XXIV Международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» · ИКИ РАН, Москва, 9–13 ноября 2026 г.

# Объектное распознавание и трекинг облачности глубокой конвекции по данным геостационарных спутников с учётом изменчивости температуры тропопаузы

**Шишов А. Е., Горлач И. А.**

Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, Москва

# Постановка задачи

Распознавание и трекинг облачности глубокой конвекции (ОГК) по измерениям температуры верхней границы (ВГО)

## Место этапа в системе мониторинга облачности глубокой конвекции (СМОГК)

**Ввод данных**
Снимок SEVIRI, канал 10,8 мкм, каждые 5 мин

→

**Этап 1**
**Распознавание объектов ОГК (выделение контуров)**

→

**Этап 2**
**Трекинг по пересечению масок на соседних снимках**

→

**Выходная продукция**
Траектория и стадия развития ячейки

## Зачем и в чём сложность

**Цель**

**Дистанционное выделение ОГК** на фоне комплекса разных типов облачности и подстилающей поверхности — ОГК источник опасных явлений, гроз в тёплый период года, так и угроза для авиации. Изменчивая и сложная форма ВГО ячеек Cb, может затруднять четкое детектирование с МИСЗ на фоне других типов поверхности

**Проблемы**

Сочетание микро-, мезо- и макрофизических процессов в Cb затрудняет оценку ОГК. Мезомасштабная система часто объединяет под общей наковальней несколько ячеек, при утопленной конвекции ВГО ОГК сливается с ВГО других типов.

## Пороговый метод первой версии СМОГК и его недостатки

Объект = связная область пикселей с температурой ВГО ниже 225 K

**1 · Соседние ячейки сливаются**
Трекинг выполняется для всего облака, а не для отдельных ячеек.

**2 · Объект «забывается»**
Объект не выделяется при кратковременном повышении температуры ВГО **(эффект исчезновения)**

**3 · Ячейка может дробится**
Выделяется много **лишних ячеек** при **колебании температуры менее 1 K**, что делит ячейку на несколько объектов

**4 · Выделяются высокие объекты, не Cb**
Остатки наковален и перистые шлейфы объединяются, хотя ниже уже нет конвективных облаков

# Преимущества предлагаемого подхода

## Четыре свойства по построению

Объект строится вокруг холодного ядра ячейки, а пороговые уровни температуры заданы относительно температуры динамической тропопаузы.

### Не требуется размеченная выборка

Для обучения нейронных сетей и других моделей машинного обучения нужны тысячи размеченных масок, разметка такой выборки трудоёмка и субъективна.

### Объектно-ориентированный трекинг

Предлагаемый метод специализируется на стабильном выделении конвективных облаков как объектов на последовательных снимках и отслеживании их смещения.

### Параметры — физические величины

Температура тропопаузы, высота облаков и другие физические величины обладают большой изменчивостью: они зависят от сезона года, синоптической ситуации, широты и типа спутника. Модели, построенные исключительно по статистическим зависимостям в конкретной выборке, привязаны к этой выборке (для использования иных данных требуется серьёзная адаптация).

### Экономично и проверяемо

1 – 2 с на снимок области без графического ускорителя. Каждый пропуск (или ложная тревога) объясним физически и указывает, каких данных не хватает.

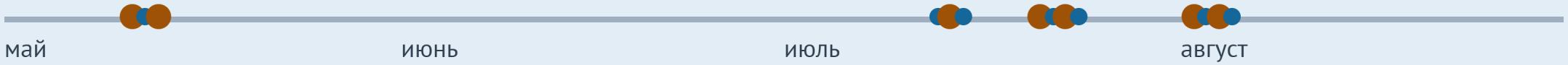
# Исходные данные для исследования

14 полных суток грозовой активности, май — август 2025 г.; область 10° з. д. – 45° в. д., 35–65° с. ш.

## Источники данных

| Источник | Что используется | Объём за 14 суток |
|---|---|---|
| Спутник **Meteosat-11, SEVIRI** | Температура ВГО в диапаз. ИК с длиной волны 10,8 мкм, 4–6 км | 3939 снимков, шаг 5 мин |
| Модель ЧПП **ICON-Ru 6.5 ENA** | Температура динамической тропопаузы, сглаженная по масштабу воздушной массы | Ежечасные поля, заблаговрем. 6–11 ч |
| Эталон гроз **Meteosat-12, Lightning Imager** | Вспышки молний с индексом «достоверности» выше 0,8, объединённые в очаги | 3,6 млн вспышек, 19,6 тыс. очагов |

## Две выборки: 7 суток под подбор параметров и 7 суток под тестирование (проверку)




- Обучение, 7 суток: 10, 12 мая; 13, 20, 22 июля; 1, 3 августа
- Проверка, 7 суток: 11 мая; 12, 14, 21, 23 июля; 2, 4 августа

65 % очагов — в 11–17 UTC, ночью активность в 15 раз ниже; параметры подобраны по одной выборке, показатели качества рассчитаны по другой.

# Оценка качества распознавания по данным о молниевых разрядах

Совмещение объектов с очагами разрядов; вероятность обнаружения и доля ложных тревог

## Схема совмещения объектов и разрядов

### Очаг гроз

Более трёх достоверных вспышек за 5 мин в смежных пикселях




Очаг сопоставлен с объектом, если тот был ближе 15 км от очага, хотя бы на одном снимке окна

Часовое окно — допуск проверки, а не прогноз: объект почти всегда уже есть за один-три снимка до первой молнии

## Две меры качества

### Доля распознанных очагов гроз (POD)

Доля очагов, для которых нашёлся объект ОГК по схеме слева. Аналог вероятности обнаружения (POD)

### Доля ложных тревог (FAR)

Доля объектов ОГК, в окрестности которых в течение часа не было разрядов. Аналог FAR для объектов

Обе меры вычислены по всем снимкам суток и осреднены по 14 полным суткам 2025 г. Алгоритм решает задачу распознавания на каждом снимке; прогноз не строится

# Показатели устойчивости работы метода трекинга

Число объектов исчезновения при сохранившейся облачности, перекрытие масок, скорость смещения

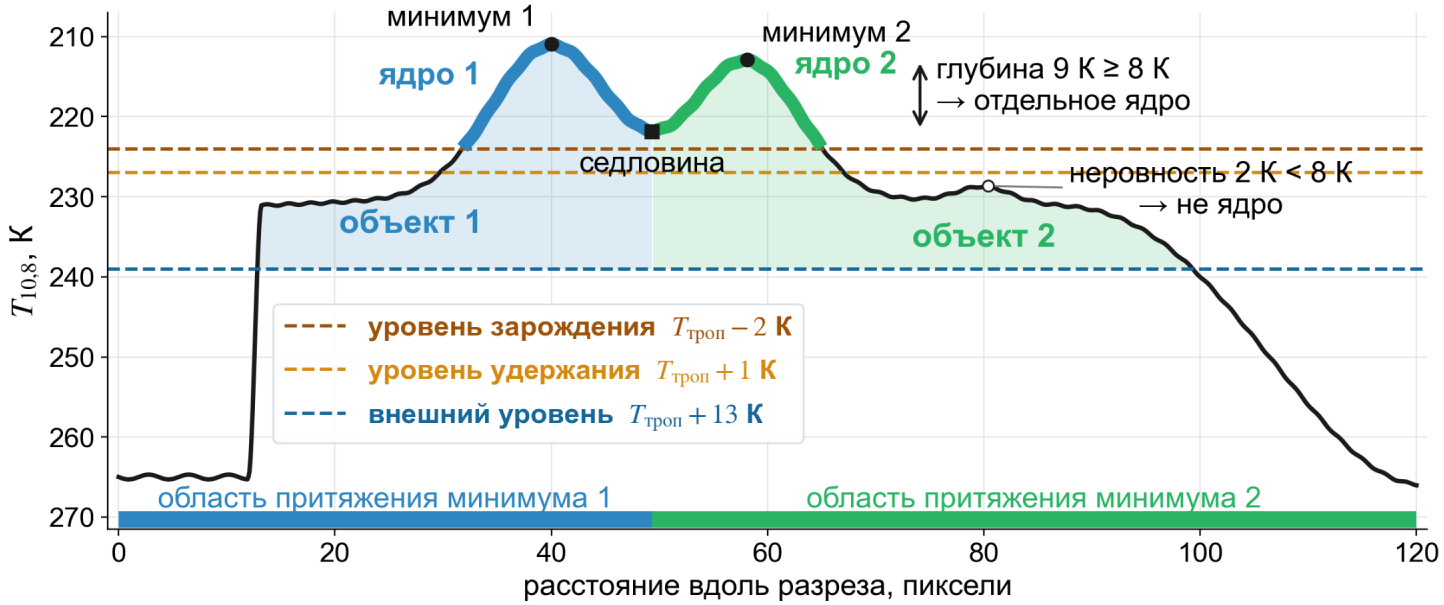
### Четыре меры устойчивости метода трекинга

Трекер СМОГК ведёт объекты по перекрытию масок, поэтому маски каждого варианта пропущены через него и оценены ещё по четырём мерам.

| Мера | Предмет измерения | Мотивация |
|---|---|---|
| **Число объектов на снимке** | Среднее по всем снимкам области число объектов ОГК | Каждый объект — идентификатор и траектория; меньше объектов при той же доле ложных тревог — лишние были фрагментами ячеек и наковален |
| **Число исчезновений объекта при сохранившейся облачности, в час** | Объекты, пропавшие на следующем снимке, хотя температура не менее половины площади ВГО ниже 235 K | Разрыв траектории: ячейка жива, а трекер заводит новый объект. Одноуровневое правило превращает пульсацию вершины на 1–3 K в мерцание |
| **Доля пересечения масок объекта на соседних сроках (IoU), %** | Индекс Жаккара масок одного объекта после сдвига на вектор смещения. | Трекер сопоставляет объекты по перекрытию масок; при скачках формы он путает соседей и переприсваивает идентификаторы |
| **Скорость смещения объекта, м/с** | 90-й процентиль скорости смещения объекта между соседними снимками по траекториям трекера | Характерная скорость смещения ОГК варьируется в диапазоне 8–25 м/с. Большие значения могут свидетельствовать о некорректности метода. |

# Предлагается: выделять объект вокруг холодного ядра ячейки

Изолированный минимум температуры ВГО




### Сравнение: детектирование вершин

Критерий ядра близок к критерию пробивающей тропопаузу вершины (Bedka et al., 2010), где выделяется только сама вершина, в нашей работе объект охватывает всю ячейку по алгоритму

### Определение объекта

#### Ядро

Изолированный минимум температуры ВГО глубиной не менее 8 К относительно седловины вместе с его областью притяжения.

#### Одно ядро — один объект

ВГО делится между ячейками по областям притяжения; неровности наковальни глубиной менее 8 К ядром не считаются

# Алгоритм RuHmc-BasinTrack

Шаги для каждого снимка

**1**

**Сглаживание**

Поле радиационной температуры канала 10,8 мкм, гауссов фильтр с σ = 1 пиксель

**2**

**Выделение изолированных минимумов**

Минимумы глубиной не менее 8 K относительно седловины (разрез на слайде 7) и их области притяжения

**3**

**Определение ядра**

Пиксели с температурой ниже уровня **зарождения**; внутри масок предыдущего снимка — ниже уровня **удержания**.

**4**

**Определение контуров объектов**

Все ядра растут одновременно по полю температуры до **внешнего уровня**.

**5**

**Правила выделения объекта**

Каждое ядро и прилежащие к нему пиксели считаются отдельным объектом.

**Три уровня температуры ВГО заданы относительно температуры тропопаузы *T*троп (ICON-Ru, медианный фильтр ≈ 350 × 300 км)**

Уровень зарождения

***T*троп − 2 K**

используется для детектирования нового объекта (хотя бы 1 пиксель имеет температуру ниже этого уровня)

Уровень удержания

***T*троп + 1 K**

ядра с температурой выше этого уровня считаются распавшимися.

Внешний уровень

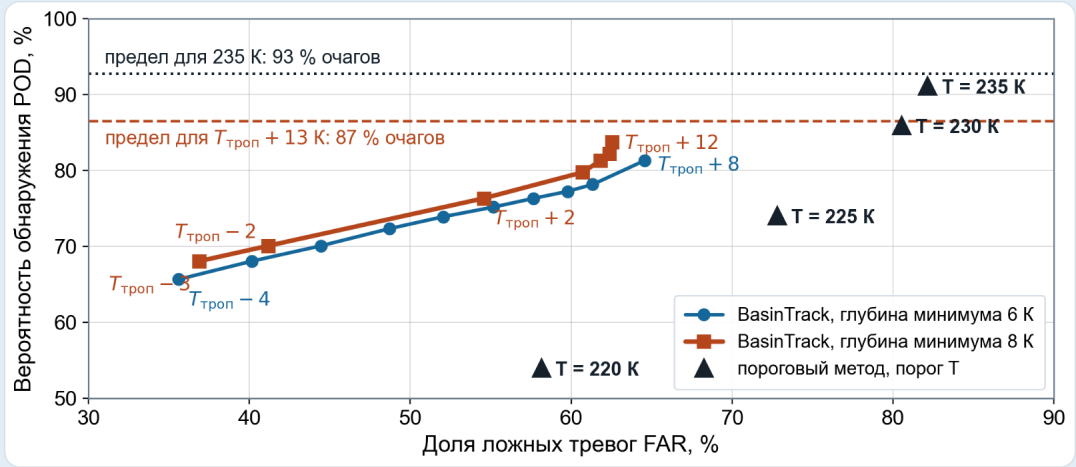
***T*троп + 13 K**

к ядру присоединяются соседние пиксели с температурой ниже этого уровня.

# Критерии отбора параметров: кривая обнаружения

Выбор уровня зарождения влияет на соотношение POD/FAR

### Кривая обнаружения, построенная на независимой выборке (7 суток)




Параметры отобраны по обучающей выборке с поочерёдным исключением одного дня. Штриховые линиями показаны верхние границы POD:

— для нового метода (POD = 87 %)

— для фиксированного порога 235 K (POD = 93 %).

### Три вывода из отбора параметров

**Кривая обнаружения**

Повышение уровня зарождения на 1 K приводит к повышению POD на 3 п. п. и FAR на 4–5 п. п.

Критерий «POD − FAR» выбирает нижний край диапазона.

**Глубина минимума 8 K лучше 6 K**

При том же значении POD FAR: ложных тревог −3 п. п., объектов −14 %, исчезновений при сохранившейся облачности −25 %

**Пороговый метод: больше ложных тревог**

Зависимость от значения порога:

— при 225 K: POD = 70 %, FAR = 56–60 %;

— при 230–235 K: POD = 84–91 %, FAR = 85–87 %.

# Сравнение метода RuHmc-BasinTrack с пороговым методом

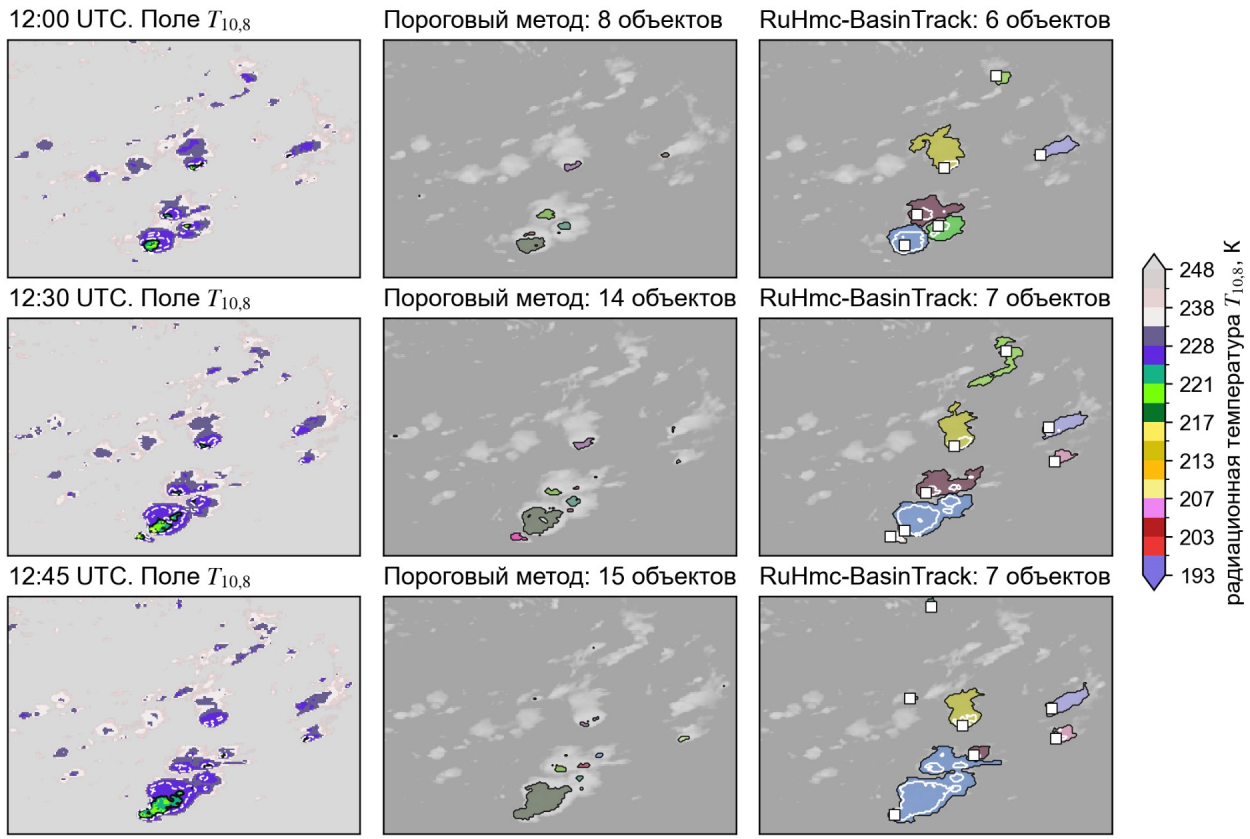
Меньше ложных тревог, впятеро меньше объектов, более устойчивый трекинг

| | Фиксированный порог 225 K | RuHmc-BasinTrack |
|---|---|---|
| Доля ложных тревог (FAR), % | 71 | 40 |
| Доля распознанных очагов гроз (POD), % | 79 | 71 |
| Число объектов на снимке | 88 | 16 |
| Число исчезновений объекта при сохранившейся облачности, в час | 161 | 7 |
| Среднее пересечение масок объектов на соседних сроках, % | 47 | 79 |

Средние значения по 14 полным суткам 2025 г., все сроки; область 10° з. д. – 45° в. д., 35–65° с. ш.; меры с часовым окном подтверждения; уровень зарождения $T_{троп}$ − 2 K, глубина ядра = 8 K.

# Пример разделения системы на ячейки

1 августа 2025 г., 12:00–12:45 UTC, Центральная Европа




**Пороговый метод (в центре): объект = связная область с температурой ВГО ниже 225 K**

Соседние ячейки системы к 12:45 слиты в один объект без ядер; вдоль изотермы 225 K возникают и исчезают фрагменты: 8, 14 и 15 объектов в кадре

**RuHmc-BasinTrack (справа): объект = ядро и его область притяжения**

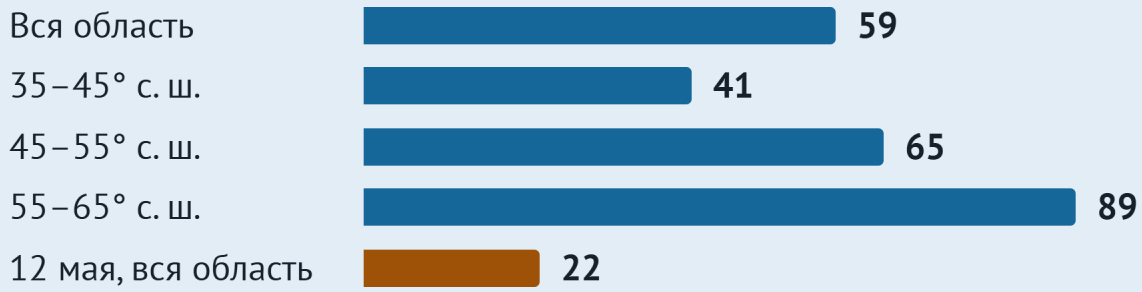
Система разделена на ячейки по изолированным минимумам (белый контур — граница ядра, квадрат — его самый холодный пиксель), число объектов меняется плавно: 6, 7 и 7 в кадре; цвет объекта сохраняется, пока трекер его прослеживает

На поле *T*10,8 (слева): чёрная изотерма — уровень зарождения 223 K, белая штриховая — порог 225 K

# Вершины грозовых облаков по широтным поясам

Доля очагов гроз, над которыми вершина облака достигала уровня зарождения* в исследуемый период, 35–65° с. ш.

**Вершина грозового облака достигала уровня зарождения, % очагов**




**9 из 14 суток** медиана температуры ВГО с грозами ±5 K от *T*троп

**8 из 14 суток** южнее 45° с. ш. вершины были теплее тропопаузы на 6–26 K

**13 из 14 суток** севернее 55° с. ш. — в пределах ±5 K.

**Получено, что имеется предел вероятности обнаружения**

**13 %** грозовых очагов за исследуемый период не могли быть обнаружены новым методом.

**7 %** грозовых очагов не могли быть обнаружены ни новым, ни пороговым методом.

* Критерий: хотя бы один пиксель в радиусе 15 км от очага холоднее *T*троп − 2 K

**Зависимость от широты**

| Показатель / Регион | Юг, 35–45° | Север, 55–65° |
|---|---|---|
| Температура динамической тропопаузы | 205–213 K | 226–230 K |
| Медиана разницы температуры ВГО и тропопаузы | +8,6 K | −1,9 K |
| Температура ВГО ниже уровня зарождения | 41 % | 89 % |
| Вершины грозовых облаков | ниже тропопаузы | у тропопаузы |

В исследуемый период на юге тропопауза была высокой и холодной, и вершины большинства грозовых облаков её не достигали.

На севере в этот период уровень нулевой плавучести был близок к тропопаузе, и высота ВГО была близка к высоте тропопаузы.

# Ограничения предлагаемого метода

### POD ниже, чем у порогового метода

**79 → 71 %** — POD, среднее за 14 суток

***T*троп + 2 K** — уровень зарождения, при котором POD = 79 %, но тогда FAR = 52 %, число объектов вдвое больше.

Это выбор оптимального соотношения POD/FAR: при сопоставимом значении POD для предлагаемого метода FAR ниже на 20 п. п.

### Предел POD

**28 %** — достоверных вспышек — над пикселями с температурой выше 235 K

**12 %** — очагов гроз за исследуемый период не имели в радиусе 15 км пикселя с температурой ниже внешнего уровня (*T*троп + 13 K)

Рост POD возможен за счёт одновременного роста FAR.

### Ночные ложные тревоги

**64 %** — FAR в ночное время (0–5 UTC) против 29 % днём (11–17 UTC). У порогового метода 90 и 66 % соответственно.

**60–84 %** — POD по часам суток: суточный ход слабый, в отличие от FAR.

Ночью холодная облачность распавшихся систем без разрядов неотличима от активных ячеек лишь по измерениям радиационной температуры.

**Не исследовались значения параметров:**

Окно медианного фильтра поля тропопаузы (≈ 350 × 300 км) и диапазон её ограничения 205–232 K заданы эвристически

# Выводы и перспективы

1. Предлагаемый метод, по данным за 14 полных суток, позволяет:
   — снизить FAR с 71 до 40 % (днём — с 66 до 29 %) при снижении POD лишь на 8 п. п. (с 79 до 71 %);
   — в 5 раз сократить число отслеживаемых объектов;
   — в 20 раз сократить число исчезновений объектов при сохранившейся облачности (7 в час вместо 161); доля распознанных очагов гроз при этом ниже на 8 процентов.
2. Оптимальный уровень зарождения зависит от температуры тропопаузы: её разброс по области достигает 20–25 K, а выбор одного фиксированного порога снижает POD и на юге, и на севере с 71 до 58 %.
3. У методики есть три ограничения.
   — Грозы наблюдались и рядом с облачностью с тёплой ВГО (с температурой выше 235 K, около 7 % всех очагов). То есть за исследуемый период POD не мог превышать 93 % при выбранных параметрах.
   — Ночью распадающиеся ОГК без грозовых разрядов неотличимы от активных, развивающихся ячеек, в связи с чем FAR ночью достигает 64 % (против 29 % днём).
   — Данные о молниевых разрядах Meteosat-12 (Lightning Imager) имеют неточности (грозовые очаги могут быть ложными или могут быть пропущены); также, на определённых стадиях развития ОГК может не сопровождаться грозами (дольше 1 часа).

**Перспективы**

Внедрить метод в оперативный режим и адаптировать для данных «Электро-Л» и «Арктика-М» (МСУ-ГС).

# Спасибо за внимание

Шишов Андрей Евгеньевич · Гидрометцентр России · shandruha@gmail.com

**Литература**

Шишов А. Е., Горлач И. А. Алгоритм распознавания и мониторинга облачности глубокой конвекции по данным МИСЗ на основе целочисленного программирования // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 2 (376). С. 39–59.

Holmlund K., Grandell J., Schmetz J. et al. Meteosat Third Generation (MTG): Continuation and innovation of observations from geostationary orbit // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2021. Vol. 102, no. 5. Pp. E990–E1015.

Bedka K., Brunner J., Dworak R. et al. Objective satellite-based detection of overshooting tops using infrared window channel brightness temperature gradients // J. Appl. Meteor. Climatol. 2010. Vol. 49, no. 2. Pp. 181–202.

Hoinka K. P. Temperature, humidity, and wind at the global tropopause // Mon. Wea. Rev. 1999. Vol. 127, no. 10. Pp. 2248–2265.