



Двадцать третья международная конференция  
«Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»  
10 – 14 ноября 2025 г.

# НАУКАСТИНГ ИНТЕНСИВНОСТИ ОСАДКОВ ПО ДАНЫМ ГЕОСТАЦИОНАРНОГО СПУТНИКА HIMAWARI-8/9

Докладчик: Андреев Александр Иванович

# Для чего нужен краткосрочный прогноз осадков?

Краткосрочный прогноз осадков (англ. наукастинг) – прогноз заблаговременностью от 2 до 6 часов.

Его востребованность связана со способностью обеспечивать потребителей более детализированной информацией, чем это позволяют другие виды метеорологических прогнозов.



## Транспорт и логистика

- Принятие решений о взлете и посадке воздушных судов
- Планирование маршрутов для авиации и морских судов
- Регулирование опасных участков трасс



## Повседневная деятельность граждан

- Организация массовых мероприятий
- Туризм
- Бытовая деятельность
- Дорожные условия



## Городские коммунальные службы

- Оповещение населения
- Приведение спасательных служб в режим повышенной готовности
- Планирование мероприятий по ликвидации стихийных бедствий



## Энергетика

Планирование работы ГЭС и солнечных электростанций



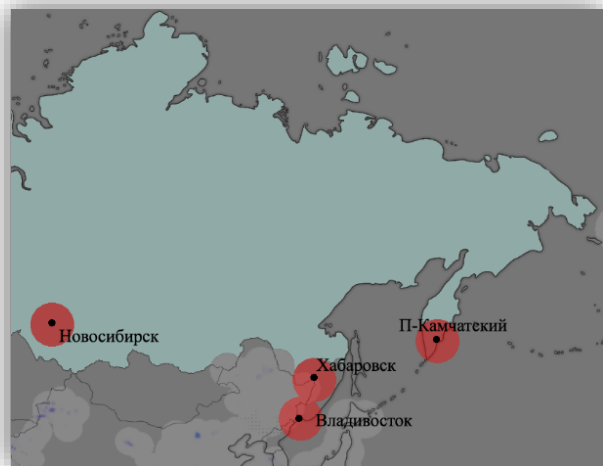
## Сельское хозяйство

- Корректировка графиков поливов растений
- Планирование полевых работ

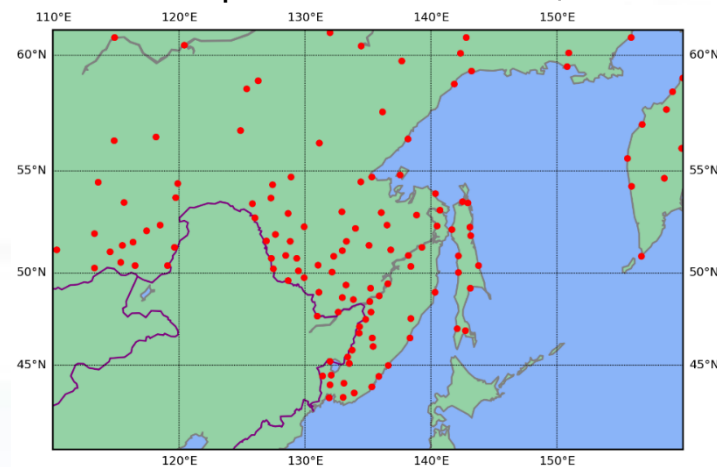
# Проблема оперативного мониторинга осадков на Дальнем Востоке

На значительной территории Сибири и Дальнего Востока России на текущий момент необходимые оперативные радиолокационные системы практически отсутствуют.

Зоны покрытия радиолокационными системами

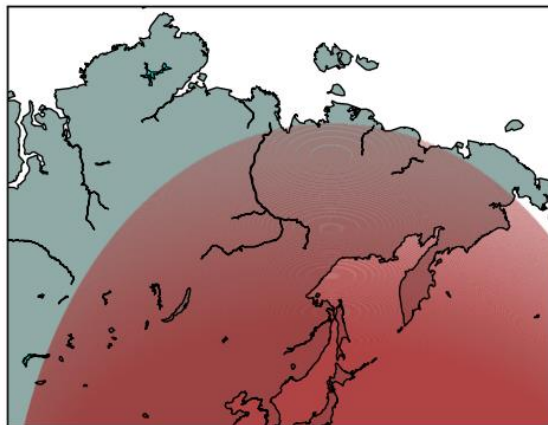


Распределение сети наземных метеорологических станций



Альтернативной возможностью количественной и качественной оценки осадкообразующей облачности с высоким пространственно-временным разрешением на этих территориях могут быть измерения геостационарных и высокоэллиптических космических аппаратов.

Зона покрытия Himawari-8/9



# Геостационарные космические аппараты Himawari-8 и 9

Himawari-8/9 имеет на борту спектрорадиометр AHI (Advanced Himawari Imager), предоставляющий измерения в 16 спектральных диапазонах от видимого до инфракрасного излучения.

Пространственное разрешение: 2 км

Временное разрешение: 10 мин.

Спектральные каналы прибора AHI

№	Центральная длина волны, мкм	№	Центральная длина волны, мкм
1	0.45	9	6.95
2	0.51	10	7.35
3	0.65	11	8.60
4	0.86	12	9.63
5	1.61	13	10.45
6	2.26	14	11.20
7	3.85	15	12.35
8	6.25	16	13.30

Himawari-8



# Методы краткосрочного прогнозирования осадков

## Методы на основе алгоритмов оптического потока

- + Высокая скорость работы и интерпретируемость результатов
- Трудности при прогнозе нелинейных изменений

## Методы на основе алгоритмов машинного обучения

- + Нелинейность и мультимодальность
- Проблема «черного ящика»

## Нейронные сети

### Детерминированный подход

- Сверточные сети (CNN)
  - Сверточно-Рекуррентные сети (RNN, Conv-LSTM)
  - Визуальные трансформеры (ViT)
- + С высокой точностью прогнозируют общее направление движения полей осадков
  - Невысокая детализация и размытие изображений

### Статистический подход

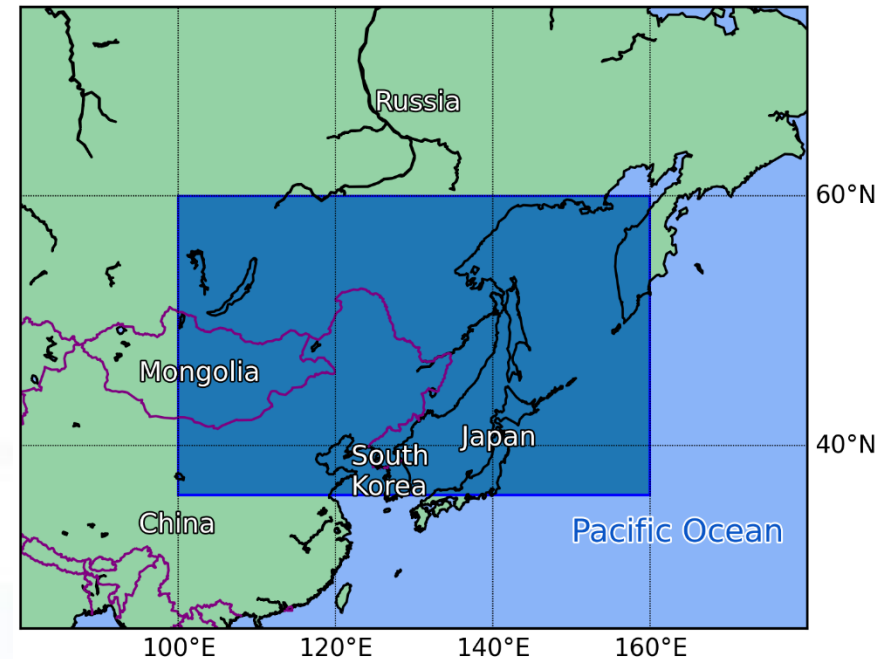
- Генеративно-состязательные сети (GAN)
  - Диффузионные сети (DM)
- + Более высокая детализация
  - Высокая ресурсоемкость и сложность обучения, недетерминированность



# Обучающая выборка

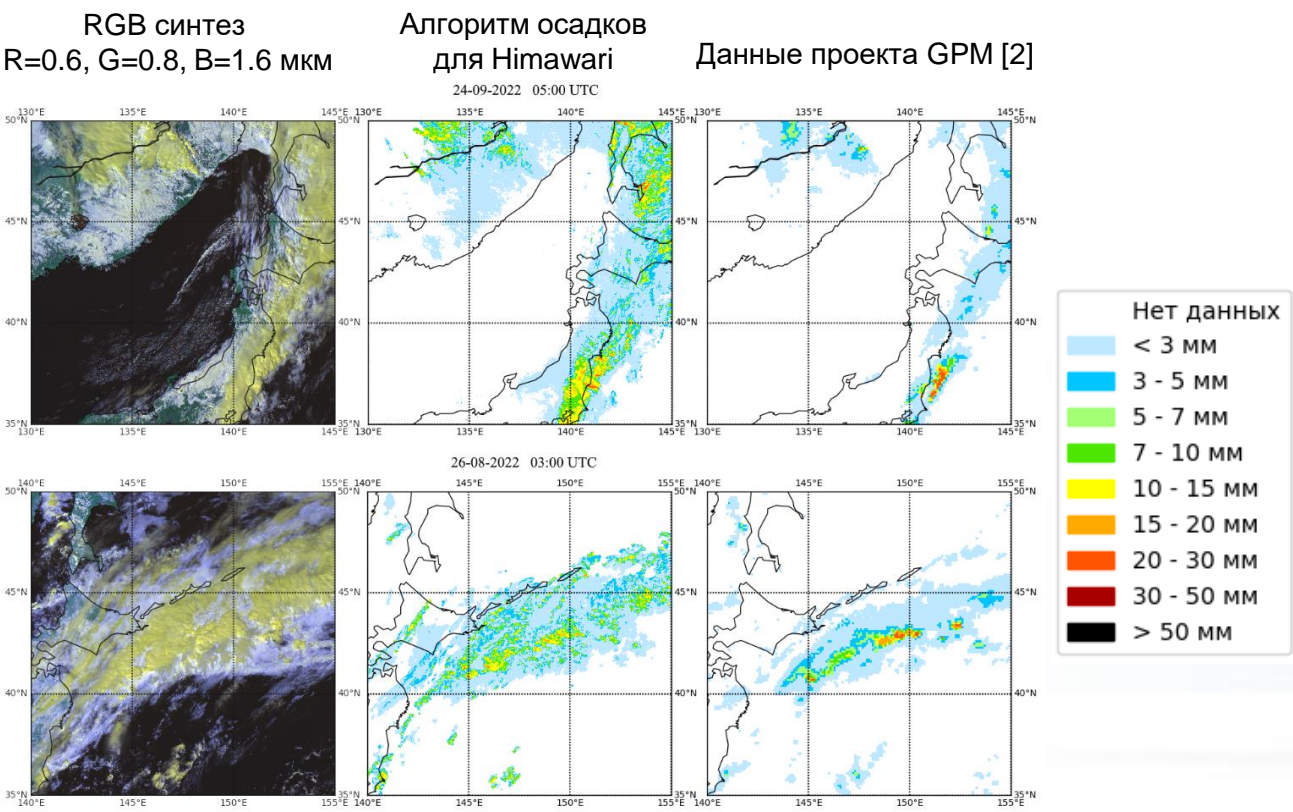
## Обучающие данные:

- Территория Азиатско-Тихоокеанского региона в границах 35–60° с.ш. и 100–160° в.д.;
- Временной период 2020-2024 гг.;
- 20 тыс. последовательностей по 21 изображению 512x512 пикселей;
- 9 изображений являются входными, 12 – прогнозируемыми;
- Пространственное разрешение 2 км, временное 10 минут;
- Изображения получены из результатов работы алгоритма для оценки интенсивности осадков;
- Данные разделены на 3 выборки: 80% для обучения, 2% для настройки, 18% для итоговой оценки;
- Данные нормированы в диапазоне [0, 1].



# Предварительный расчет интенсивности осадков по спутниковым данным

Для Himawari-8/9 авторами ранее был представлен алгоритм оценки интенсивности осадков [1].



POD	FAR	CSI	F1	RMSE, мм/ч	Bias, мм/ч	Pearson
0.73	0.28	0.64	0.73	1.33	-0.13	0.45

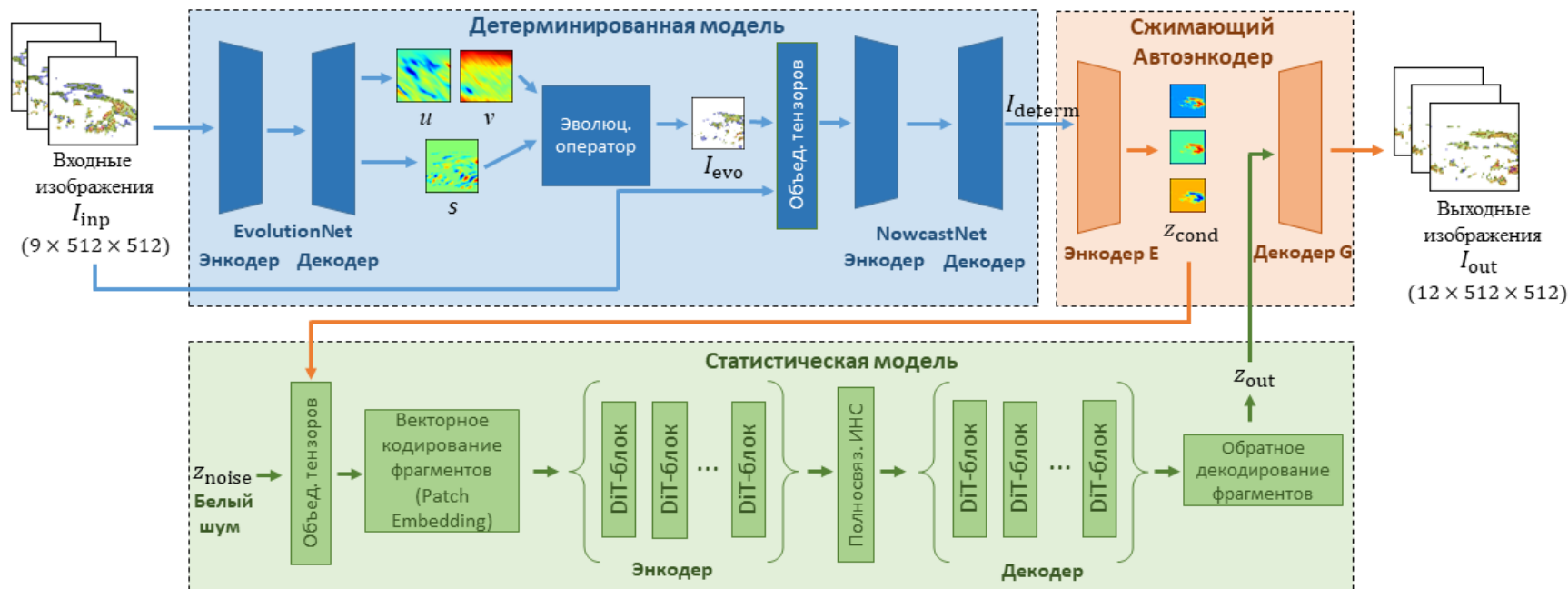
Алгоритм основан на использовании двух нейронных сетей:

- 1) для решения задачи классификации (обнаружение полей осадков)
- 2) регрессионная (для оценки значений мгновенной интенсивности)

[1] Andreev A. I. et al. Method of quantitative rainfall estimation based on Himawari-8/9 measurements //Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa—Current problems in remote sensing of the Earth from space. – 2024. – T. 21. – №. 5. – С. 20-35.  
[2] Huffman G. J. et al. Integrated multi-satellite retrievals for the global precipitation measurement (GPM) mission (IMERG) //Satellite precipitation measurement: Volume 1. – Cham : Springer International Publishing, 2020. – С. 343-353.

# Алгоритм RainCast

Алгоритм [1] объединяет преимущества детерминированного и статистического подходов, что в равной степени позволяет акцентировать внимание на прогнозе осадков как на мезомасштабном, так и на локальном уровне, обеспечивая высокую точность и детализацию.



- Детерминированная модель на основе NowcastNet [2] обеспечивает предварительный прогноз осадков.
- Статистическая модель на основе CasFormer [3] осуществляет постобработку прогноза, восстанавливая мелкие детали.
- Сжимающий автоэнкодер преобразует изображения в скрытое представление, а затем декодирует их обратно, чтобы уменьшить объем вычислений практически без потери точности.

[1] Андреев А. И. и др. RainCast: Гибридный алгоритм наукастинга интенсивности осадков по данным спутниковых наблюдений КА Himawari-8/9 // Информатика и автоматизация. – 2025. – Т. 24. – №. 4. – С. 1085-1113.

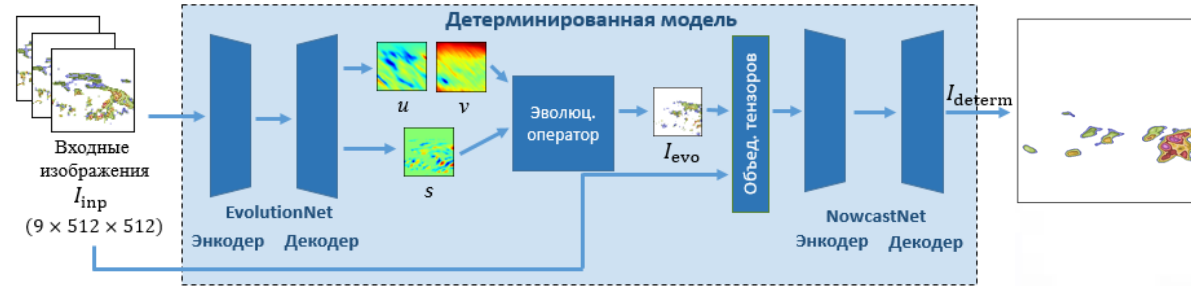
[2] Zhang Y. et al. Skillful nowcasting of extreme precipitation with NowcastNet // Nature. – 2023. – Т. 619. – №. 7970. – С. 526-532.

[3] Gong J. et al. Cascast: Skillful high-resolution precipitation nowcasting via cascaded modelling // arXiv preprint arXiv:2402.04290. – 2024.



# Детерминированная модель

Детерминированная модель осуществляет прогноз в первом приближении на мезомасштабном уровне. В качестве такой модели используется модель-генератор NowcastNet из одноименной генеративно-состязательной сети (GAN) [1].



В состав NowcastNet входит подсеть EvolutionNet, реализующая физический принцип непрерывности потока. Данная модель генерирует вспомогательные векторное поле перемещений пикселей, подаваемой затем на вход основной сети NowcastNet.

Обе модели представляют собой сверточные автоэнкодеры с Unet-подобной архитектурой.

## Функция потерь для EvolutionNet

$$L_{\text{evonet}} = L_{\text{accum}} + 0.01 \cdot L_{\text{motion}}$$

$$L_{\text{accum}} = \sum_{t=1}^T (L_{\text{wdis}}(I_t, I_t^{\text{evo bili}}) + L_{\text{wdis}}(I_t, I_t^{\text{evo}}))$$

$$L_{\text{motion}} = \sum_{t=1}^T (\|\nabla u_t \odot \sqrt{w(I_t)}\|_{L_2}^2 + \|\nabla v_t \odot \sqrt{w(I_t)}\|_{L_2}^2)$$

$$L_{\text{wdis}}(I_t, I_t^{\text{evo}}) = \|(I_t - I_t^{\text{evo}}) \odot w(I_t)\|_{L_1}$$

$$w(I_t) = \begin{cases} 0.5, & \text{если } I_t < 0.2 \\ 1 + I_t, & \text{если } I_t \geq 0.2 \end{cases}$$

## Функция потерь для NowcastNet

$$L_{\text{determ}} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^T (\|(I_t - I_t^{\text{determ}}) \odot w(I_t)\|_{L_1} + \|(I_t - I_t^{\text{determ}}) \odot w(I_t)\|_{L_2})$$

$w(I_t)$  – весовой коэффициент

$I_t$  – изображение интенсивности осадков

$L_{\text{accum}}$  – составляющая функц. пот. для интенсивности

$L_{\text{motion}}$  – составляющая функц. пот. для перемещения

$I_t^{\text{evo bili}}$  – прогноз EvolutionNet, билинейная интерполяция

$I_t^{\text{evo}}$  – прогноз EvolutionNet

# Статистическая модель

Статистическая модель осуществляет постобработку прогноза, позволяя уточнить мелкие детали. К качеству такой модели используется сеть CasFormer [1] на основе трансформера, обучаемого по методу диффузий.

Принцип работы основан на обучении модели прогнозировать шум и вычитать его из предварительно зашумленного по определенному закону изображения.

**Функция потерь для CasFormer:**

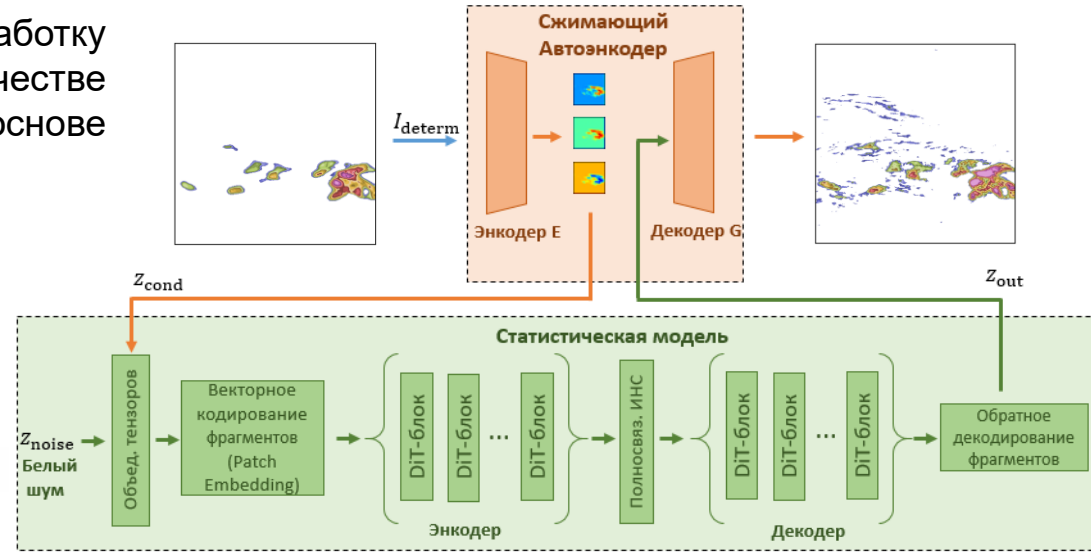
$$L_{diff} = \|N(0,1) - \Psi_{\theta}(z_k, k, z_{cond})\|$$

$\Psi$  – модель для прогноза шума с параметрами  $\theta$

$k$  – номер итерации зашумления

$z_k$  – зашумленное изображение на итерации  $k$

$z_{cond}$  – изображение исходного прогноза



Для сокращения объема вычислений исходные изображения сжимаются с помощью специально обученного автоэнкодера.

**Функция потерь для Автоэнкодера:**

$$L_{AE} = \min_{E,D} \max_D (L_1(I_t, \bar{I}_t) - L_{adv}(\bar{I}_t) + \log D(I_t) + L_{reg}(I_t; \bar{I}))$$

$L_{adv}$  – генеративно-состязательная функция потерь

$L_{reg}$  – регуляризационный параметр на основе дивергенции Кульбака-Лейблера

$D$  – дискриминатор

# Полученные результаты на независимой тестовой выборке

Сравнение моделей для прогноза осадков на 120 минут (кадр № 12)

Модель	RMSE	PCC	POD	FAR	CSI	CSI (>5 мм/ч)	SSIM	PSNR
EarthFormer	1.09	0.56	0.80	0.34	0.57	0.57	0.88	34.49
NowcastNet	0.88	0.73	0.73	0.13	0.68	0.70	0.92	36.73
NowcastNet (GAN)	0.94	0.71	0.77	0.29	0.63	0.71	0.90	35.87
EarthFormer + CasFormer	1.20	0.51	0.74	0.38	0.52	0.60	0.85	32.95
RainCast	0.88	0.75	0.78	0.27	0.65	0.72	0.91	36.63

RMSE – Root Mean Squared Error  
(Корень среднеквадратичной ошибки)

PCC – Pearson Correlation Coefficient  
(Коэффициент корреляции Пирсона)

POD – Probability of Detection  
(Вероятность обнаружения)

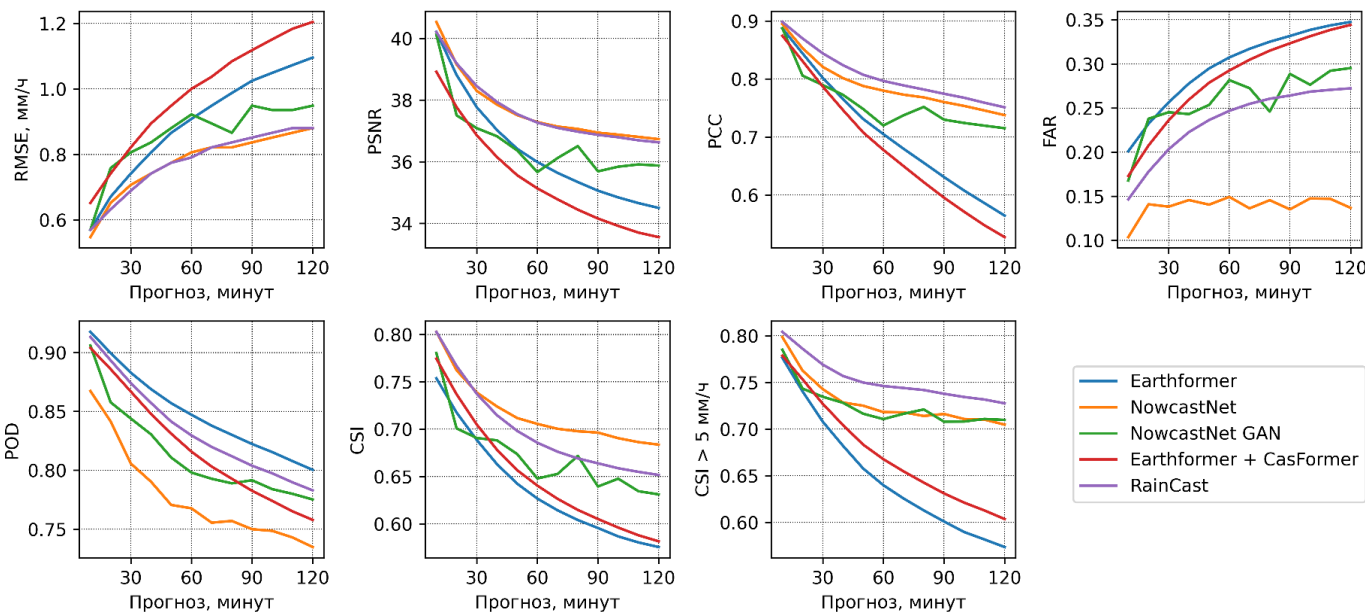
FAR – False Alarm Rate  
(Коэффициент ложного обнаружения)

CSI – Critical Success Index  
(Критический индекс успеха)

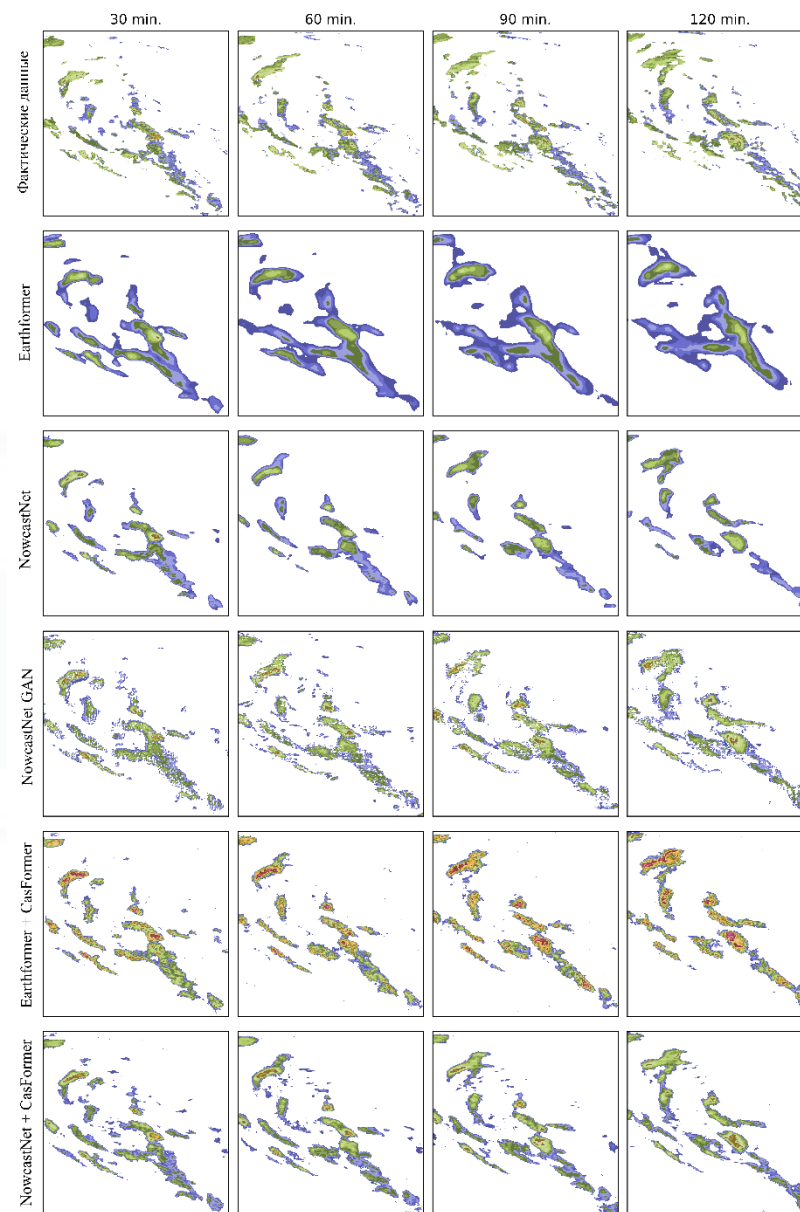
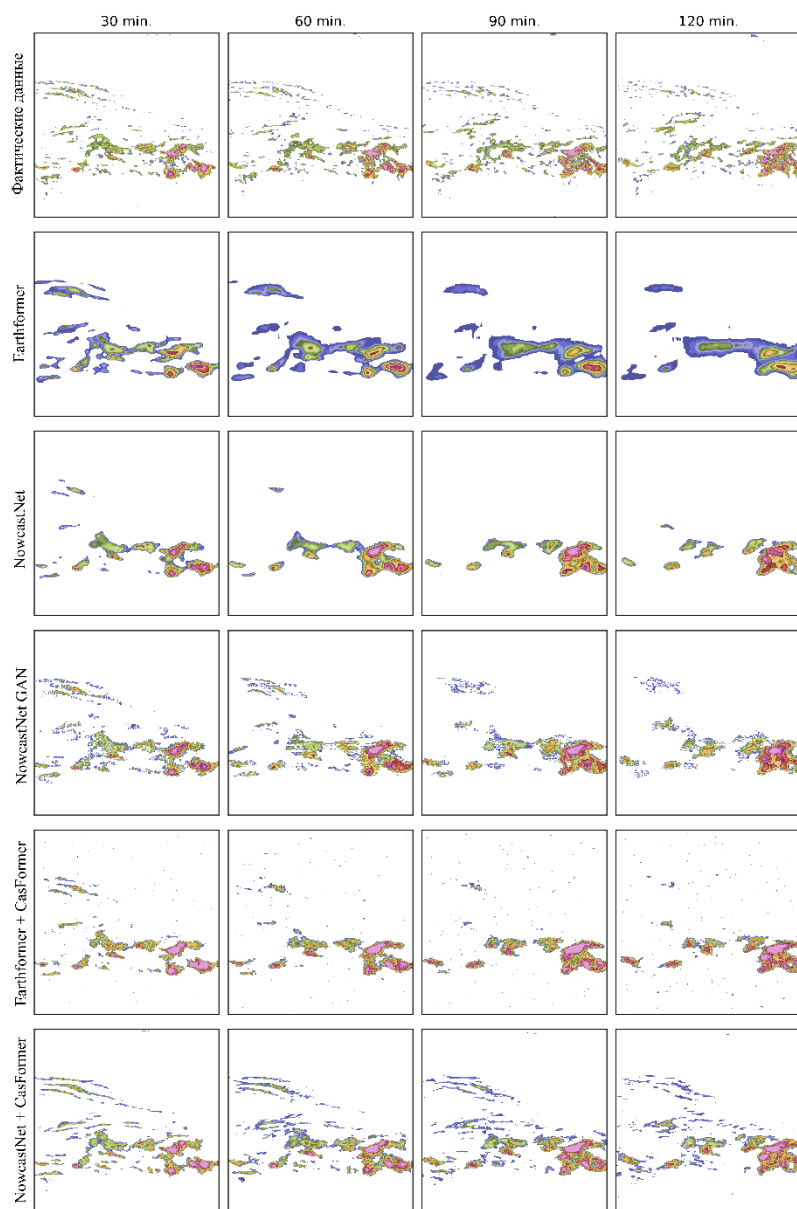
CSI>5 мм/ч – учитываются только значения выше 5 мм/ч

SSIM - Structural Similarity Index  
(индекс схожести изображений)

PSNR – Peak-to-Signal Noise Ratio  
(Пиковое соотношение сигнал-шум)



# Визуальное сравнение прогнозов различных алгоритмов

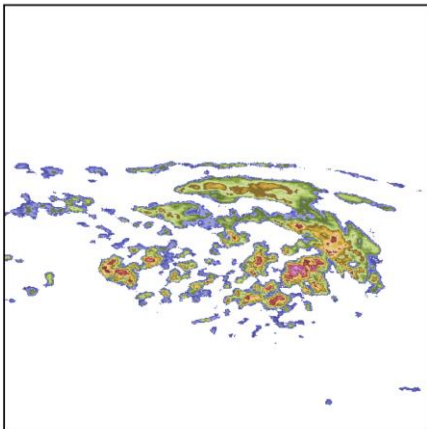
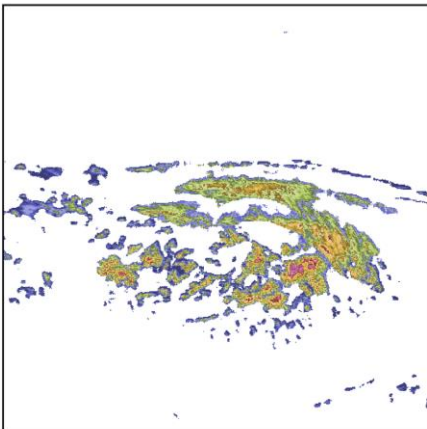


# Примеры прогнозов

forecast time: 10 min

Observations

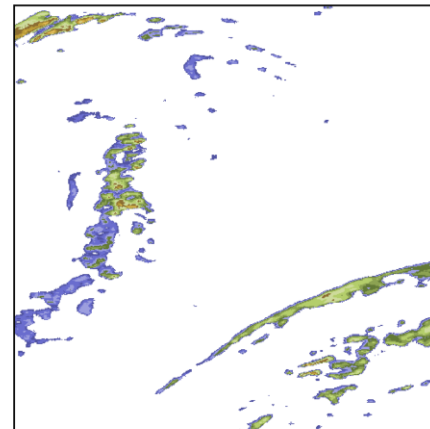
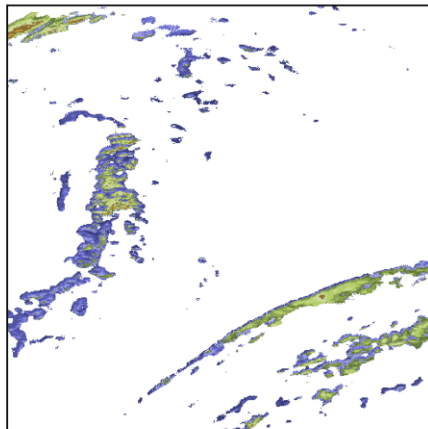
RainCast



forecast time: 10 min

Observations

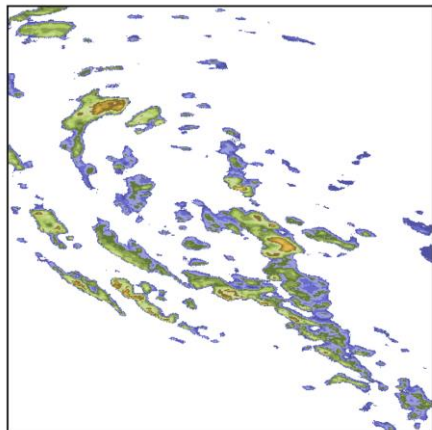
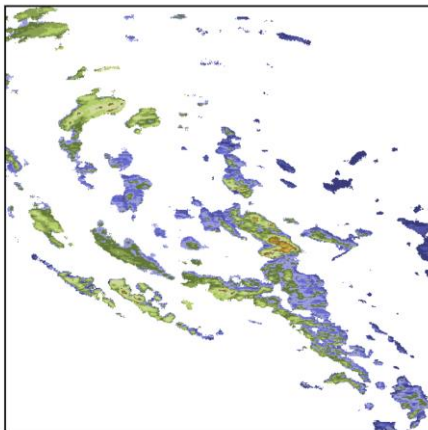
RainCast



forecast time: 10 min

Observations

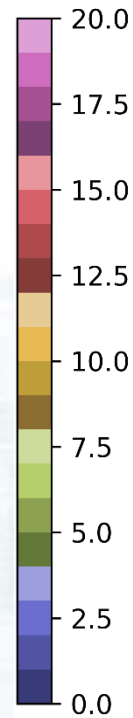
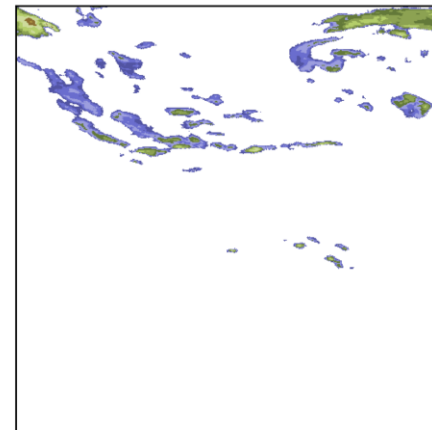
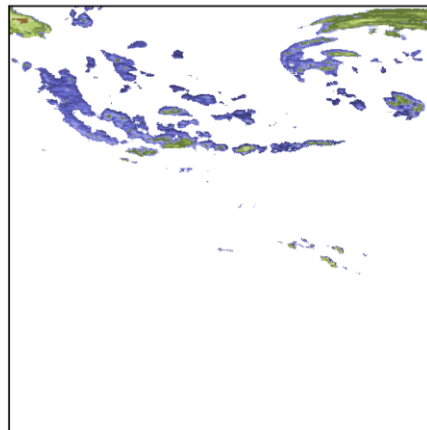
RainCast



forecast time: 10 min

Observations

RainCast





## Заключение

---

- В работе представлен гибридный алгоритм RainCast для краткосрочного прогноза осадков по спутниковым данным Himawari-8/9, объединяющий преимущества детерминированного и статистического подходов;
- Алгоритм RainCast обеспечивает более высокую детализацию и точность прогноза в сравнении с другими решениями при прочих равных условиях;
- Все существующие модели позволяют лишь приближенно оценить положение локальной облачности, для более высокой точности требуется внедрение элементов физики в прогноз, например, использование численных прогностических моделей высокого разрешения, что является перспективным направлением для дальнейших исследований;
- Алгоритм может быть адаптирован для других входных данных путем переобучения нейросетевых моделей для конкретных условий наблюдений.



# Спасибо за внимание!

Россия, г. Хабаровск, ул. Ленина, д. 18  
тел.: 8-(4212) 21-43-11 факс: 8-(4212) 21-40-07 e-mail: [kramareva@dvrpod.ru](mailto:kramareva@dvrpod.ru)