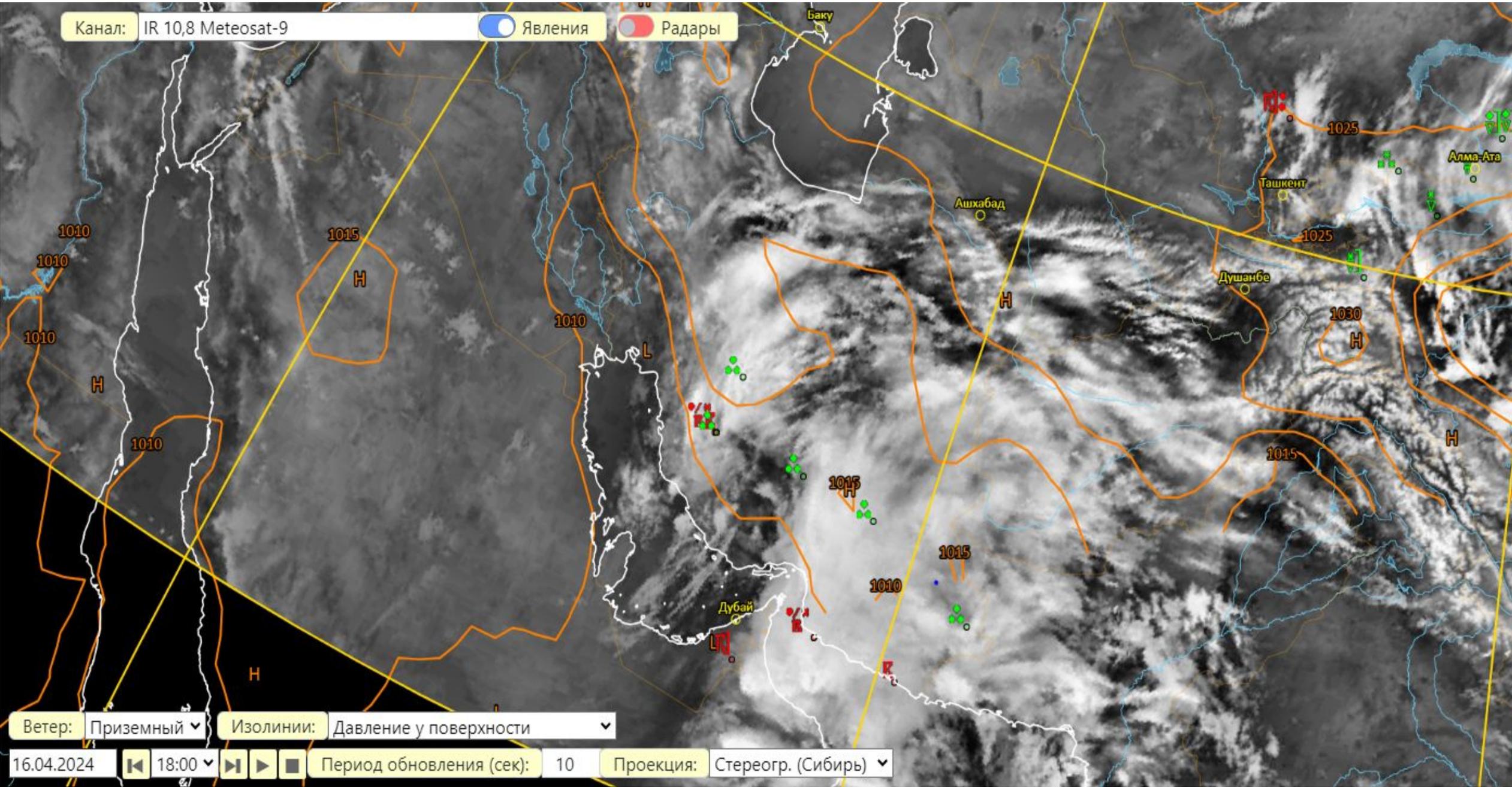
Период обновления (сек): 10

Проекция: Стереогр. (Сибирь)

Канал: IR 10,8 Meteosat-9

Явления

Радары



Ветер: Приземный

Изолинии: Давление у поверхности

16.04.2024

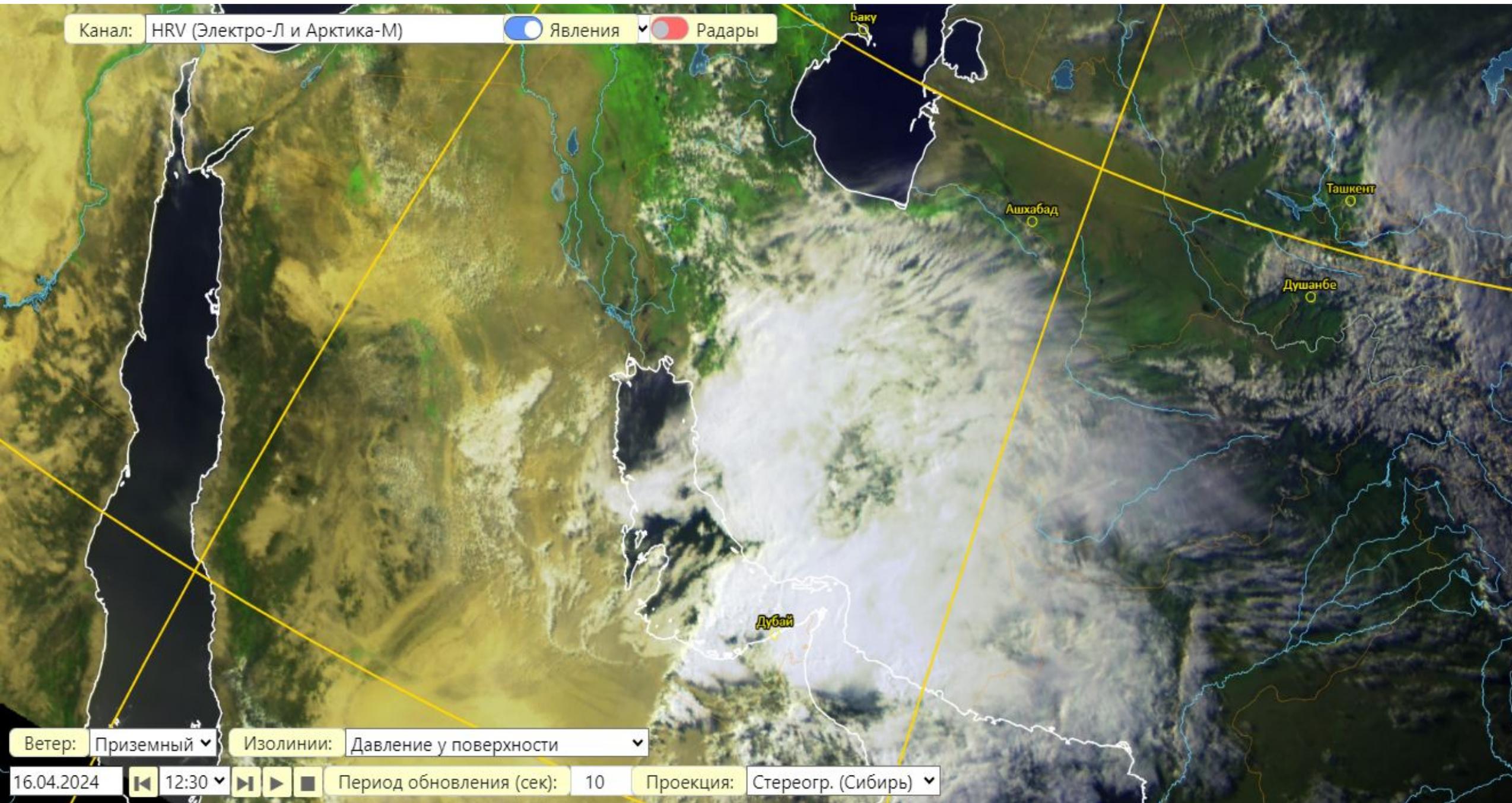
18:00

Период обновления (сек): 10

Проекция: Стереогр. (Сибирь)

Канал: HRV (Электро-Л и Арктика-М)

Явления Радары



Ветер: Приземный Изолинии: Давление у поверхности

16.04.2024 12:30 Период обновления (сек): 10 Проекция: Стереогр. (Сибирь)