



М.О. Кучма, С.И. Мальковский, А.И. Андреев, В.Д. Блощинский, А.А. Филей, Л.С. Крамарева,  
А.В. Бородицкая, С.П. Королев, А.С. Тен

# ОПЕРАТИВНЫЙ МОНИТОРИНГ ОБЛАЧНОСТИ И ОСАДКОВ В ДАЛЬНЕВОСТОЧНОМ РЕГИОНЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Докладчик: Михаил Олегович Кучма

Двадцать вторая международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»

г. Москва, 11 – 15 ноября 2024

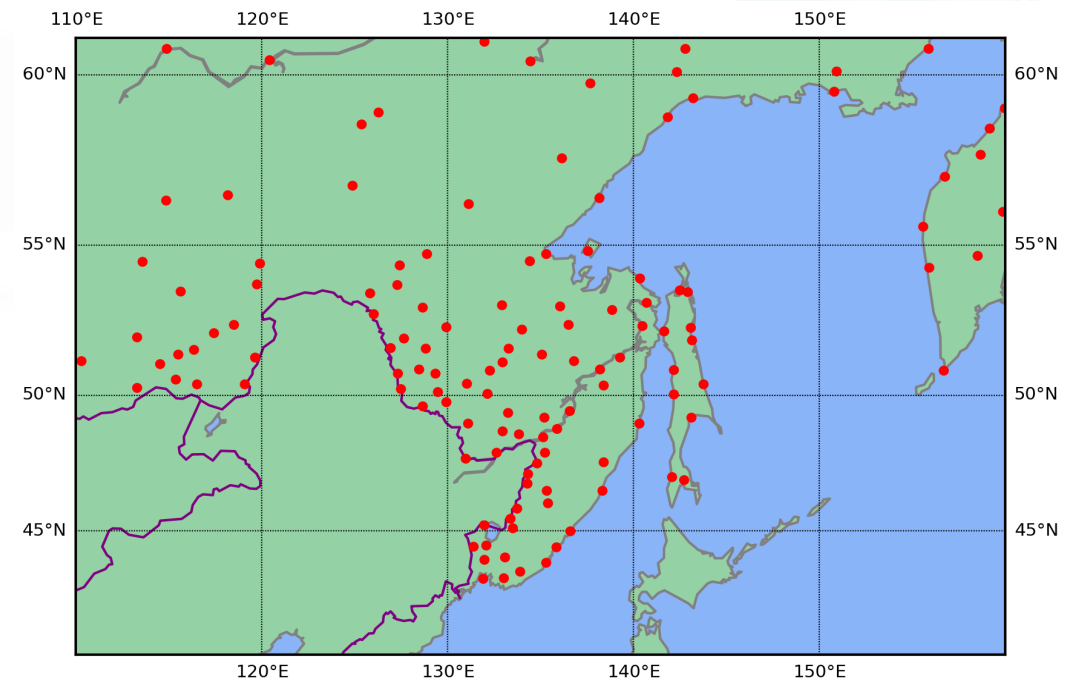
# Введение

- Количество наземных пунктов наблюдений за осадками на территории Сибири и Дальнего Востока существенно уступает среднеевропейским показателям.
- В то же время современные космические системы дистанционного мониторинга позволяют получать данные практически в любой точке Земли.
- Рассчитываемые с использованием спутниковых измерений карты интенсивностей осадков способны существенно дополнить и уточнить информацию о распределении осадков, особенно в труднодоступных районах с редкой сетью наземных наблюдений.

## Зона покрытия наземных радиолокаторов

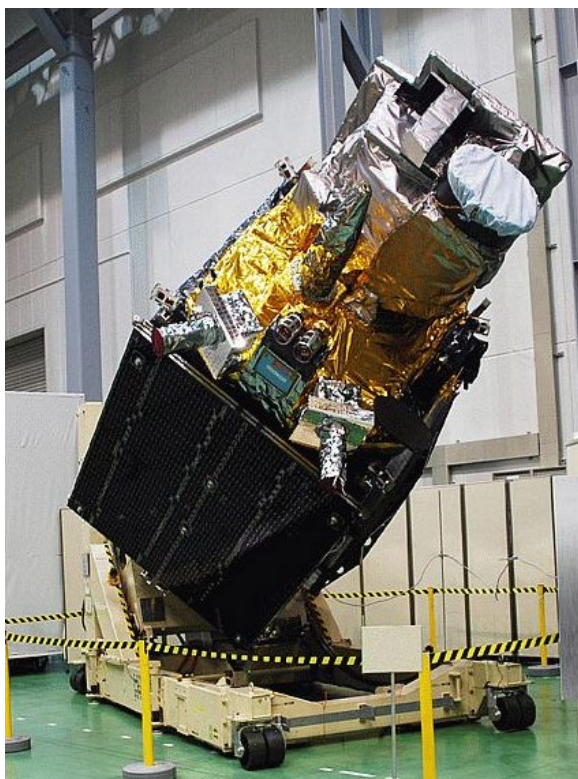


## Распределение наземных метеостанций



# Используемые данные

В Дальневосточном регионе для мониторинга осадков используются космические аппараты Himawari-9, Электро-л №4, а также аппараты серии «Арктика-М».



**КА Himawari-8/9**

Периодичность съемки 10 минут  
Разрешение 2 км  
16 спектральных диапазонов



**КА Электро-Л №4**

Периодичность съемки 15 минут  
Разрешение 4 км  
10 спектральных диапазонов



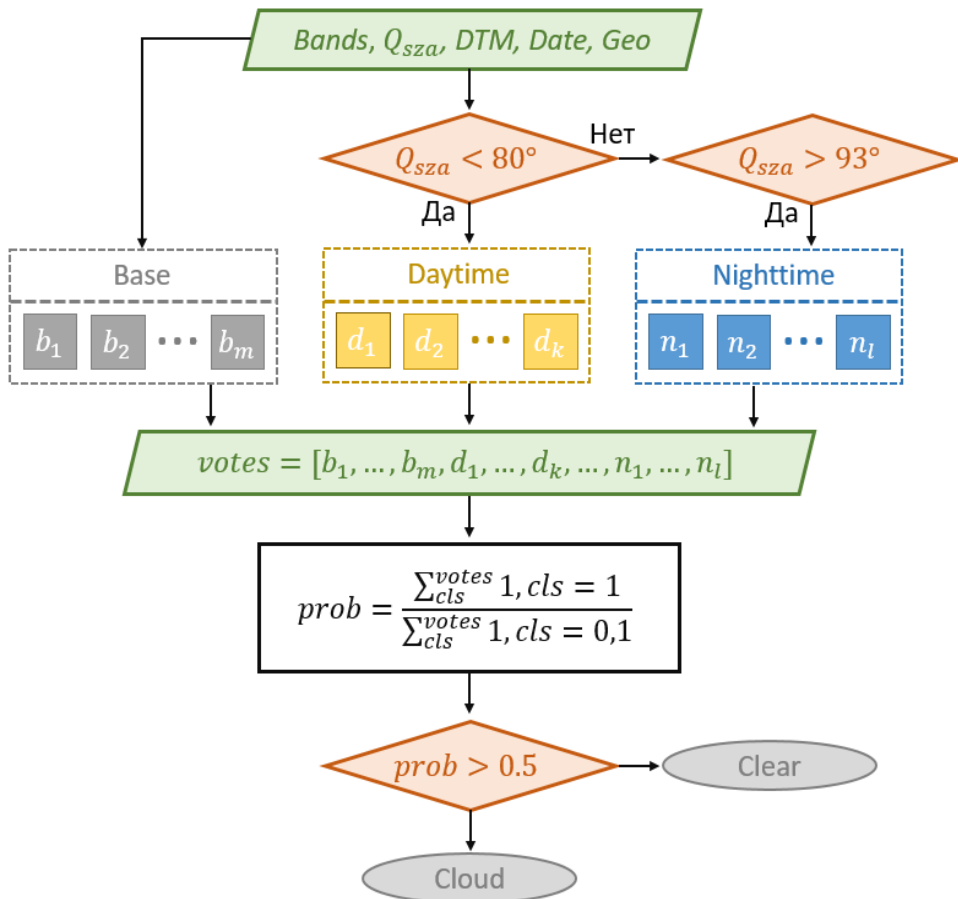
**КА Арктика-М №1,2**

Периодичность съемки 15 минут  
Разрешение 4 км  
10 спектральных диапазонов

# Маска облачности Himawari

Мониторинг облачности начинается с ее обнаружения на спутниковых изображениях. С этой целью для КА Himawari-8/9 разработан алгоритм расчета маски облачности, основанный на ансамбле сверточных нейронных сетей.

## Блок-схема алгоритма расчета маски облачности по данным Himawari-9



<i>Bands</i>	Спектральные каналы
<i>Q<sub>sza</sub></i>	Зенитный угол Солнца
<i>DTM</i>	Цифровая модель рельефа
<i>Date</i>	День в году
<i>Geo</i>	Широта и долгота
<i>prob</i>	Вероятность наличия облачности
<i>votes</i>	Вектор с результатами классификации каждой отдельной модели
<i>Cloud</i>	Класс наличия облачности
<i>Clear</i>	Класс отсутствия облачности

Группы классификаторов:

*Base* – базовая для всего изображения;

*Daytime* – применяется на освещенных Солнцем участках;

*Nighttime* – используются только ИК-каналы.

Обучающая выборка состоит из текстурных изображений размером 5x5 пикселей;

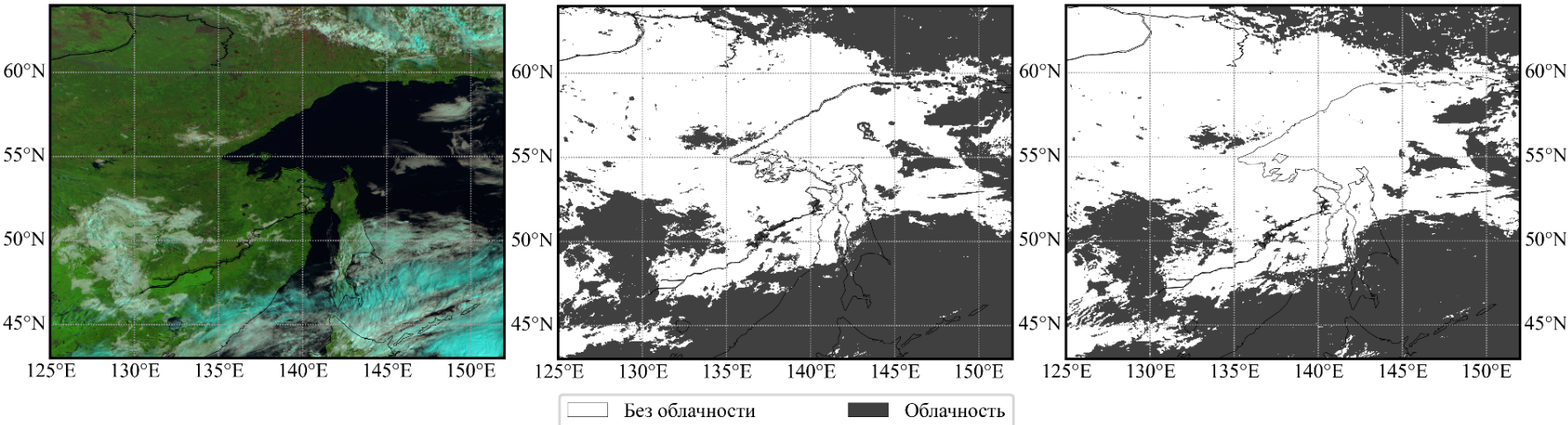
Центральному пикселю текстуры присвоена метка класса (0 или 1).

Общий объем выборки составил около 93 тыс. текстур.

Указанный набор данных охватывает временной промежуток с 2016 по 2023 г.

# Маска облачности Himawari

28.08.2023 00:00 UTC



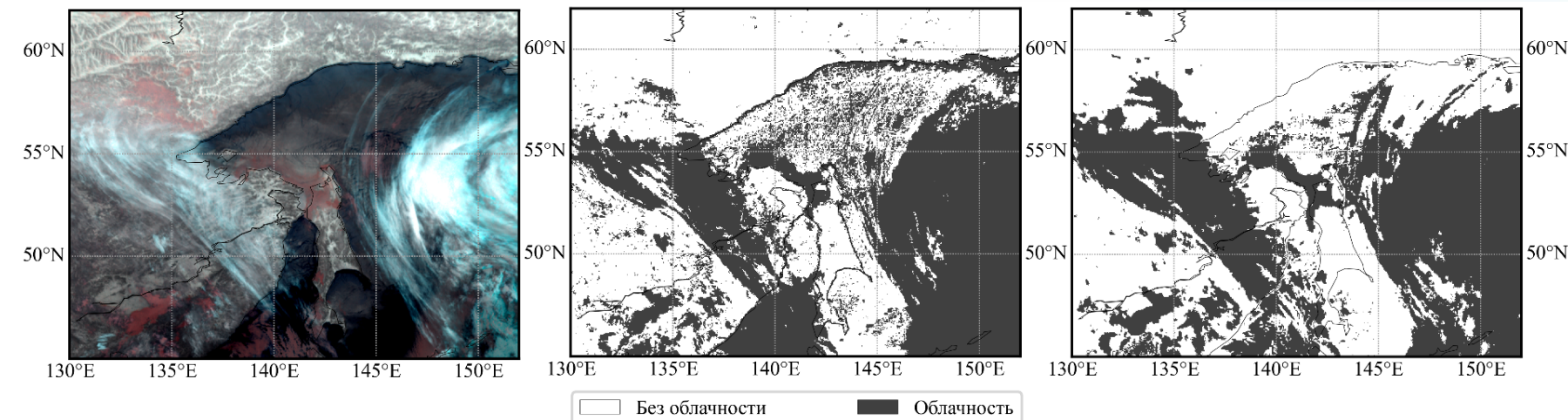
(a)

(б)

(v)

**(a)** RGB-синтез каналов:  
R=0,65, G=0,86, B=1,61 мкм  
(верхний рисунок),  
R=3,85, G=11,20, B=12,35 мкм  
(нижний рисунок);  
**(б)** маска облачности по данным  
NOAA;  
**(v)** маска облачности,  
рассчитанная представленным в  
работе алгоритмом.

28.02.2024 21:00 UTC



(a)

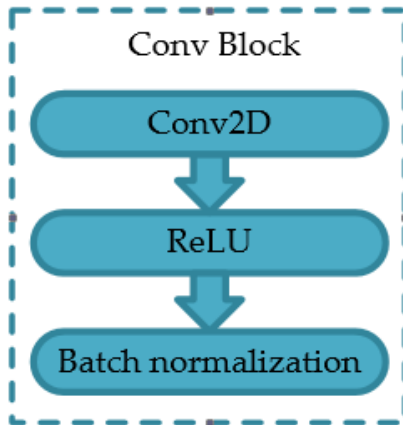
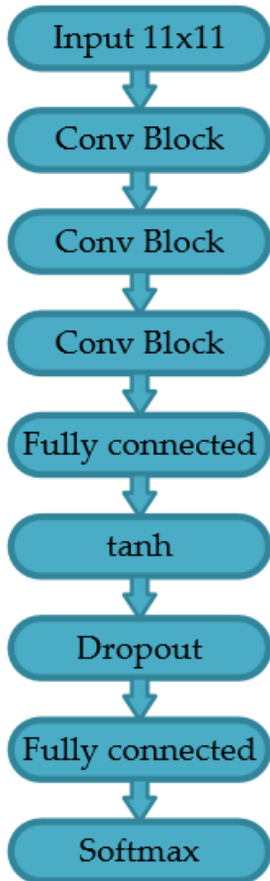
(б)

(v)

Значение F1-меры в сравнении с  
маской облачности Himawari по  
данным NOAA: 87,5% и 83,98%  
для светлого и темного времени  
суток

# Маска облачности Электро-Л

## Архитектура нейронной сети



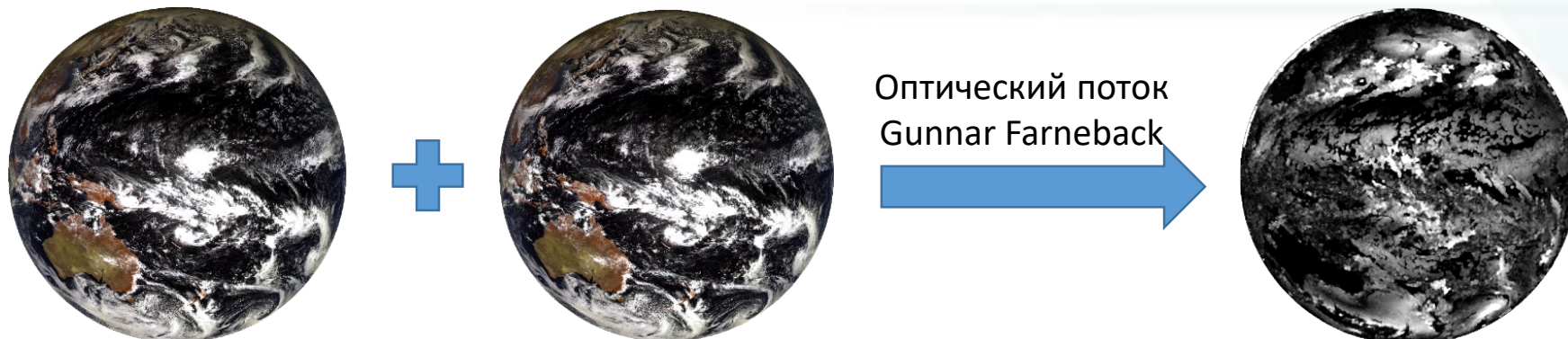
- **Input 11x11** – входной слой текстур;
- **Conv2D** – сверточный слой;
- **ReLU** –линейная функция активации;
- **Batch normalization** – слой нормализации;
- **Fully connected** – полносвязный слой;
- **tanh** – функция активации на осн. гиперб. тангенса;
- **Dropout** – регуляризационный слой;
- **Softmax** – логистическая функция Softmax.

## Обучающая выборка

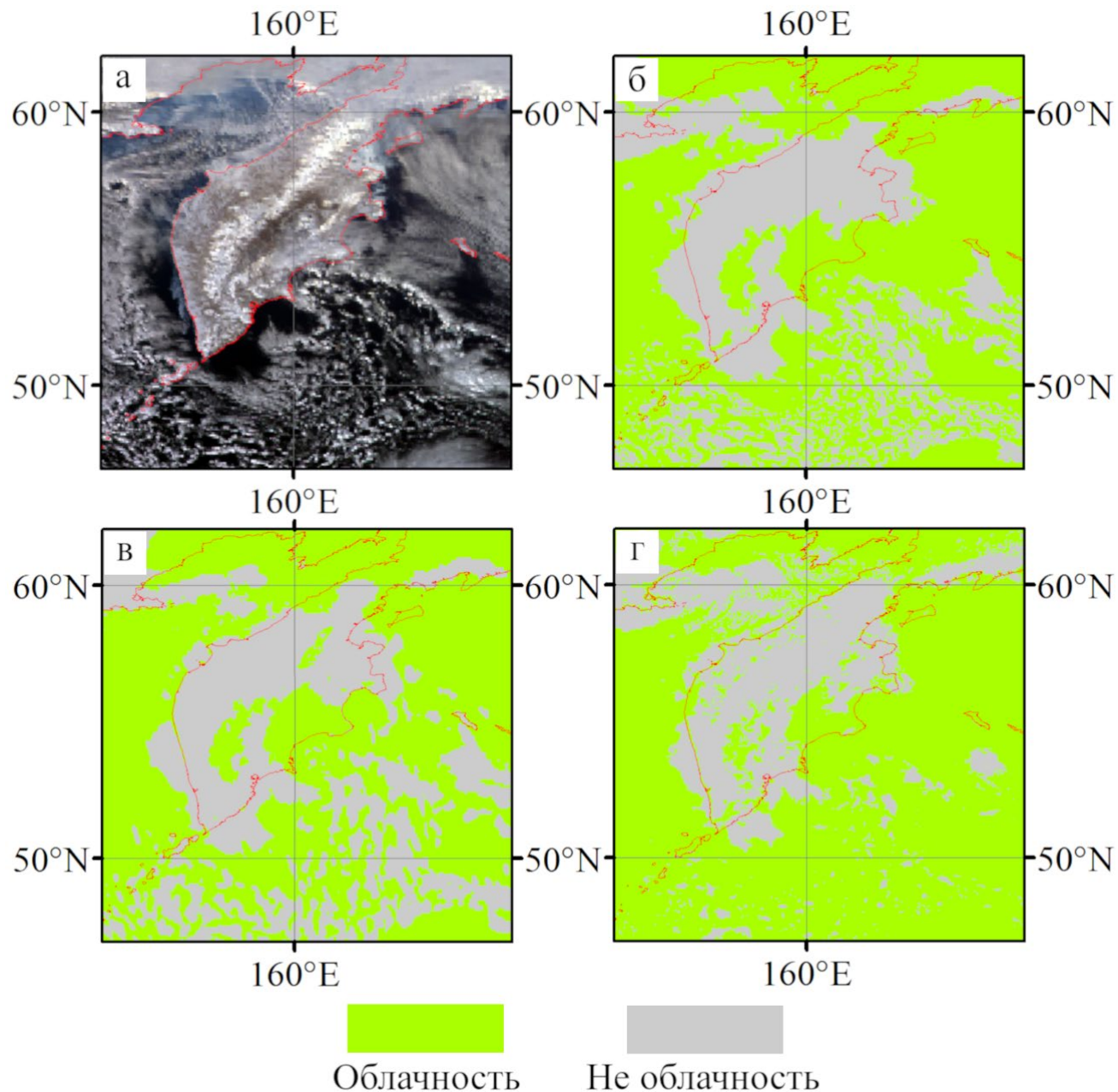
Текстурные изображения 2-х классов: облачность и не облачность (земля, вода, снег и др.);

- Период: с декабря 2023 по март 2024;
- Размер текстур составляет 11x11 пикселей;
- Общий объем выборки: 10 тыс. текстур., 70% для обучения, 30% для тестирования

## Дополнительный тест на наличие движения



# Маска облачности Электро-Л



(а) – спутниковое изображение в видимом диапазоне спектра прибора МСУ-ГС

(б) – маска, полученная специалистом дешифровщиком

(в) – маска, полученная предлагаемым классификатором

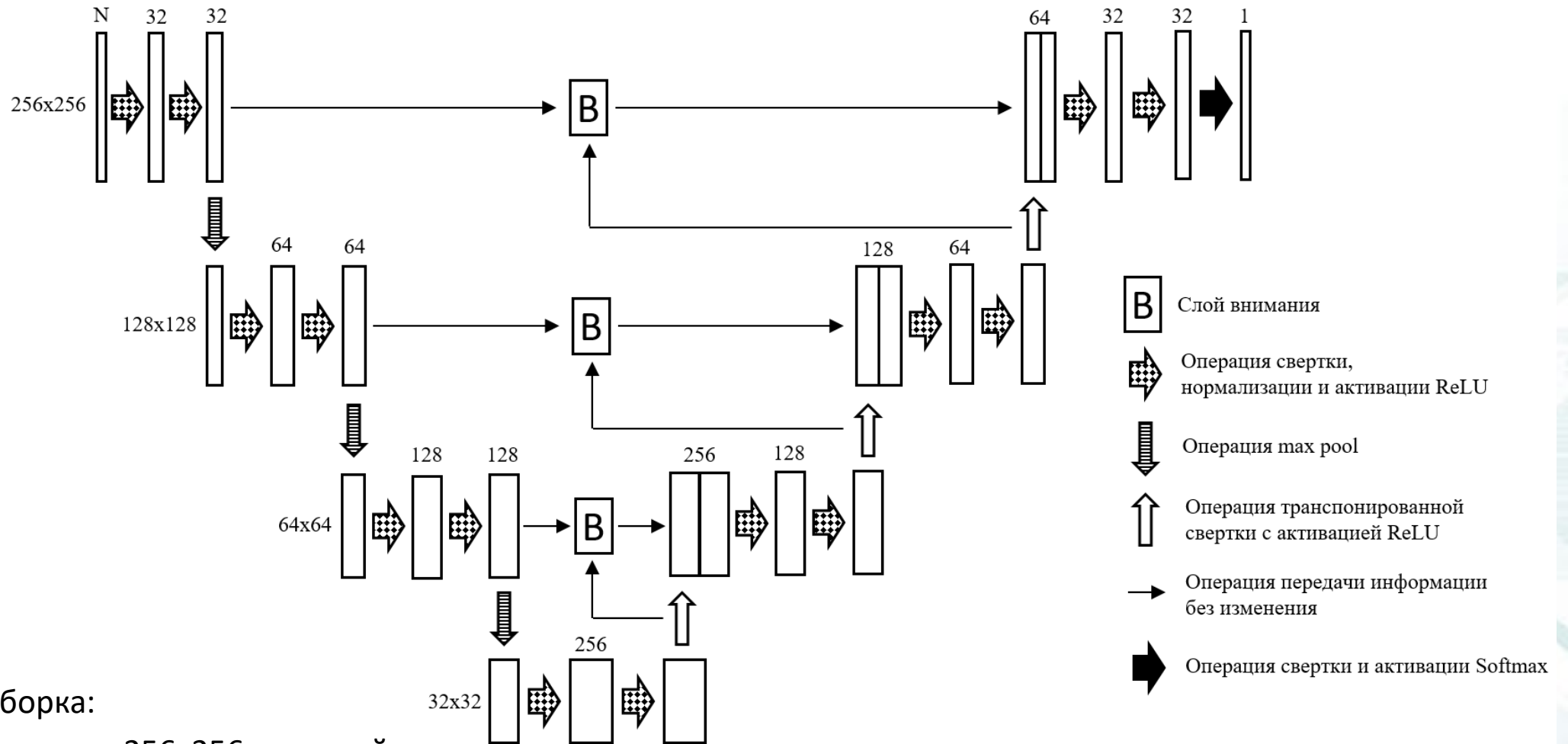
(г) – маска, по данным АИ

**Сходство масок по данным МСУ-ГС и АИ  $\approx 92.8\%$**

**Точность масок по данным МСУ-ГС  $\approx 93.1\%$**

# Маска облачности Арктика-М

## Архитектура модели-классификатора на основе сети UNet

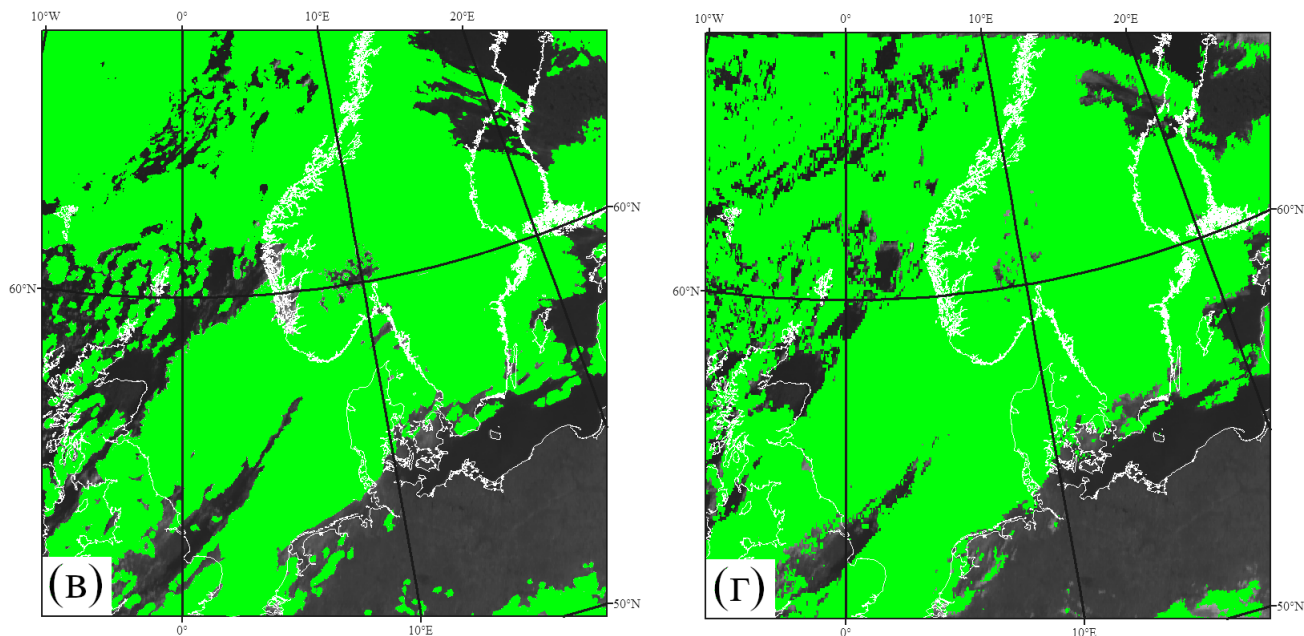
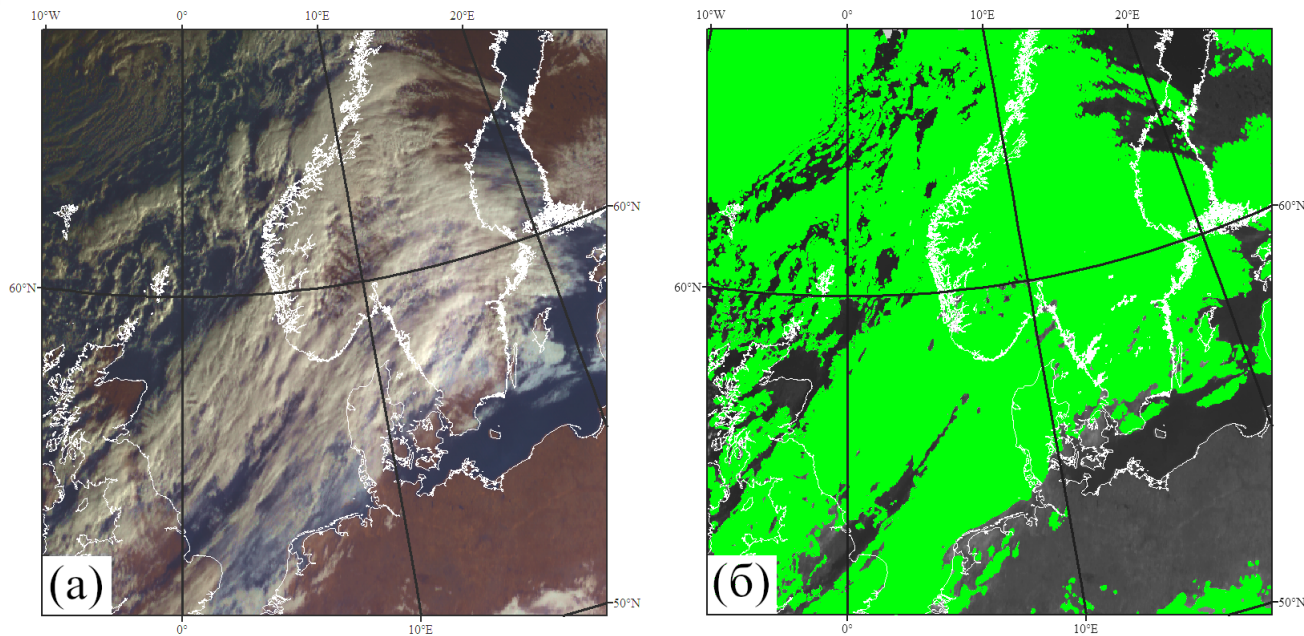


Обучающая выборка:

- Сегменты размером 256x256 пикселей;
- Маски классифицировались вручную опытными специалистами;
- Выборка охватывает период с июня 2022 по март 2023
- Общий объем выборки: 17 тыс. сегментов



# Маска облачности Арктика-М



(а) – спутниковое изображение в видимом диапазоне спектра прибора МСУ-ГС

(б) – маска, полученная специалистом дешифровщиком

(в) – маска, полученная предлагаемым классификатором

(г) – маска, по данным SEVIRI

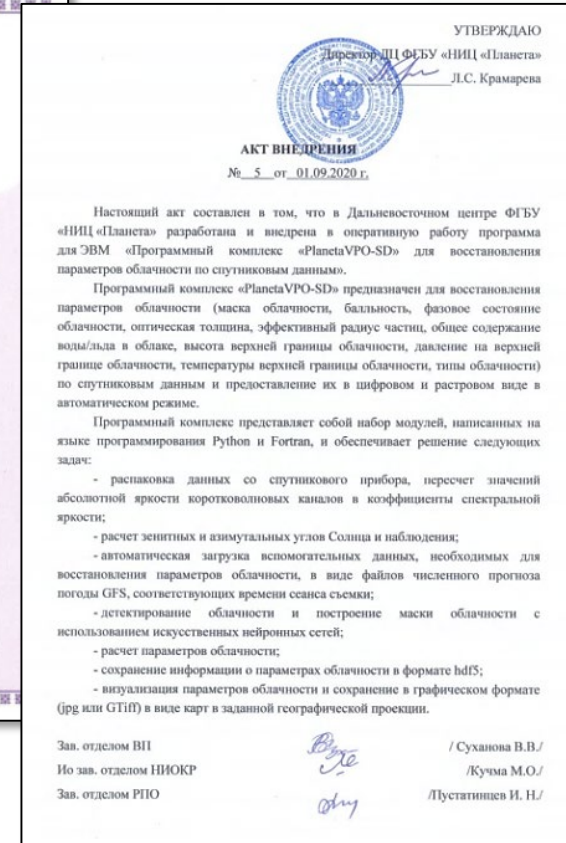
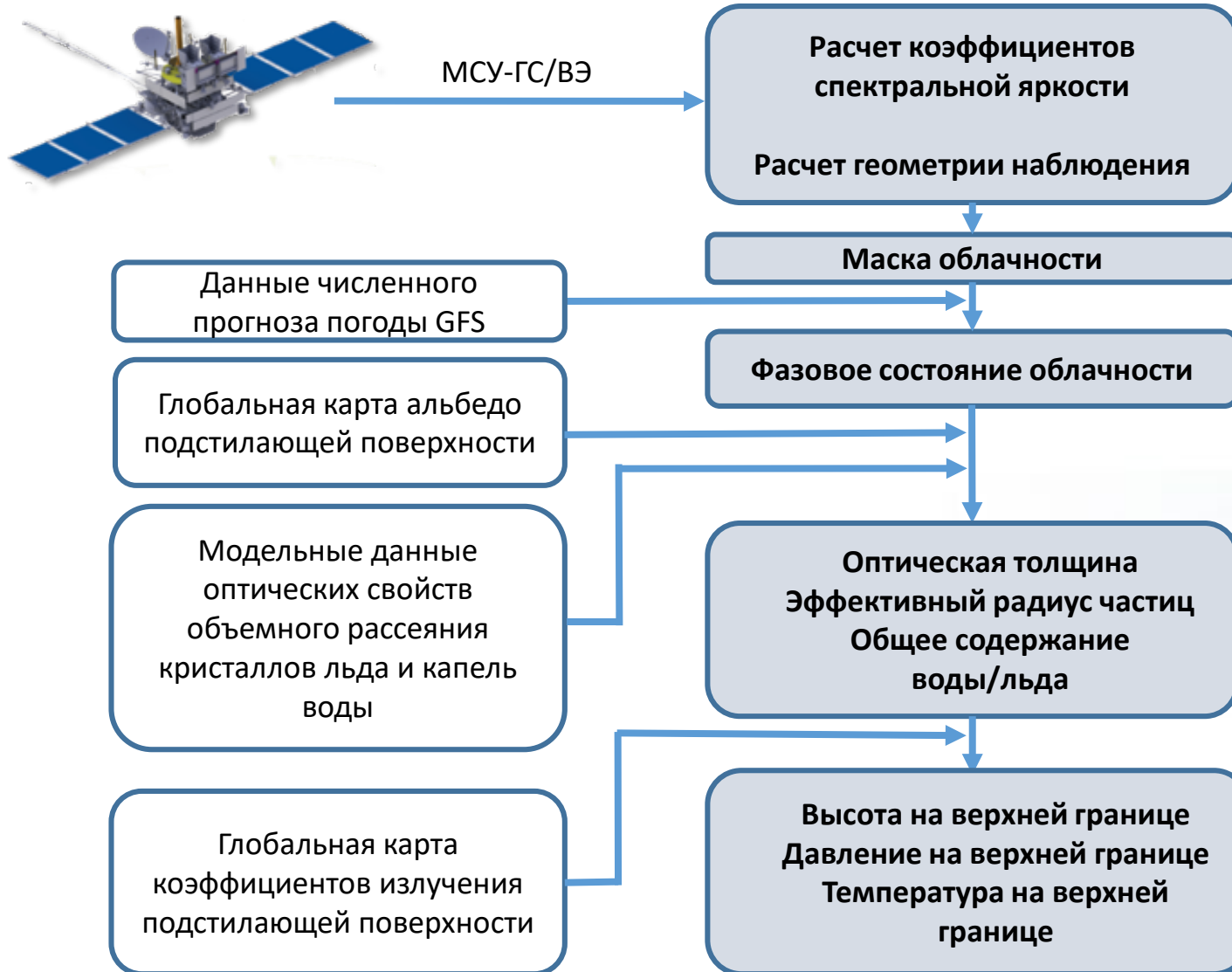
**Сходство масок по данным МСУ-ГС и SEVIRI  $\approx 93\%$**

**Точность масок по данным МСУ-ГС  $\approx 92\%$**

**Точность масок по данным SEVIRI  $\approx 94\%$**

# Оценка параметров облачности на верхней границе

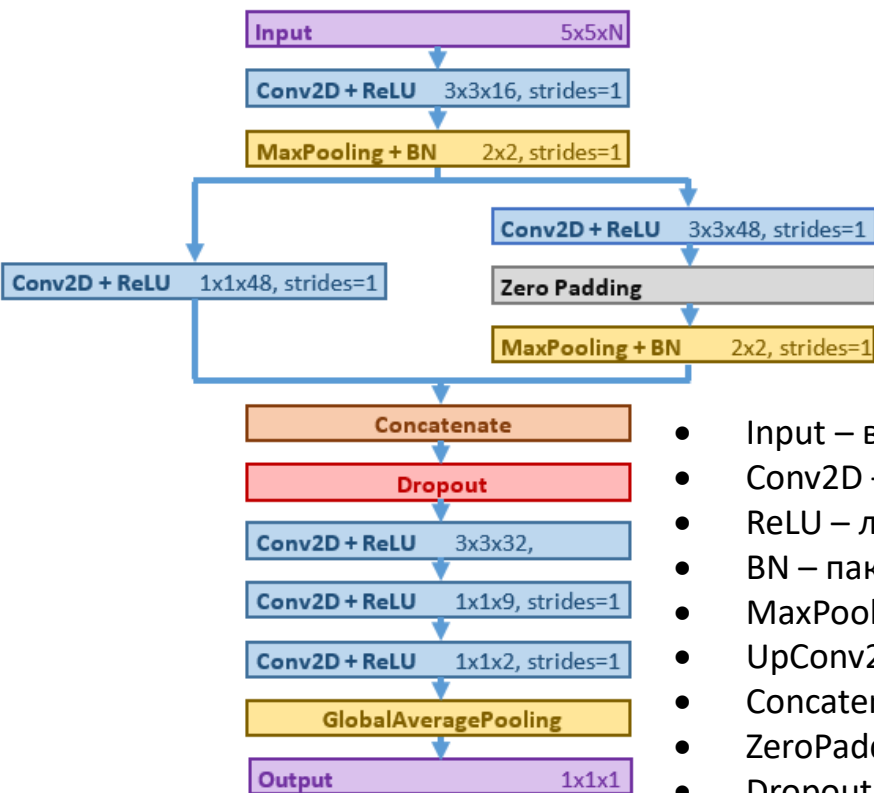
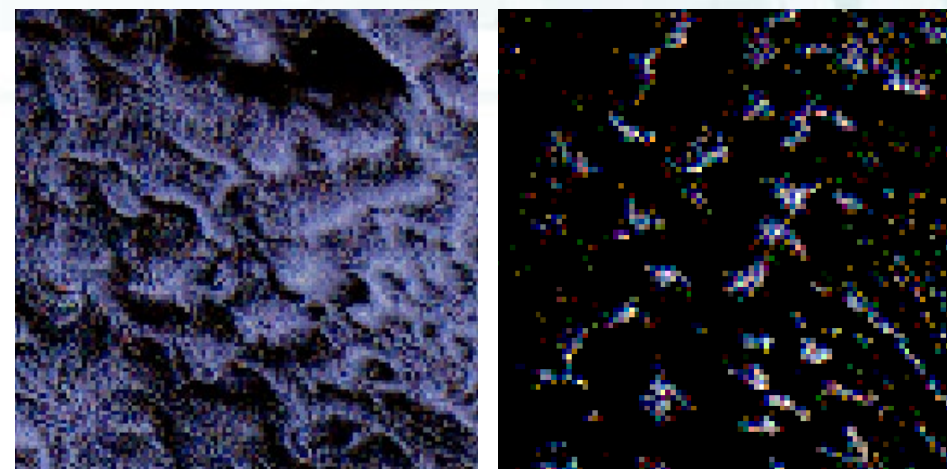
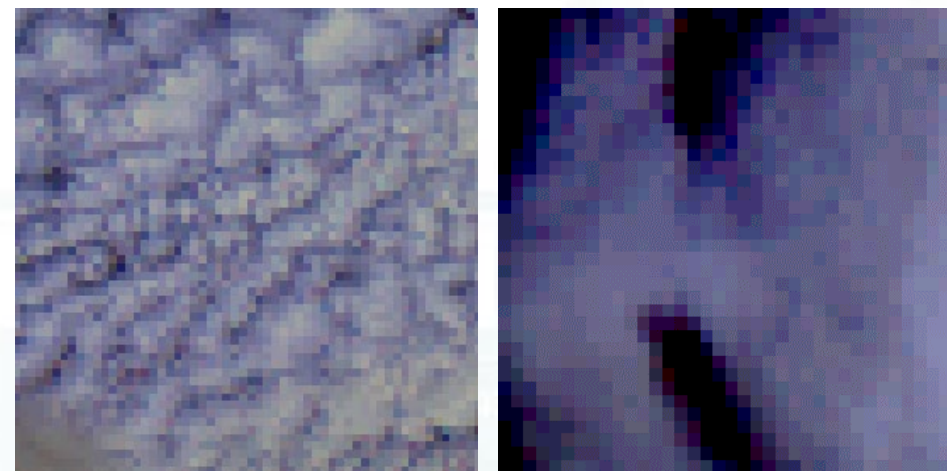
ПК «Planeta VPO-SD» - программный комплекс восстановления параметров облачности по спутниковым данным



# Классификация типов облачности

Алгоритм основан на нейросетевом методе классификации, где в качестве исходной информации используется набор предварительно рассчитанных микро- и макрофизических параметров облачности на верхней границе. Для отдельных типов облачности слоистых и кучевых форм используется метод текстурной классификации на основе сверточной нейронной сети.

## Примеры текстур облаков



- Input – входное изображение;
- Conv2D – операция свертки;
- ReLU – линейная функция активации;
- BN – пакетная нормализация данных;
- MaxPooling – сжатие признаков;
- UpConv2D – обратная свертка;
- Concatenate – объединения тензоров;
- ZeroPadding – дополнения нулями;
- Dropout – метод регуляризации;
- GlobalAveragePooling – усреднение;
- Output – выходная информация.

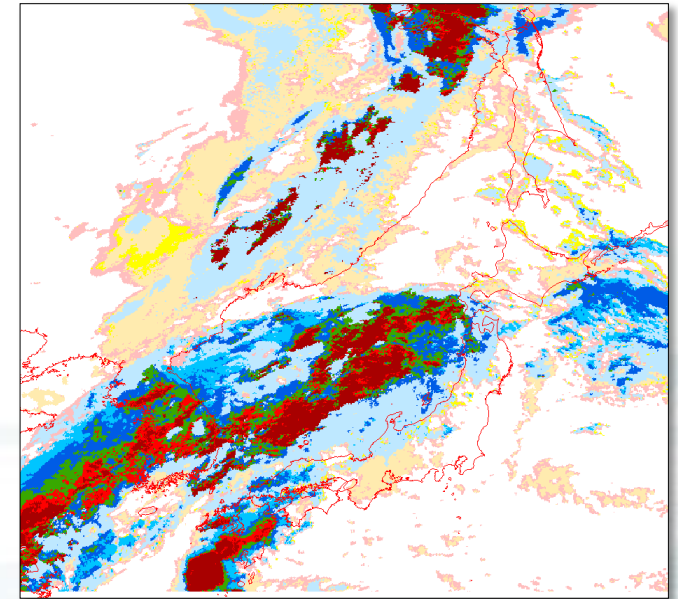
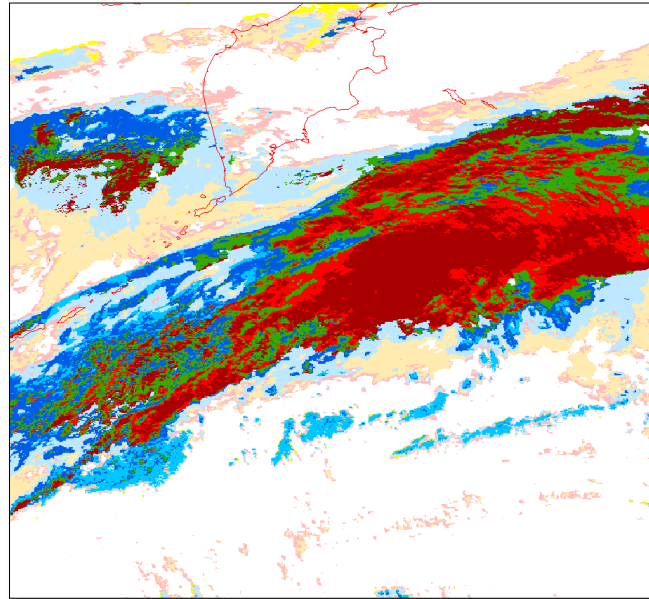
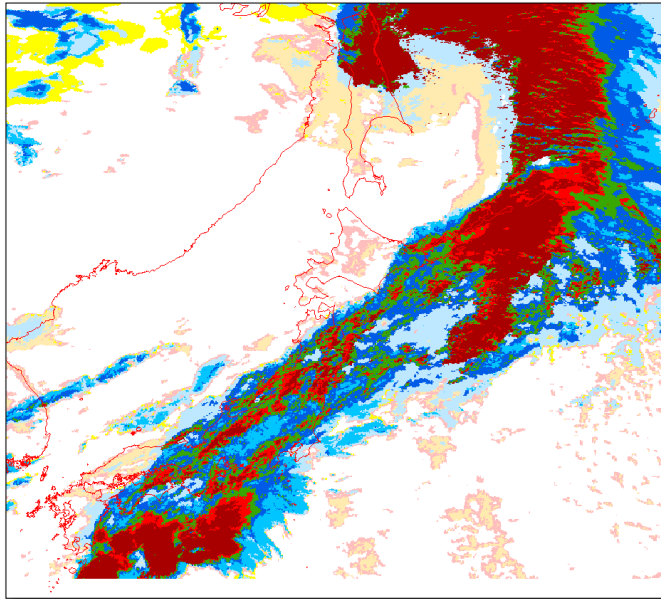
# Классификация типов облачности (Арктика-М №2)

16.10.2024 01:00 UTC

08.10.2024 00:30 UTC

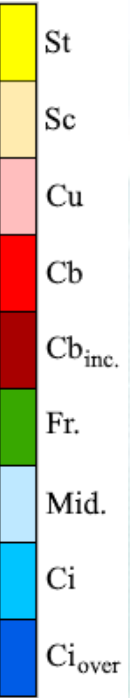
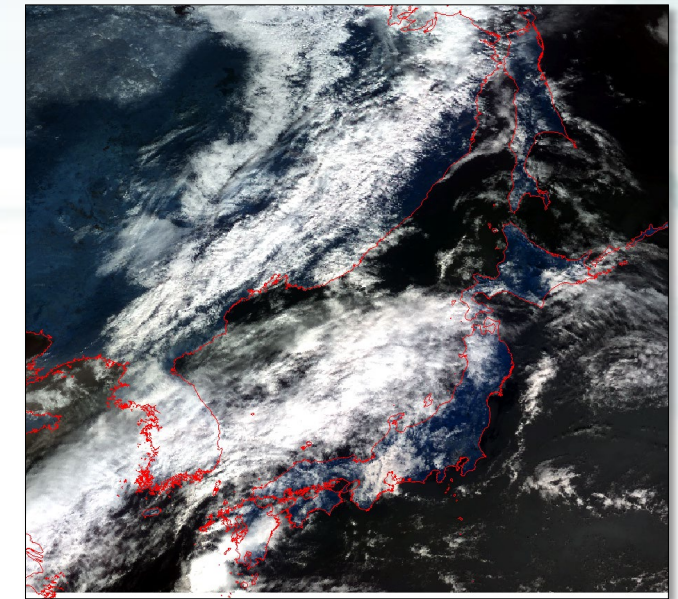
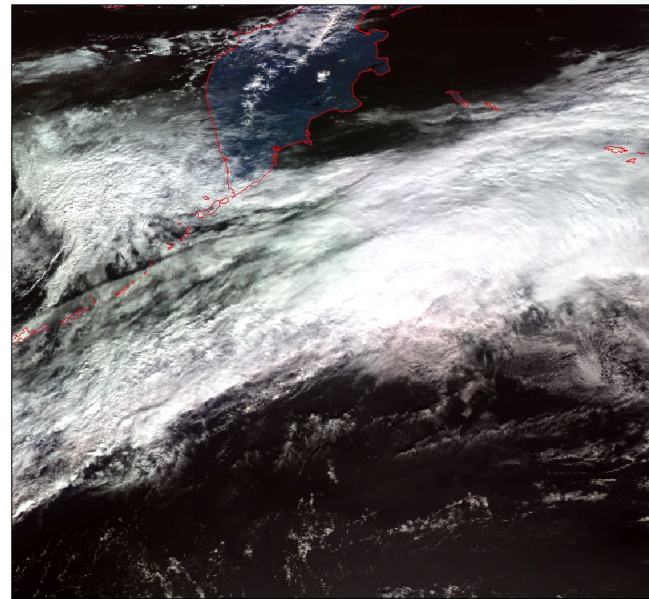
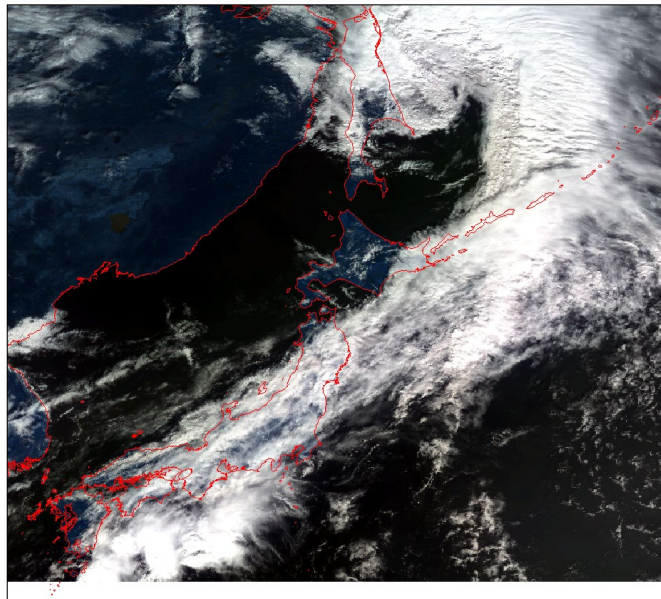
15.10.2024 02:00 UTC

Типы облачности



RGB синтез каналов

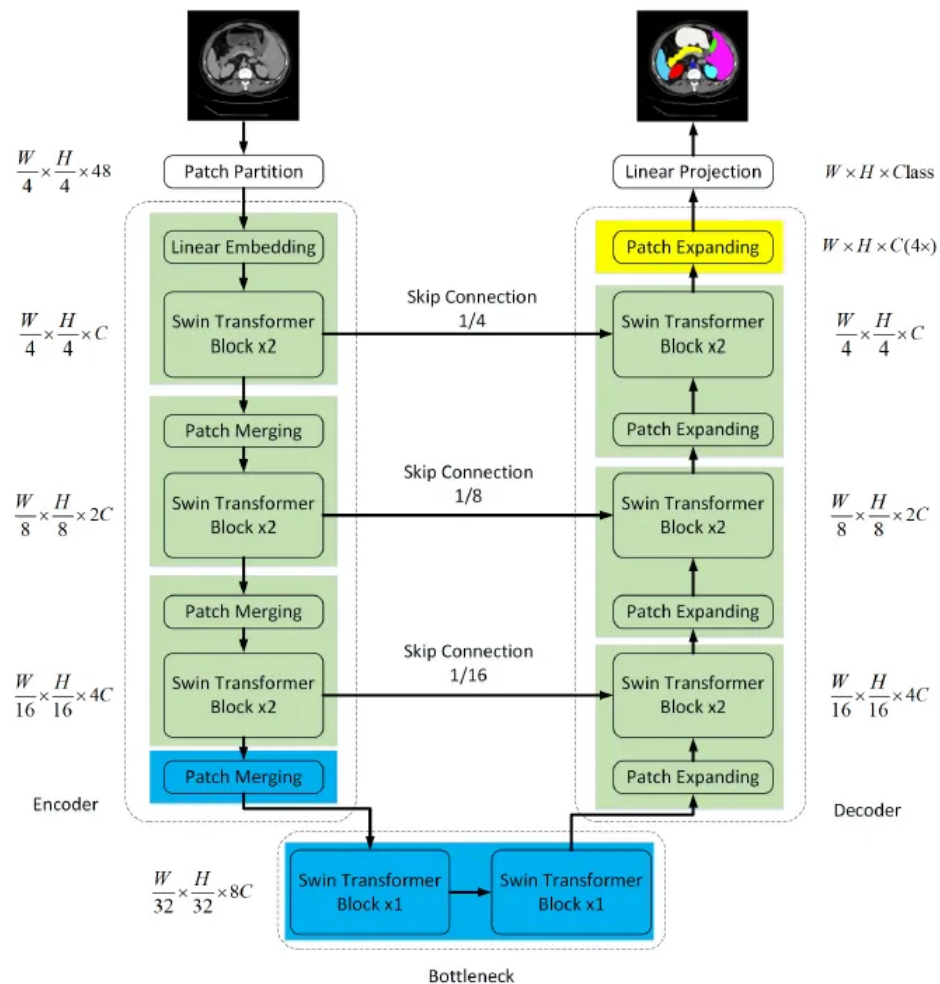
(R: 0.64, G: 0.86, B: 1.6 мкм)



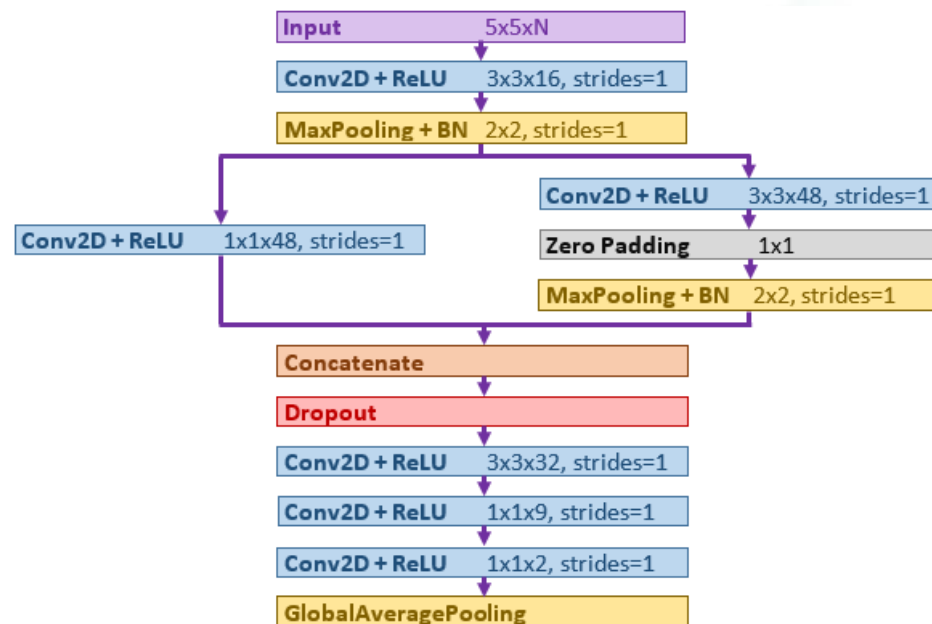
# Оценка интенсивности осадков

Метод основан на моделировании зависимости между параметрами облачности, ее спектральными и текстурными характеристиками и мгновенной интенсивностью (мм/ч) осадков на ВГО.

**Модель классификации**  
Визуальный Трансформер SWIN-Unet



**Модель регрессии**  
Полносверточная нейронная сеть



# Эталонные данные

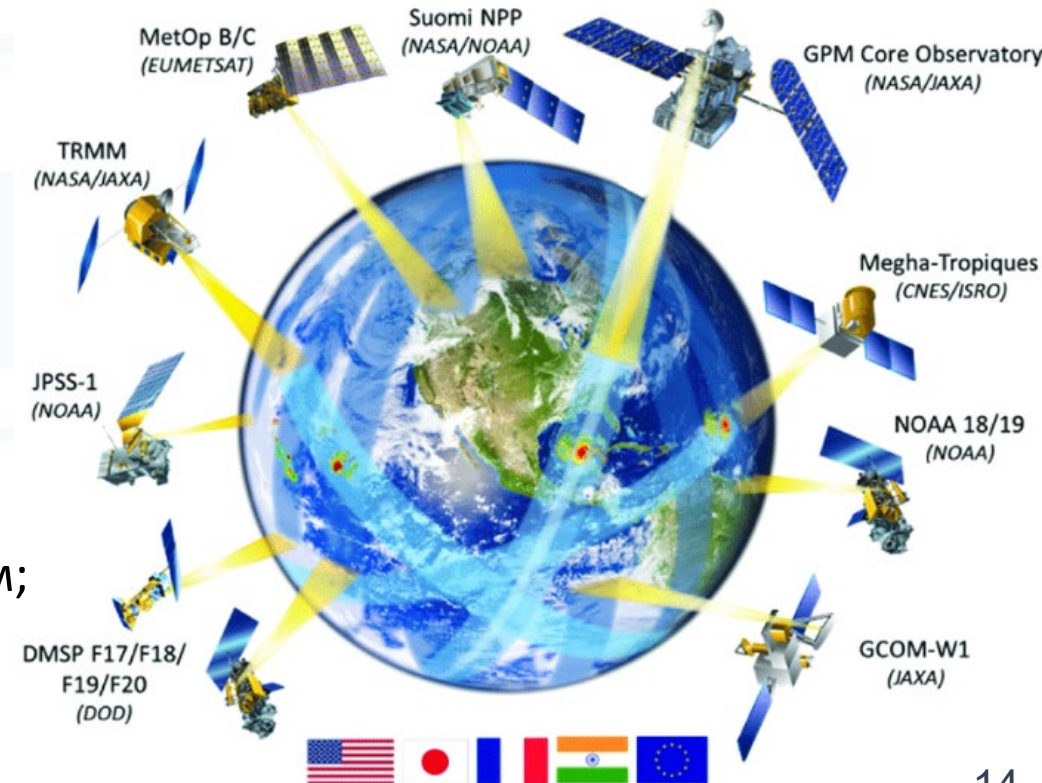
В виду ограниченности данных наземных наблюдений, в качестве источника информации об осадках для обучения алгоритма использовались измерения, проводимые в рамках международной миссии GPM (Global Precipitation Measurement).

Эти измерения представлены в виде композитных карт интенсивностей осадков по данным полярно-орбитальных и геостационарных космических аппаратов с приборами ИК и микроволнового спектра.

- Выпускается каждые 30 минут;
- Пространственное разрешение  $0.1^\circ$ ;
- Эффективное покрытие  $60^\circ\text{S} - 60^\circ\text{N}$ ;
- Композит измерений доступных на момент наблюдения;
- Калибровка геостационарных измерений по микроволновым;
- Задержка данных с момента наблюдений от 4 часов;



<https://gpm.nasa.gov>

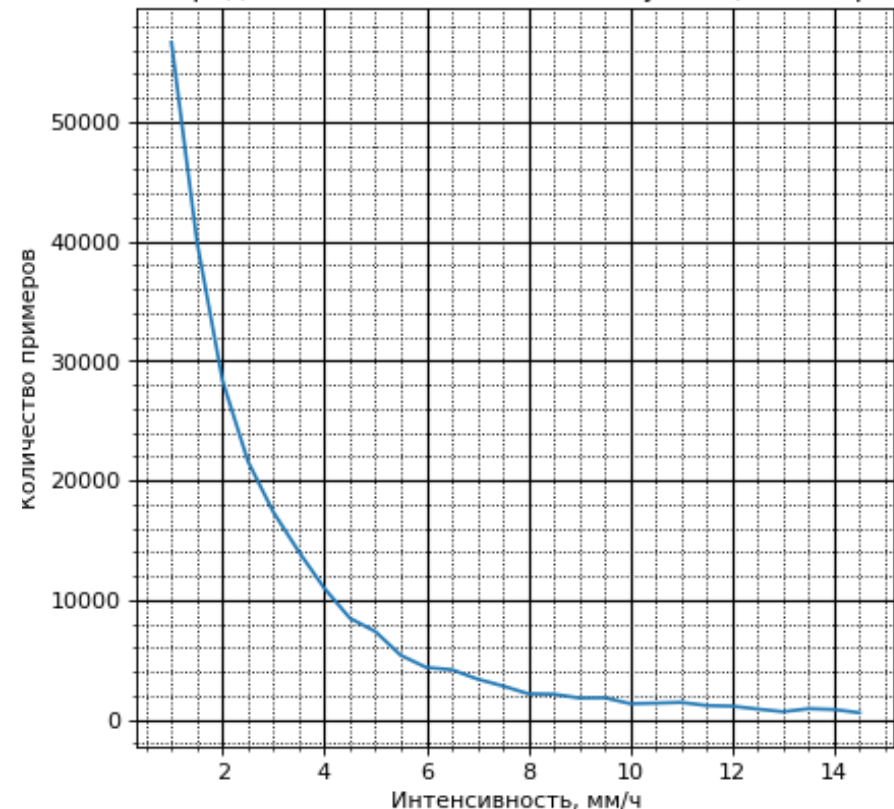


# Обучающая выборка

**Выборка полей осадков** представлена в виде многоканальных изображений размером 256x256 пикселей и соответствующих им масок осадков того же размера по данным GPM IMERG.

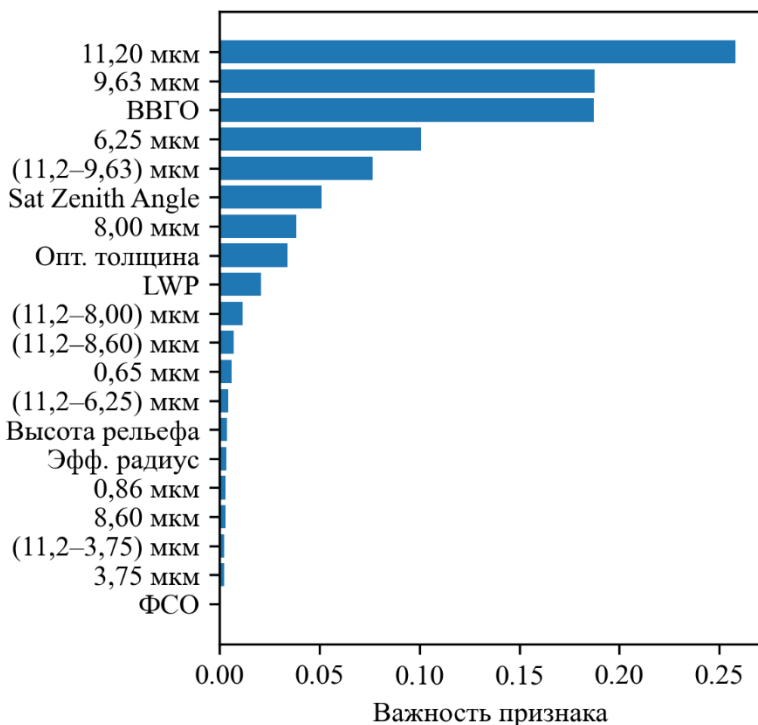
**Выборка значений интенсивности** состоит из текстурных изображений размером 5x5 пикселей, где значение интенсивности сопоставлено с центральным пикселем текстуры.

Распределение интенсивности в обучающей выборке

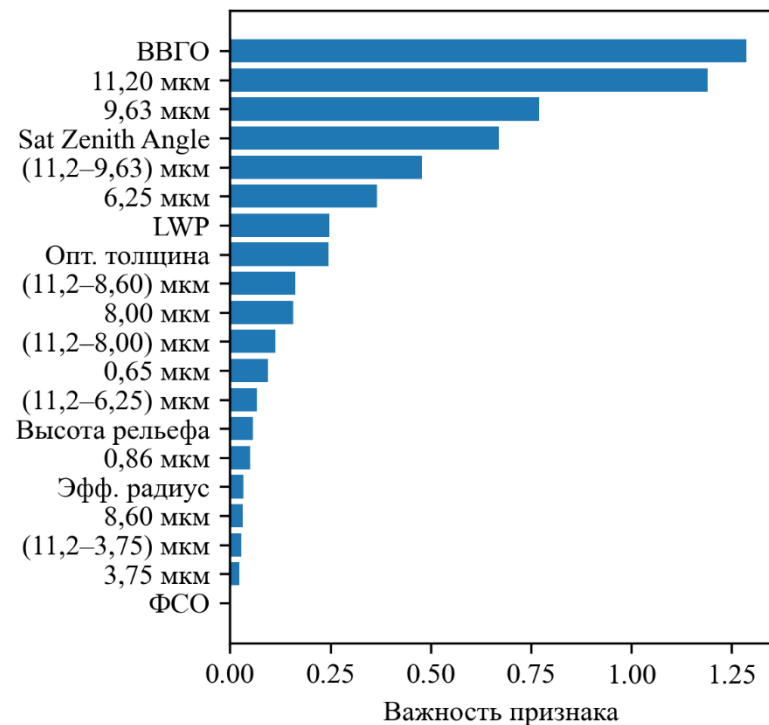


## Анализ влияния входных признаков на точность регрессии

Метод Gini



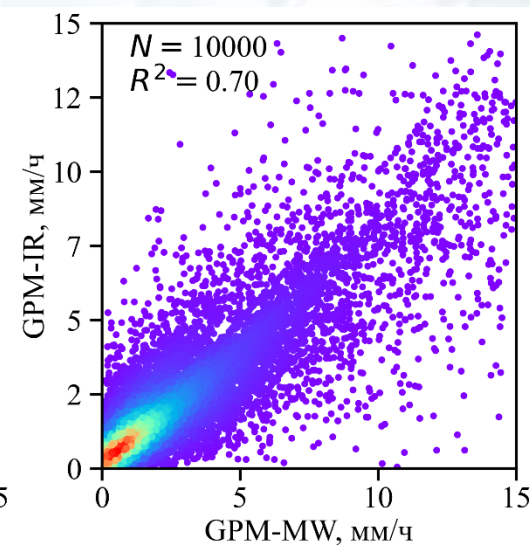
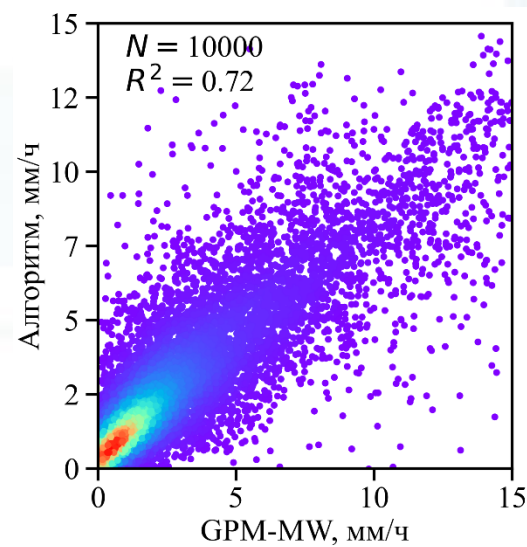
Метод SHAP



# Оценка качества (Электро-Л №4)

Период	POD	FAR	CSI	F1	RMSE, мм/ч	Bias, мм/ч	Коэф. корр.
Июнь-сентябрь, дневное время, 23:00 – 6:00 UTC	0.56	0.19	0.53	0.68	1.24	0.13	0.74
Июнь-сентябрь, ночное время, 12:00–18:00 UTC	0.55	0.20	0.51	0.67	1.32	0.14	0.71
Ноябрь-январь, дневное время, 23:00 – 6:00 UTC	0.41	0.27	0.36	0.50	1.23	0.17	0.59
Ноябрь-январь, ночное время, 12:00–18:00 UTC	0.36	0.18	0.35	0.49	1.10	0.22	0.63
<b>Весь период</b>	<b>0.46</b>	<b>0.21</b>	<b>0.44</b>	<b>0.59</b>	<b>1.27</b>	<b>0.17</b>	<b>0.67</b>

Период	Тип пов-ти	Ошибка	< 3 мм/ч	3-10 мм/ч	10-20 мм/ч	>20 мм/ч
Июнь-сентябрь	Суша	RMSE	0.83	1.78	3.46	5.19
		Bias	-0.04	1.04	2.60	4.29
	Море	RMSE	1.10	2.07	4.17	6.33
		Bias	-0.10	1.10	3.12	5.15
Ноябрь-январь	Суша	RMSE	0.56	1.75	3.70	4.67
		Bias	0.11	1.18	2.96	3.87
	Море	RMSE	0.99	2.15	4.10	6.08
		Bias	-0.05	1.29	3.15	5.19



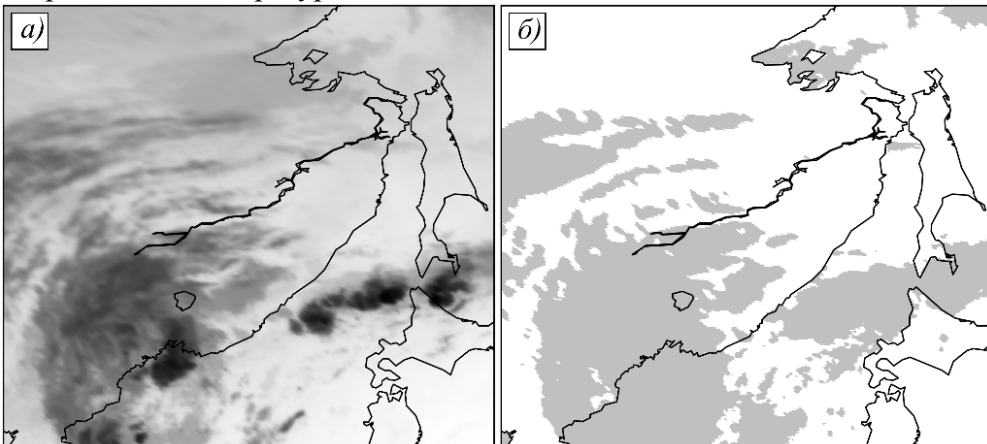


# Примеры карт осадков (Электро-Л №4)

24.08.2023 19:00 UTC

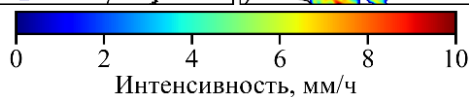
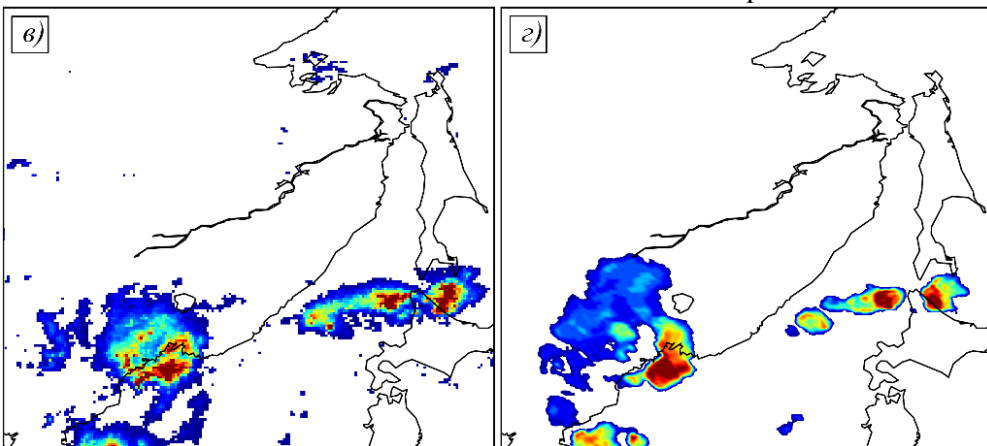
Яркостная температура 10.7 мкм

Маска облачности



GPM-MW

Алгоритм

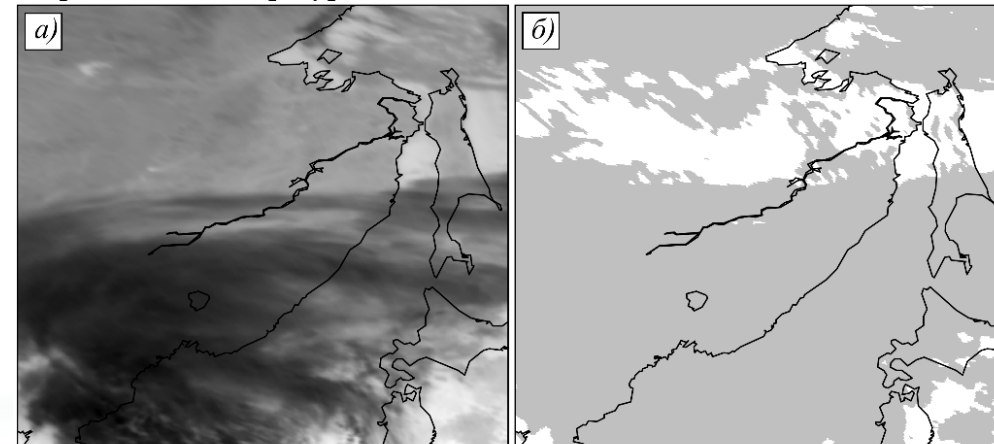


Интенсивность, мм/ч

5.11.2023 18:00 UTC

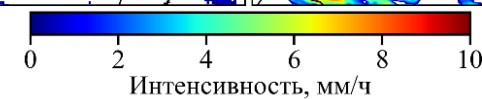
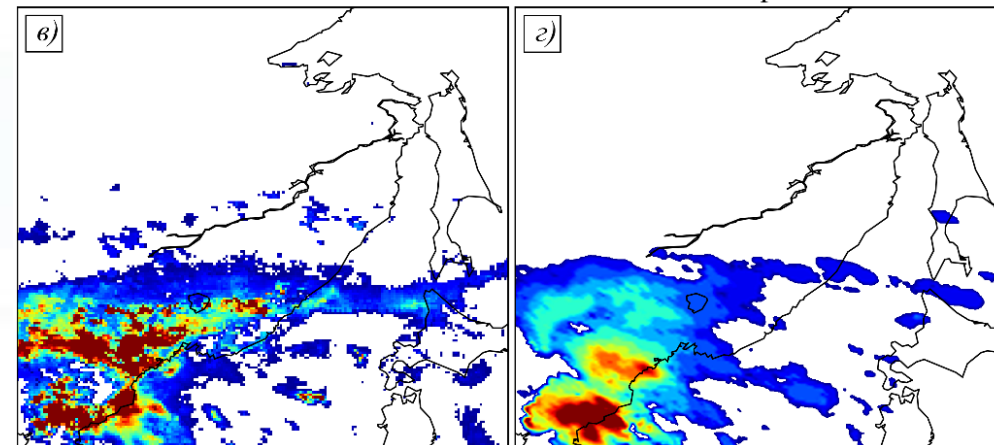
Яркостная температура 10.7 мкм

Маска облачности



GPM-MW

Алгоритм



Интенсивность, мм/ч

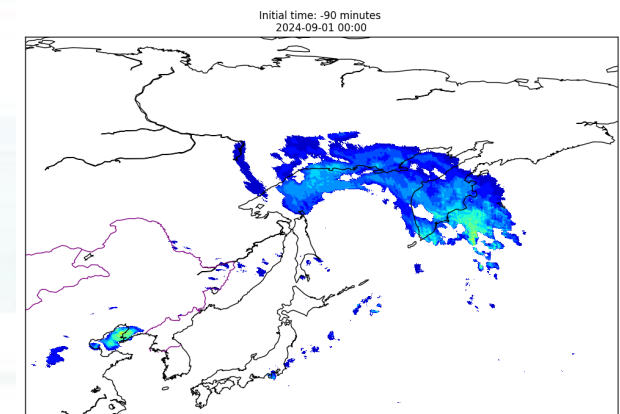
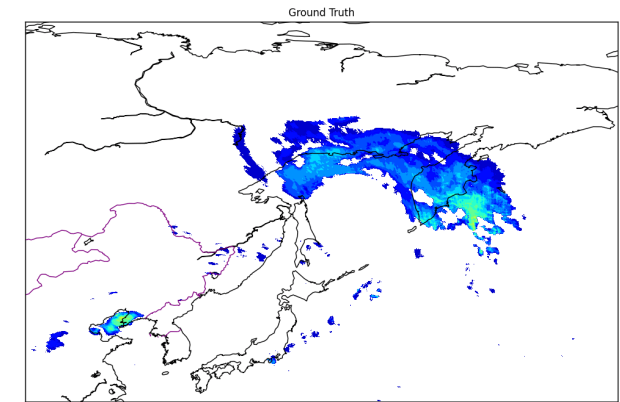
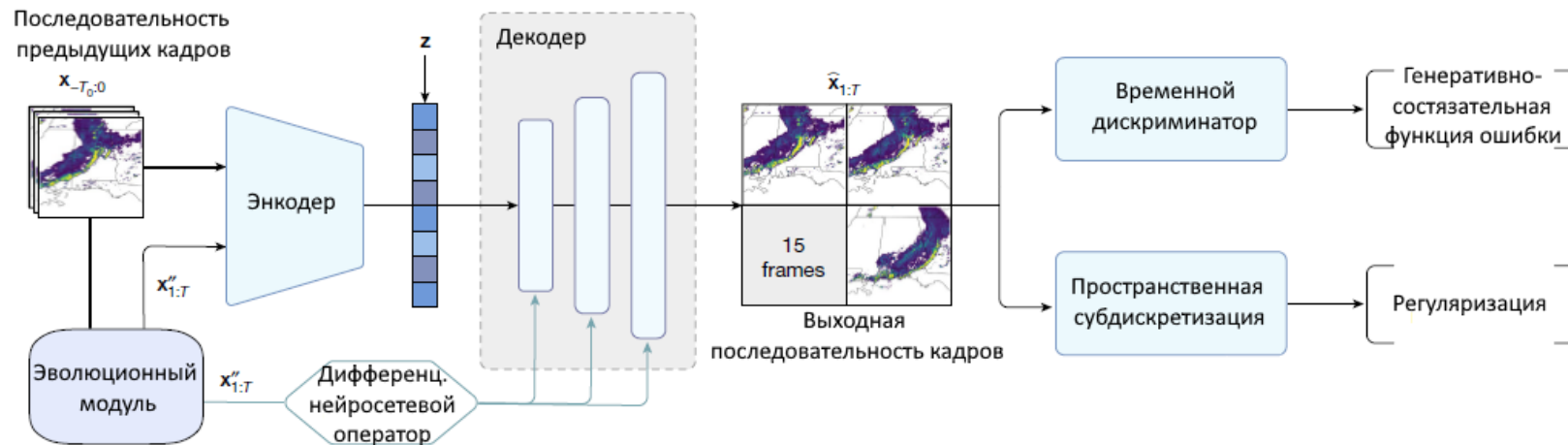
**(а)** Спектральный канал 11 мкм прибора МСУ-ГС (темнее-холоднее); **(б)** Маска облачности; **(в)** Интенсивность осадков по данным GPM-MW; **(г)** Интенсивность осадков по данным представленного алгоритма.

# Краткосрочный прогноз осадков

В настоящее время ведутся работы по созданию алгоритма краткосрочного прогноза осадков.

В качестве основы рассматривается модель физически-обусловленной нейронной сети (Y. Zhang et al. Skilful nowcasting of extreme precipitation with NowcastNet).

Модель использует нейросетевой дифференциальный оператор для прогноза эволюции перемещения полей осадков и изменения значений интенсивности. Это позволяет существенно улучшить точность и заблаговременность прогноза.



Прогноз осадков на срок до 5 часов по данным КА Электро-Л и Арктика-М

# Заключение

- Для мониторинга облачности и осадков широко применяются космические аппараты российского и зарубежного производства, позволяя существенно дополнить информацию из наземных источников.
- В настоящем докладе представлены результаты исследований, реализованные в виде алгоритмов для обнаружения облачности, ее классификации и расчета количества осадков.
- В настоящее время разрабатывается алгоритм краткосрочного прогноза осадков.
- Работа проводится в рамках гранта Российского научного фонда № 23-77-00011, <https://rscf.ru/project/23-77-00011/>.



## СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

Вычислительный центр ДВО РАН  
Россия, г. Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, д. 65  
тел.: +7-(4212) 22-72-67

Дальневосточный центр ФГБУ «НИЦ «Планета»  
Россия, г. Хабаровск, ул. Ленина, д. 18  
тел.: +7-(4212) 21-43-11

e-mail: [niokr@dvrspod.ru](mailto:niokr@dvrspod.ru)

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-77-00011  
«Краткосрочное прогнозирование облачности и осадков по данным геостационарных спутников на территории Дальнего Востока»