

СПЛОЧЁННОСТЬ ЛЬДА В КАРСКОМ МОРЕ, ПОЛУЧЕННАЯ МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ, ПО ДАННЫМ РАДИОМЕТРА MIRAS СПУТНИКА SMOS

*Тихонов В.В.^{1,2,3}, Катамадзе Д.Р.⁴, Алексеева Т.А.^{3,1}, Афанасьева Е.В.^{3,1},
Соколова Ю.В.^{3,1}, Хвостов И.В.², Романов А.Н.², Комарова Н.Ю.¹*

¹Институт космических исследований РАН, г. Москва

²Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул

³Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
г. Санкт-Петербург

⁴Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
факультет космических исследований, Москва



СПЛОЧЕННОСТЬ МОРСКОГО ЛЬДА



SSMIS

Special Sensor Microwave Imager/Sounder

ИСЗ серии DMSP (F8-F19)

Defense Meteorological Satellite Program

1987 – н.в.

19.35(H,V), 22.24(V), 37(H,V), 91.655 (H,V) ГГц

Режим конусного сканирования - 53°

Глобальное покрытие Земли - 3 суток

Покрытие > 58-го град. - 2 раза в сутки

16x14 км - 85.5 ГГц; 70x45 км - 19.35 ГГц

СПУТНИКОВАЯ МИКРОВОЛНОВАЯ РАДИОМЕТРИЯ

AMSR2

Advanced Microwave Scanning Radiometer

ИСЗ GCOM-W1

Global Change Observation Mission - Water 1

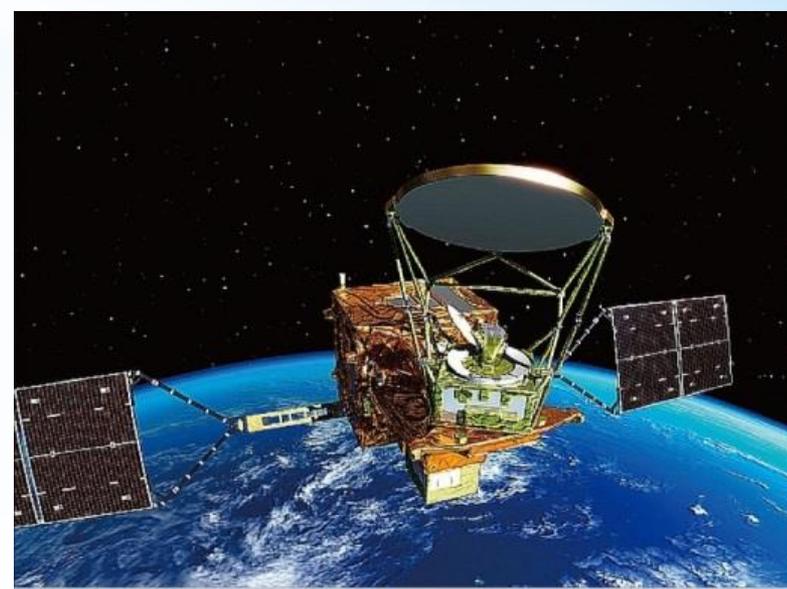
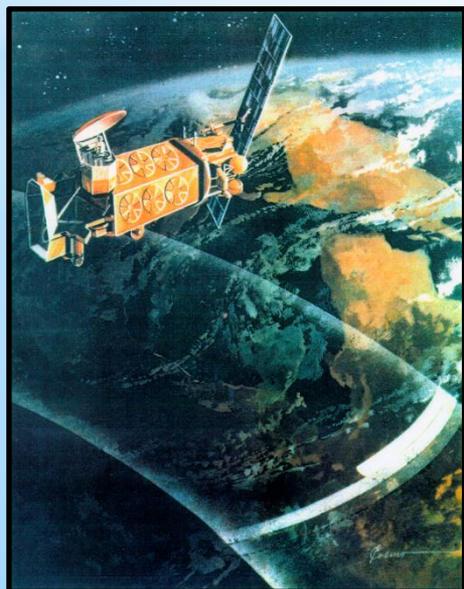
2012 – н.в.

6,925; 7,3; 10,65; 18,7; 23,8; 36,5; 89,0 (H,V) ГГц

Режим конусного сканирования - 55°

Глобальное покрытие Земли - 2 суток

5x3 км - 89 ГГц; 62x35 км – 6,925 ГГц



СПЛОЧЕННОСТЬ МОРСКОГО ЛЬДА



СПУТНИКОВАЯ
МИКРОВОЛНОВАЯ
РАДИОМЕТРИЯ



АЛГОРИТМЫ



+ 6,915 ГГц

- NASA Team (NT) – NASA
- NASA Team 2 (NT2) – NASA
- **Bootstrap (BT)** – Goddard Space Flight Center (NASA)
- Bristol – Goddard Space Flight Center (NASA)
- TUD – Danmarks Tekniske Universitet (DTU)
- ARTIST Sea Ice (ASI) – University of Bremen, European Space Agency (ESA)

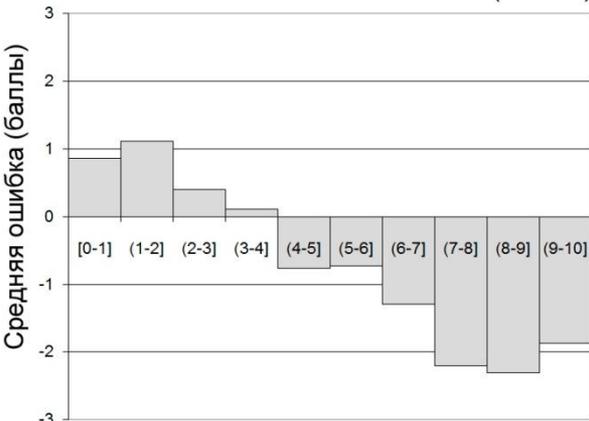
Несколько каналов
> 18,7 ГГц

ГИБРИДНЫЕ АЛГОРИТМЫ

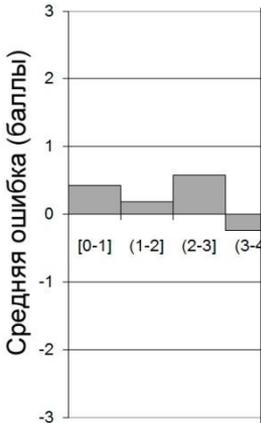
- OSI-401-b – консорциум OSI SAF (Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility)
- OSI-408 – консорциум OSI SAF (Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility)
-

ЛЕТНИЙ ПЕРИОД

NASA Team (25 km)

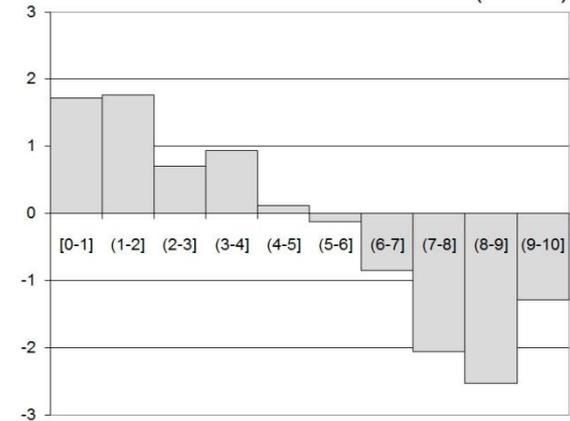


ASI (12.5 km)

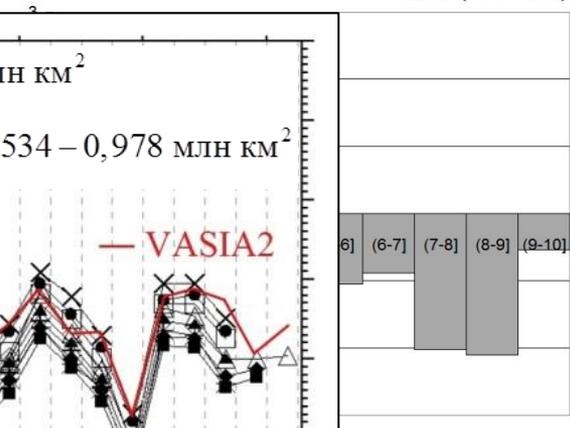


ЗИМНИЙ ПЕРИОД

NASA Team (25 km)

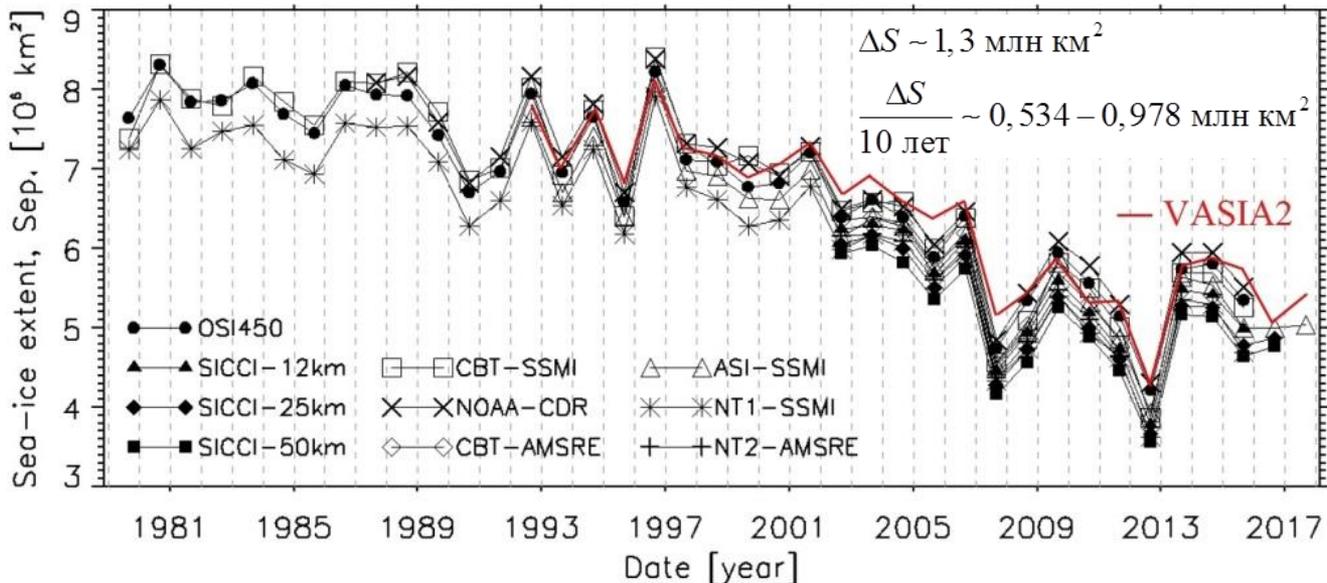


ASI (12.5 km)



СПУТНИКОВАЯ МИКРОВОЛНОВАЯ РАДИОМЕТРИЯ

АЛГОРИТМЫ



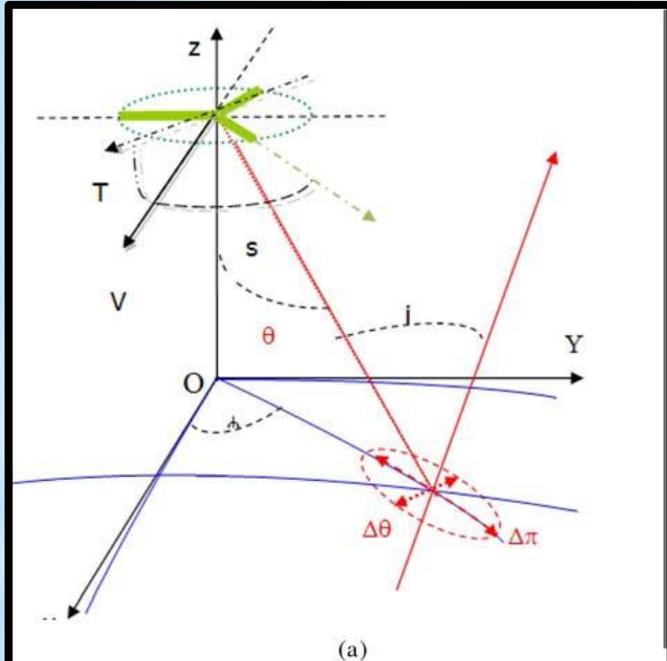
- OSI-401-b
- OSI-408
-

on Facility)

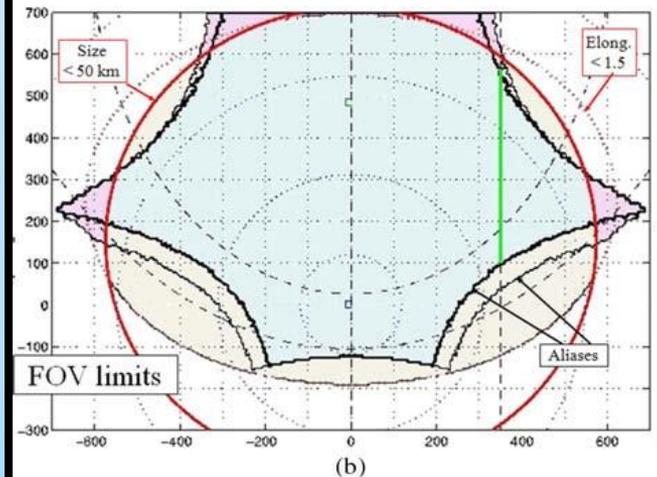
n Facility)

ДАНИЕ

SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) – 2009 — наст. вр.
MIRAS (Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis)



(a)



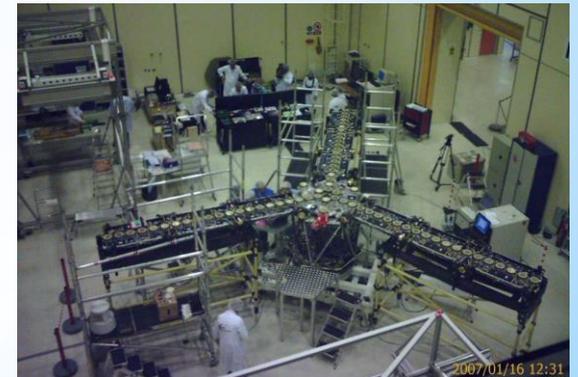
(b)



Продукт SMOS L1C

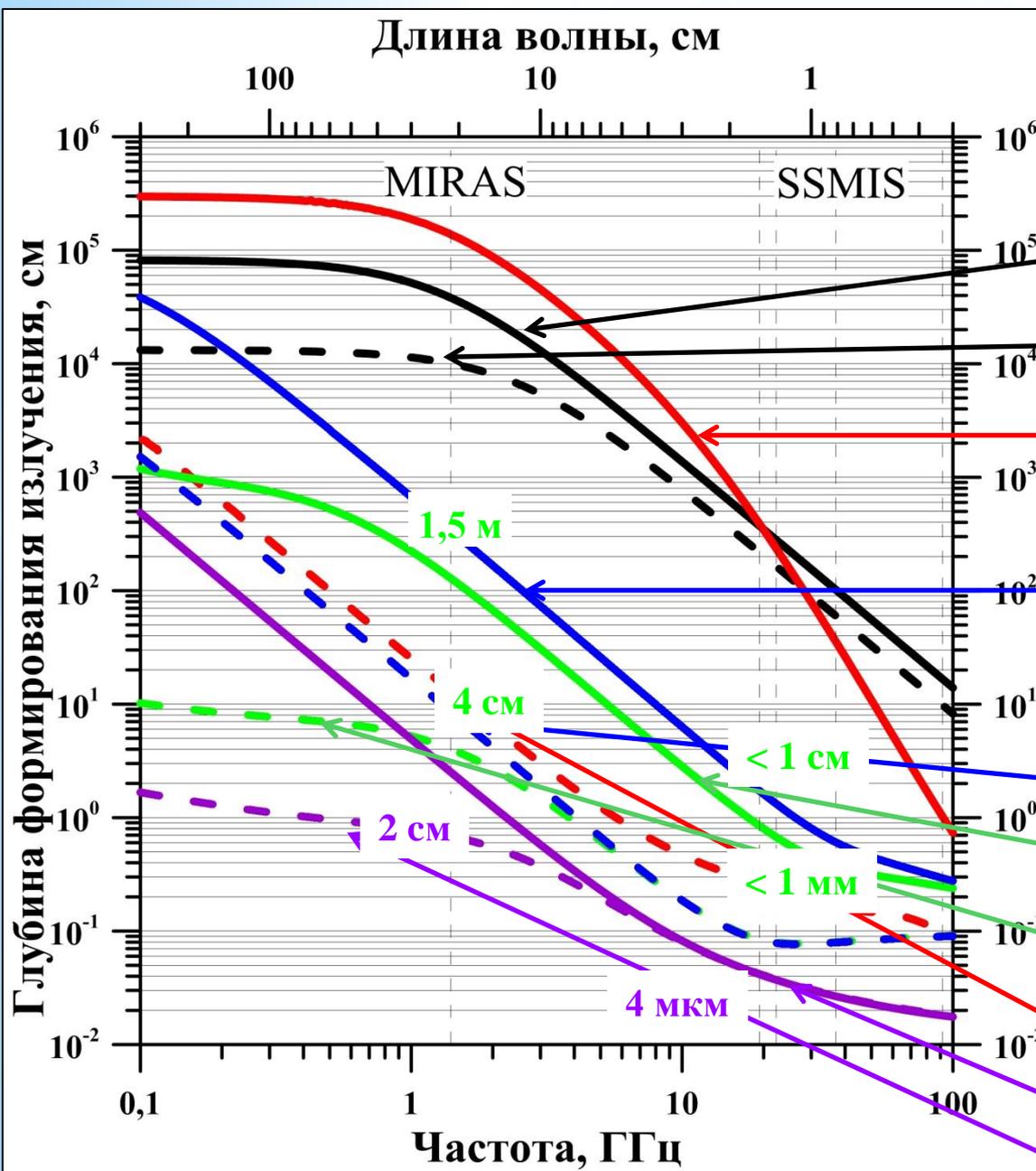
$$f = 1.4 \text{ (H, V) ГГц}$$

$$\theta = 42.5^\circ$$



ГЛУБИНА ФОРМИРОВАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ

$$h_{PD} = \frac{\lambda}{4\pi \operatorname{Im}(\sqrt{\epsilon})}$$



Пресноводный лёд, $t = -20\text{ }^\circ\text{C}$

Пресноводный лёд, $t = 0\text{ }^\circ\text{C}$

Сухой снег, $t = -20\text{ }^\circ\text{C}$

Озёрный лёд, $t = -20\text{ }^\circ\text{C}$

Озёрный лёд, $t = 0\text{ }^\circ\text{C}$

Морской лёд, $t = -20\text{ }^\circ\text{C}$

Морской лёд, $t = 0\text{ }^\circ\text{C}$

Влажный снег, $t = 0\text{ }^\circ\text{C}$

Пресная вода, $t = 0\text{ }^\circ\text{C}$

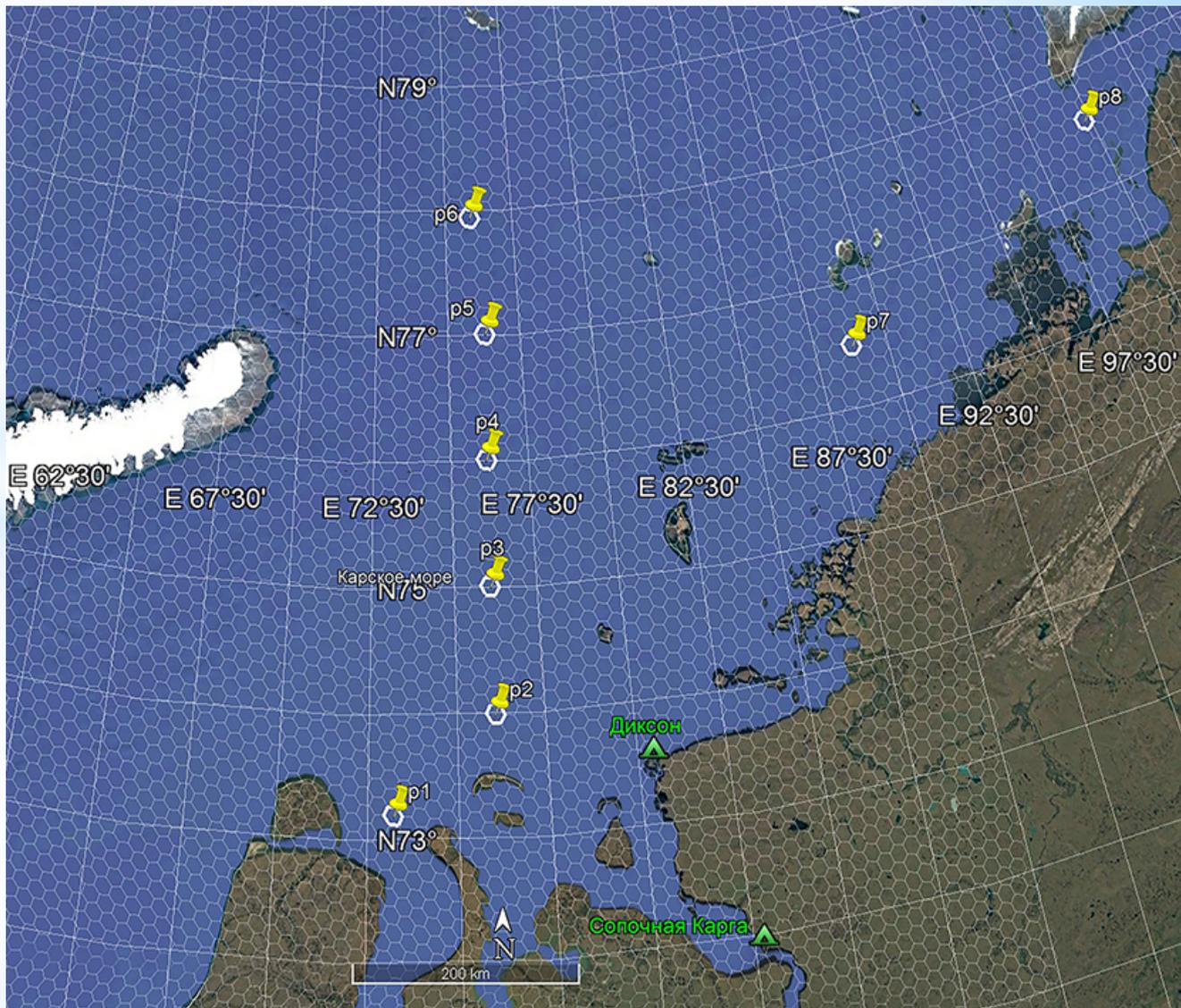
Морская вода, $t = 0\text{ }^\circ\text{C}$

РЕГИОН ИССЛЕДОВАНИЯ

Карское море
8 ячеек продукта SMOS L1C



Номер ячейки	Широта, ° с.ш.	Долгота, ° в.д.
P1	73,205	73,193
P2	74,007	76,092
P3	75,017	76,081
P4	76,021	76,144
P5	77,016	76,269
P6	77,948	75,902
P7	76,502	88,757
P8	77,583	99,751



ДААННЫЕ ПО СПЛОЧЕННОСТИ ЛЬДА

САНАЦИИ

Terra, Aqua (NASA)



MODIS

Moderate Resolution
Imaging Spectroradiometer

Разрешение – 250-500 м

Видимый, ИК - диапазоны

Sentinel-1A (ESA)



Suomi-NPP (NASA/NOAA)



VIIRS

Visible Infrared Imaging
Radiometer Suite

Разрешение – 375-750 м

Видимый, ИК - диапазоны

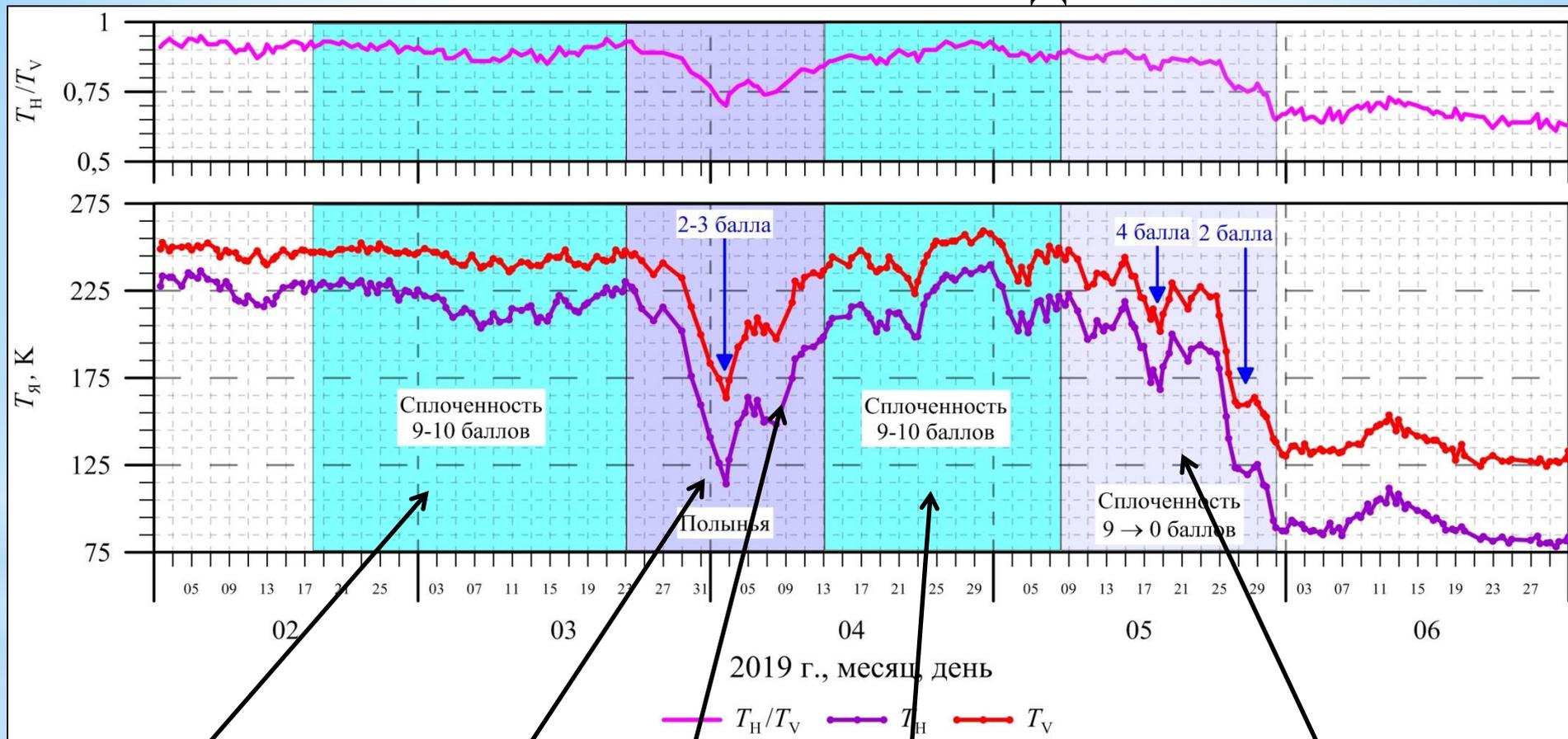
SAR

Synthetic Aperture Radar

Разрешение – 300 м

C-band (5,405 ГГц)

СПЛОЧЕННОСТЬ ЛЬДА



однолетние льды

T_H : 204 К – 233 К

T_V : 235 К – 254 К

T_H/T_V : 0,85 – 0,95

полынья

$T_H \rightarrow 115 \text{ К}$

$T_V \rightarrow 164 \text{ К}$

$T_H/T_V \rightarrow 0,7$

однолетние льды, нилас

T_H : 196 К – 240 К

T_V : 224 К – 260 К

T_H/T_V : 0,85 – 0,94

процесс таяния

T_H : 225 К → 90 К

T_V : 250 К → 135 К

T_H/T_V : 0,9 → 0,65

← закрытие полыньи →

← начальные формы льда →

← однолетние льды с севера →

МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ

Совокупность методов искусственного интеллекта, с помощью которых можно создавать самообучающиеся компьютерные системы. Для таких систем не прописываются конкретные алгоритмы решения задач, а предоставляются подготовленные данные и описываются критерии успешного решения, по которым учатся компьютерные системы.

Используются:

- средства математической статистики,
- численные методы,
- методы математического анализа,
- методы оптимизации,
- методы теории вероятностей,
- методы теории графов.

Модели
машинного
обучения

Атрибуты - x

T_h

T_v

$\frac{T_h}{T_v}$

T_v

Модели машинного обучения

Целевая переменная - y

Сплочённость
ледяного покрова

$$Pr(1.4) = \frac{T_v - T_h}{T_v + T_h}$$

МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ

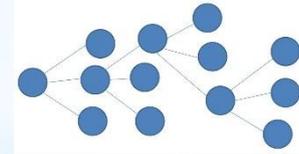
Модели машинного обучения:

- Linear Regression,
- Ridge Regression,
- Lasso Regression,
- ElasticNet,
- DecisionTreeRegressor,
- RandomForestRegressor,
- XGBoost,
- KNeighborsRegressor

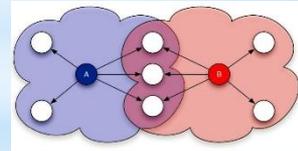
} класс линейных регрессионных методов

$$y = kx + b$$

} класс моделей, основанных на методе
деревя решений



} метод k-ближайших соседей



Эффективность моделей



Метрики качества



Коэффициент детерминации (R^2)

Root Mean Squared Error (RMSE)

Кв. к. из среднеквадратичной ошибки

Mean Absolute Percentage Error (MAPE)

Средняя абсолютная процентная ошибка

МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ

Th, К	Tv, К	Th/Tv	Pr(1.4)= =(Tv-Th)/(Tv+Th)	Общая сплоченность льда
118,13	159,19	0,74	-0,1480	4,0
125,24	162,96	0,77	-0,1309	5,0
125,64	168,13	0,75	-0,1447	6,0
104,80	152,20	0,69	-0,1844	2,0
145,14	177,04	0,82	-0,0990	5,0
150,89	184,69	0,82	-0,1007	8,0
121,60	158,62	0,77	-0,1321	6,5
97,10	139,90	0,69	-0,1806	6,0
103,81	148,50	0,70	-0,1771	3,5
113,24	150,70	0,75	-0,1419	5,0
113,46	151,34	0,75	-0,1430	7,0
105,03	147,87	0,71	-0,1694	7,0
97,69	139,78	0,70	-0,1772	2,5
96,78	141,43	0,68	-0,1874	2,0
109,95	151,24	0,73	-0,1581	4,0
103,29	142,82	0,72	-0,1606	4,0
82,50	124,08	0,66	-0,2013	0,2
82,55	125,36	0,66	-0,2059	0,2
77,01	124,00	0,62	-0,2338	0,5
85,50	129,21	0,66	-0,2036	1,0
127,63	172,85	0,74	-0,1505	10,0
148,86	196,55	0,76	-0,1381	10,0
112,46	158,32	0,71	-0,1693	0,5
180,91	221,67	0,82	-0,1013	10,0
189,06	230,34	0,82	-0,0984	10,0
179,26	217,24	0,83	-0,0958	8,0

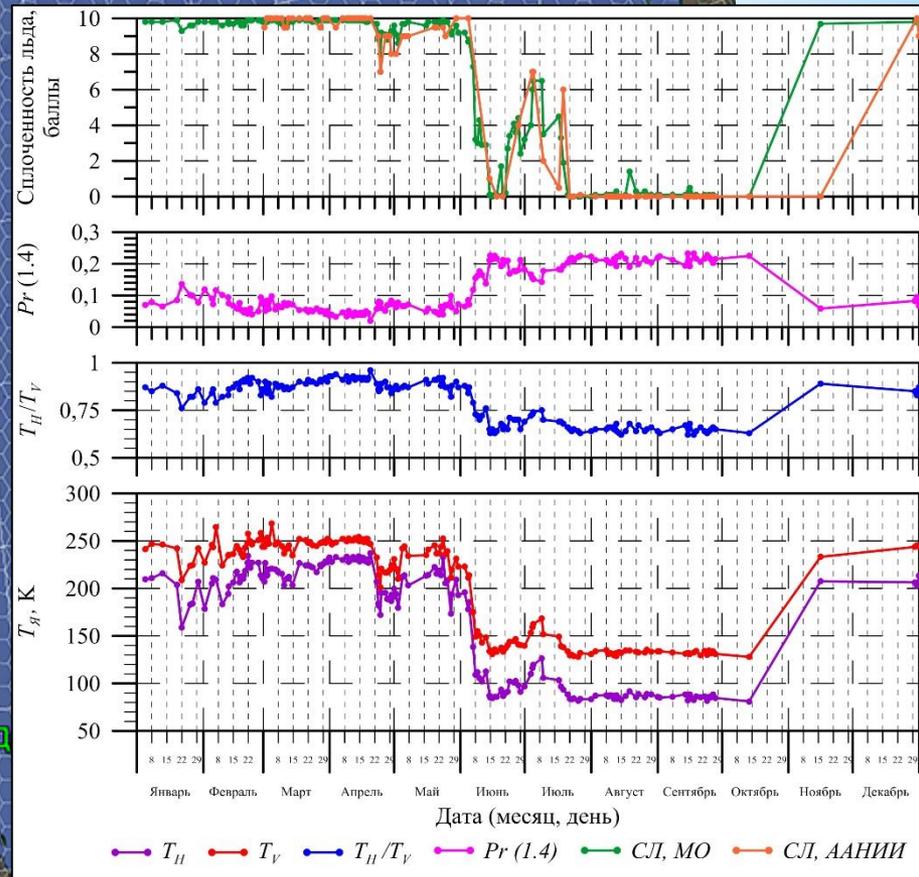
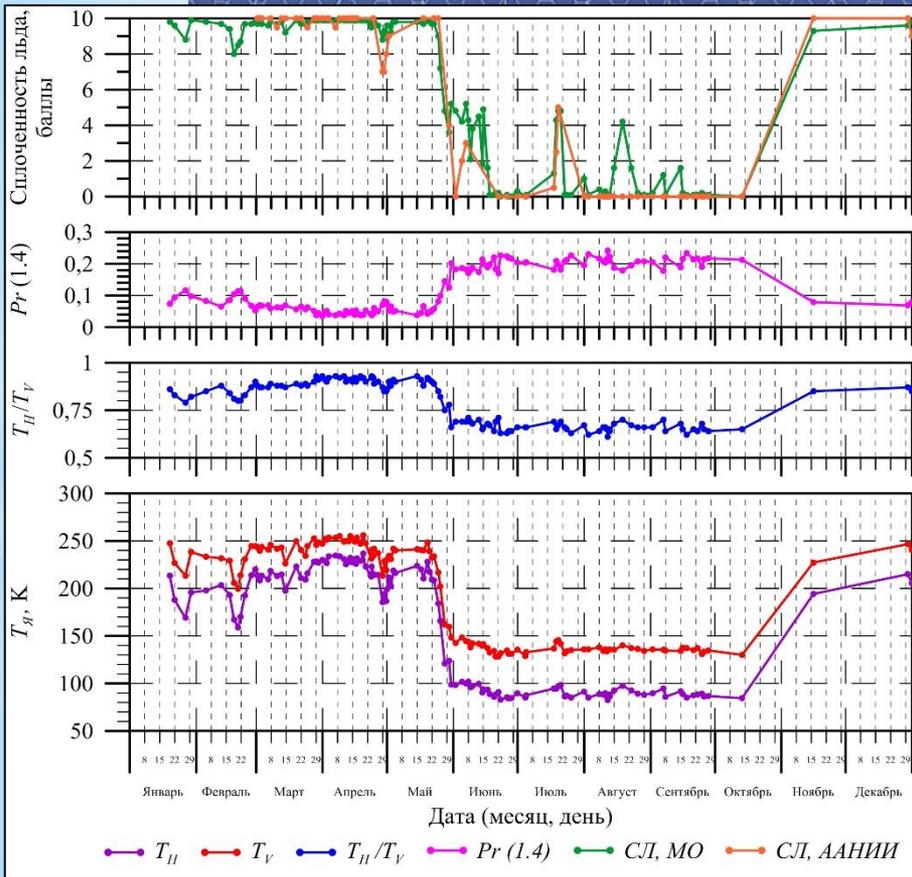
Обучение
2022 год

Проверка
2023 год

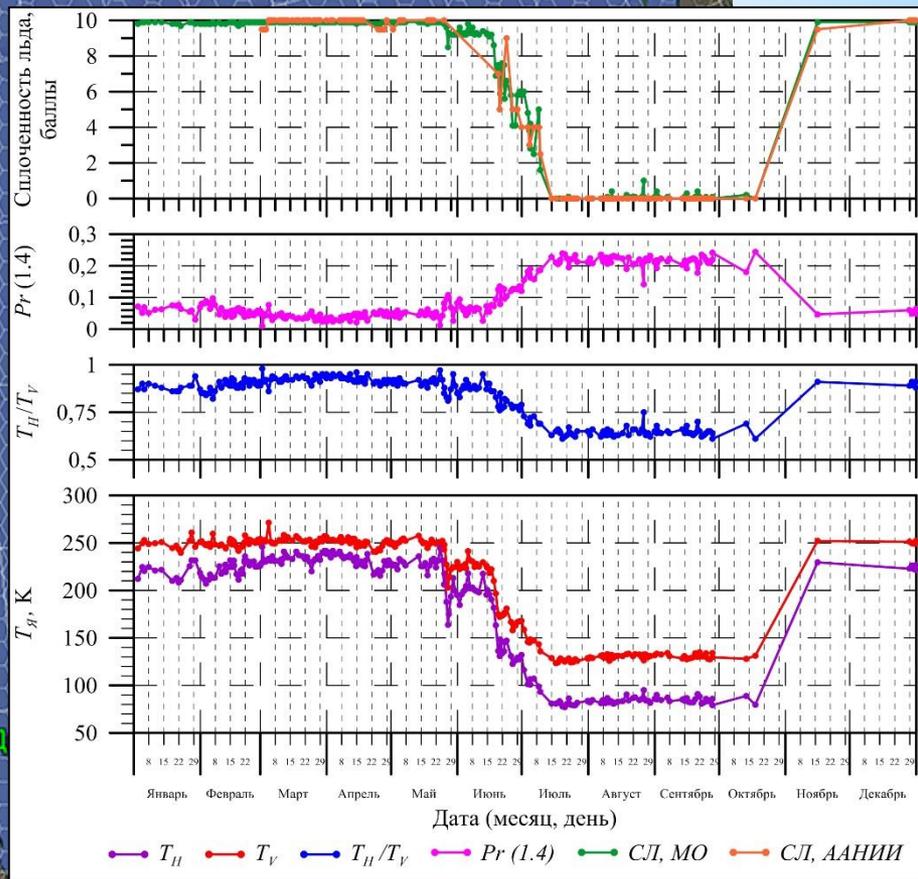
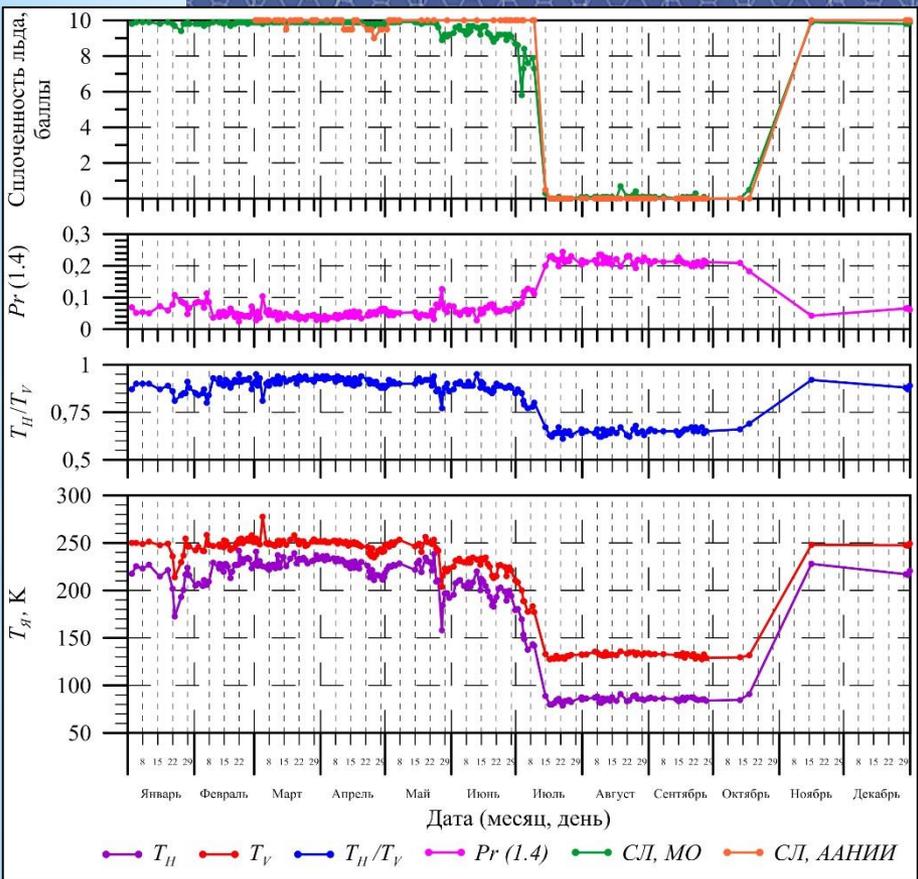
Метрики качества

XGBoost

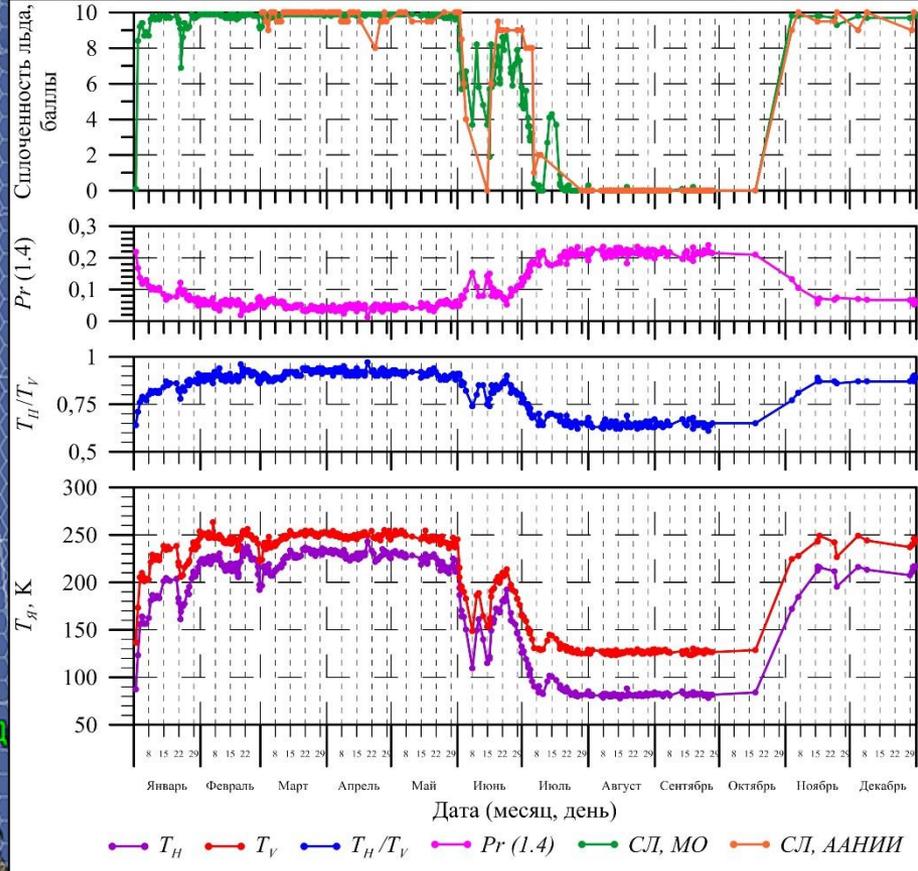
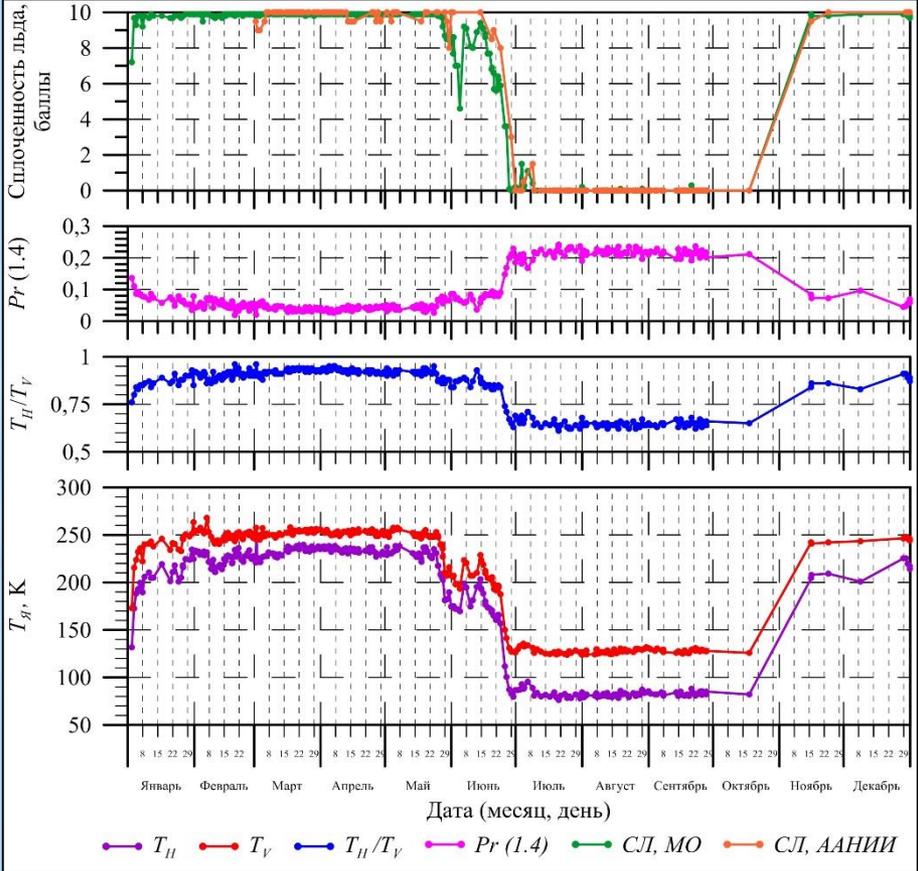
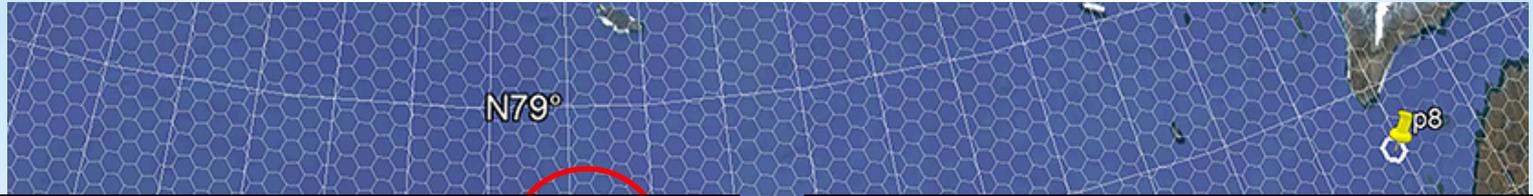
РЕЗУЛЬТАТ



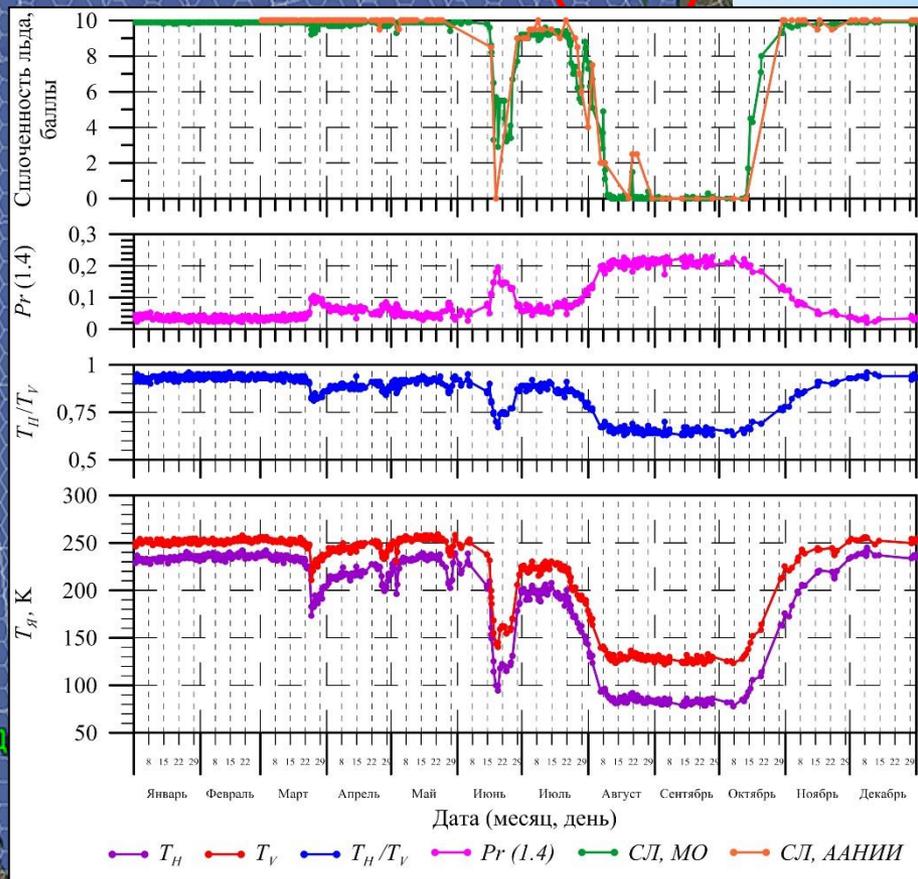
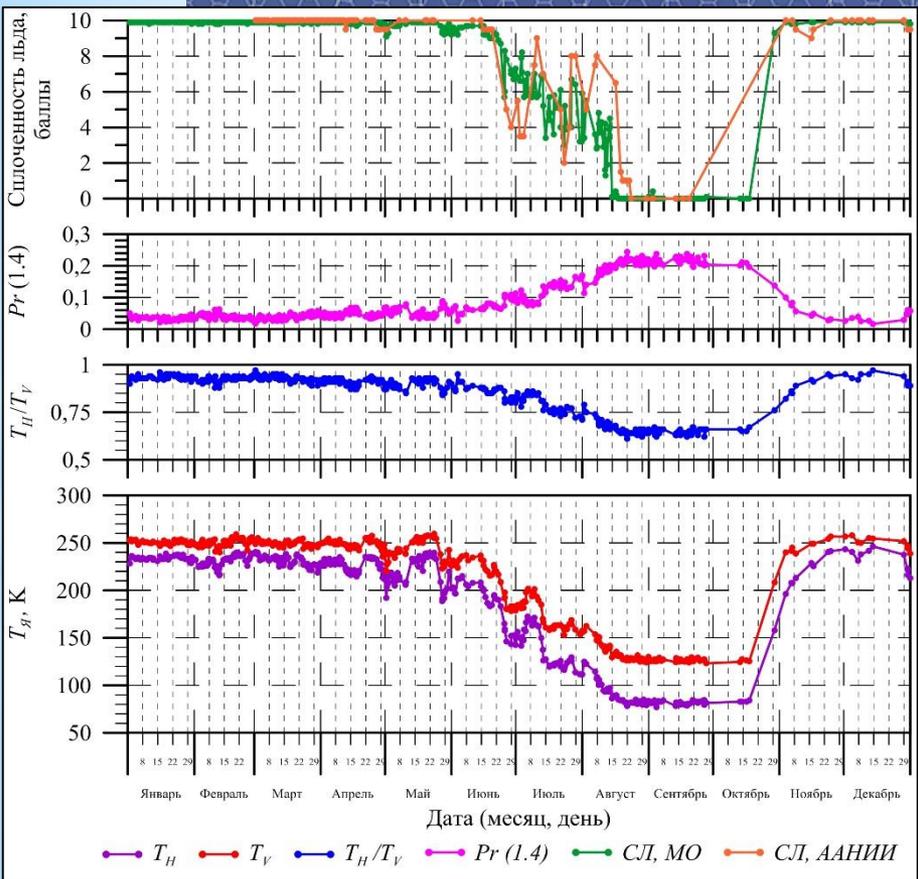
РЕЗУЛЬТАТ



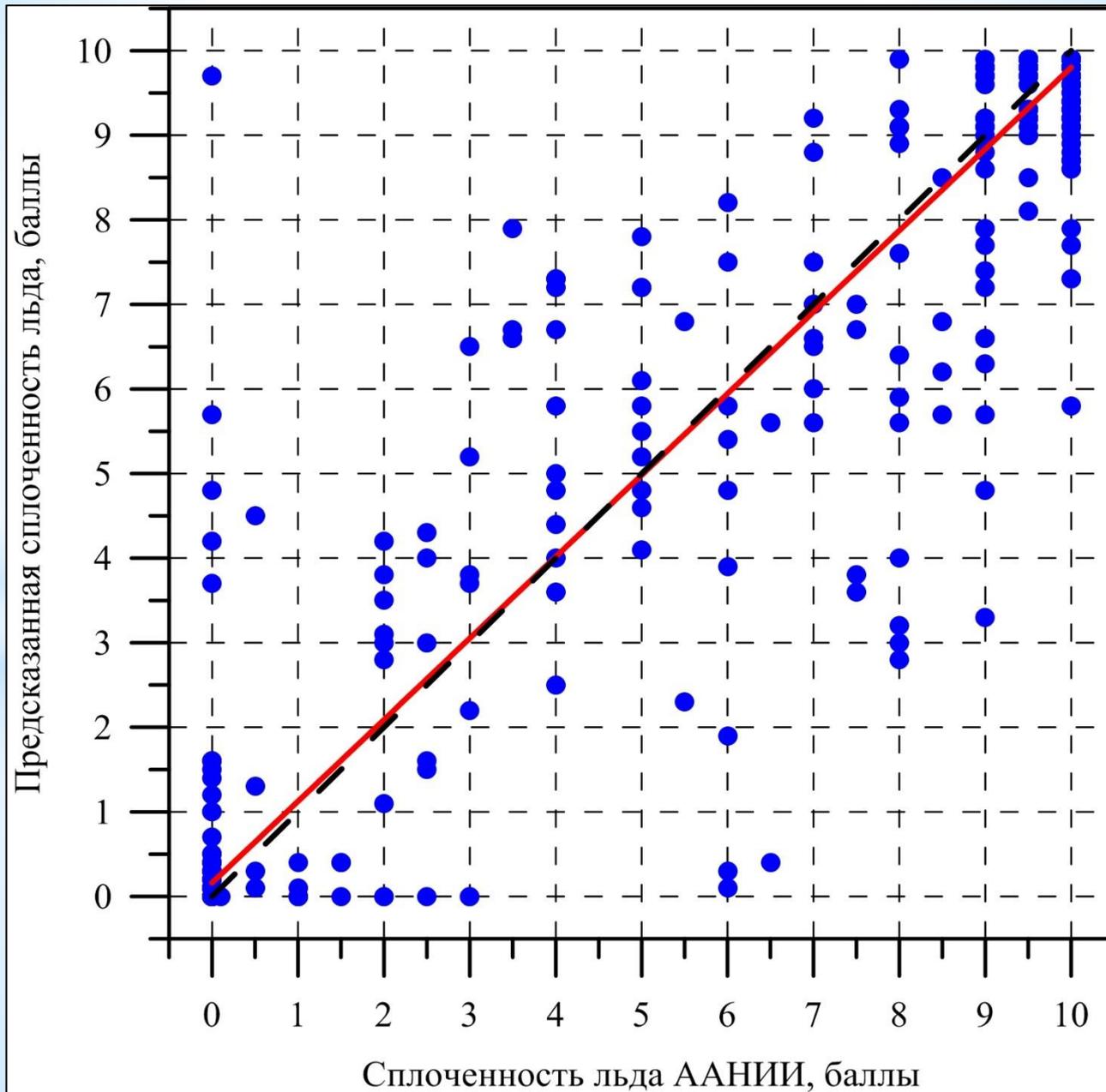
РЕЗУЛЬТАТ



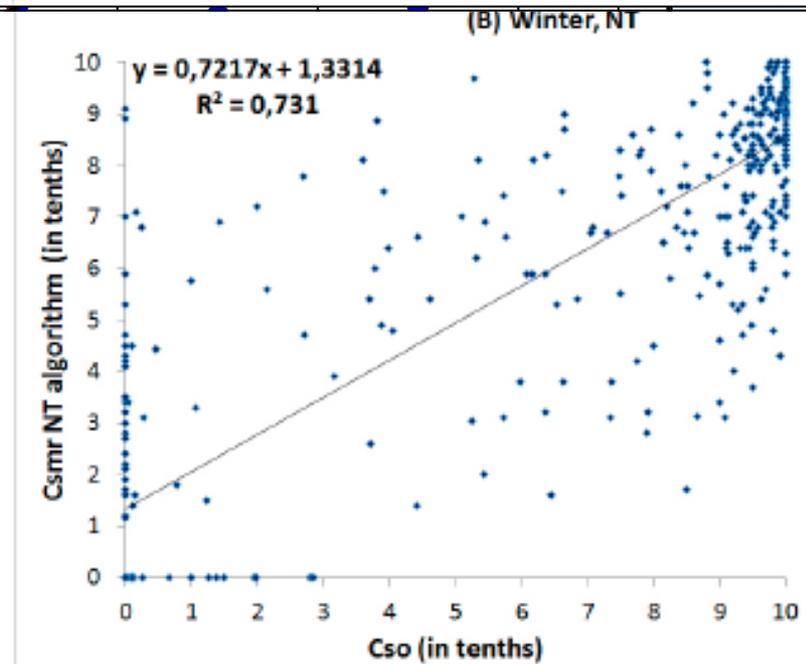
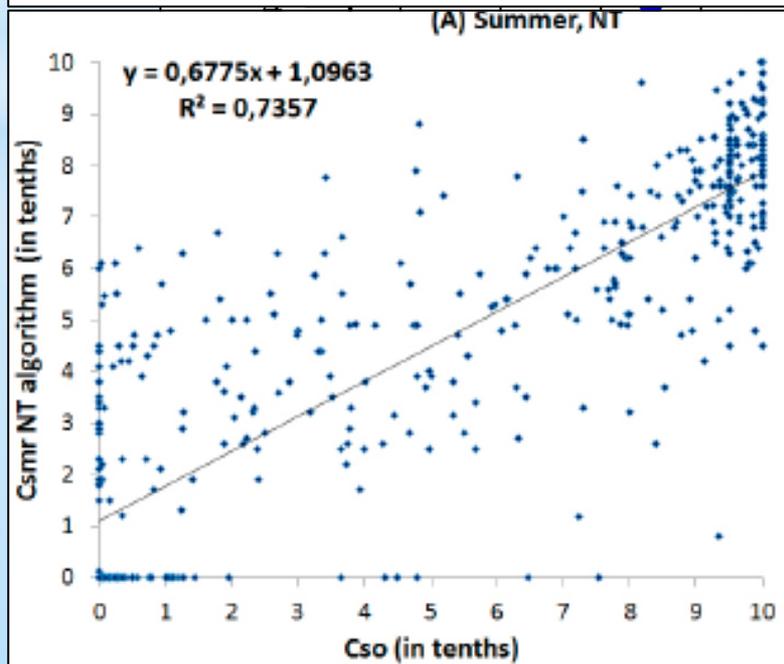
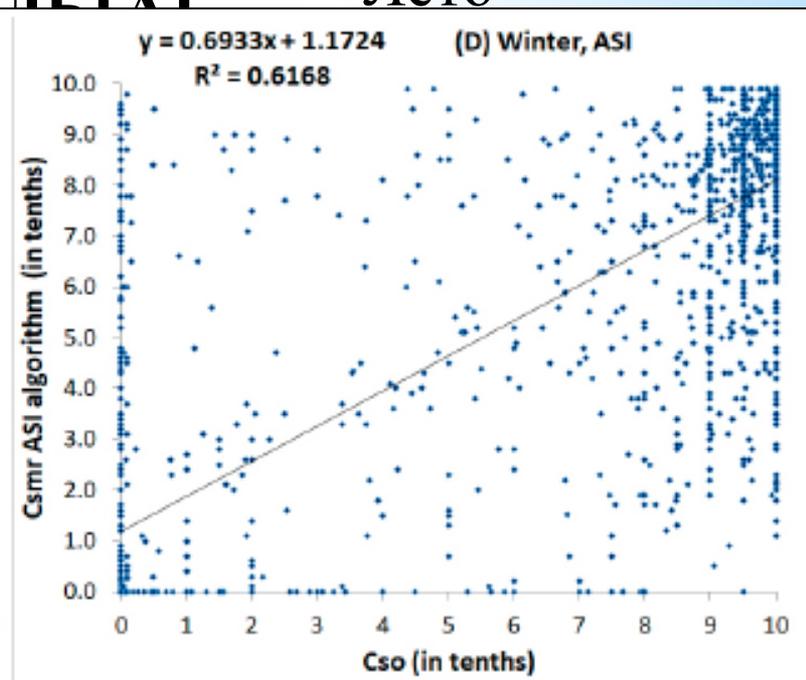
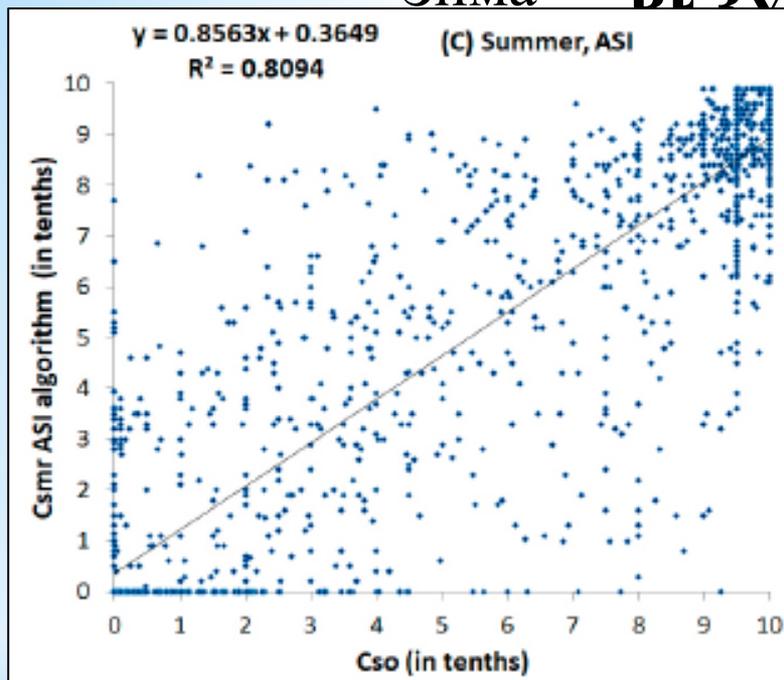
РЕЗУЛЬТАТ



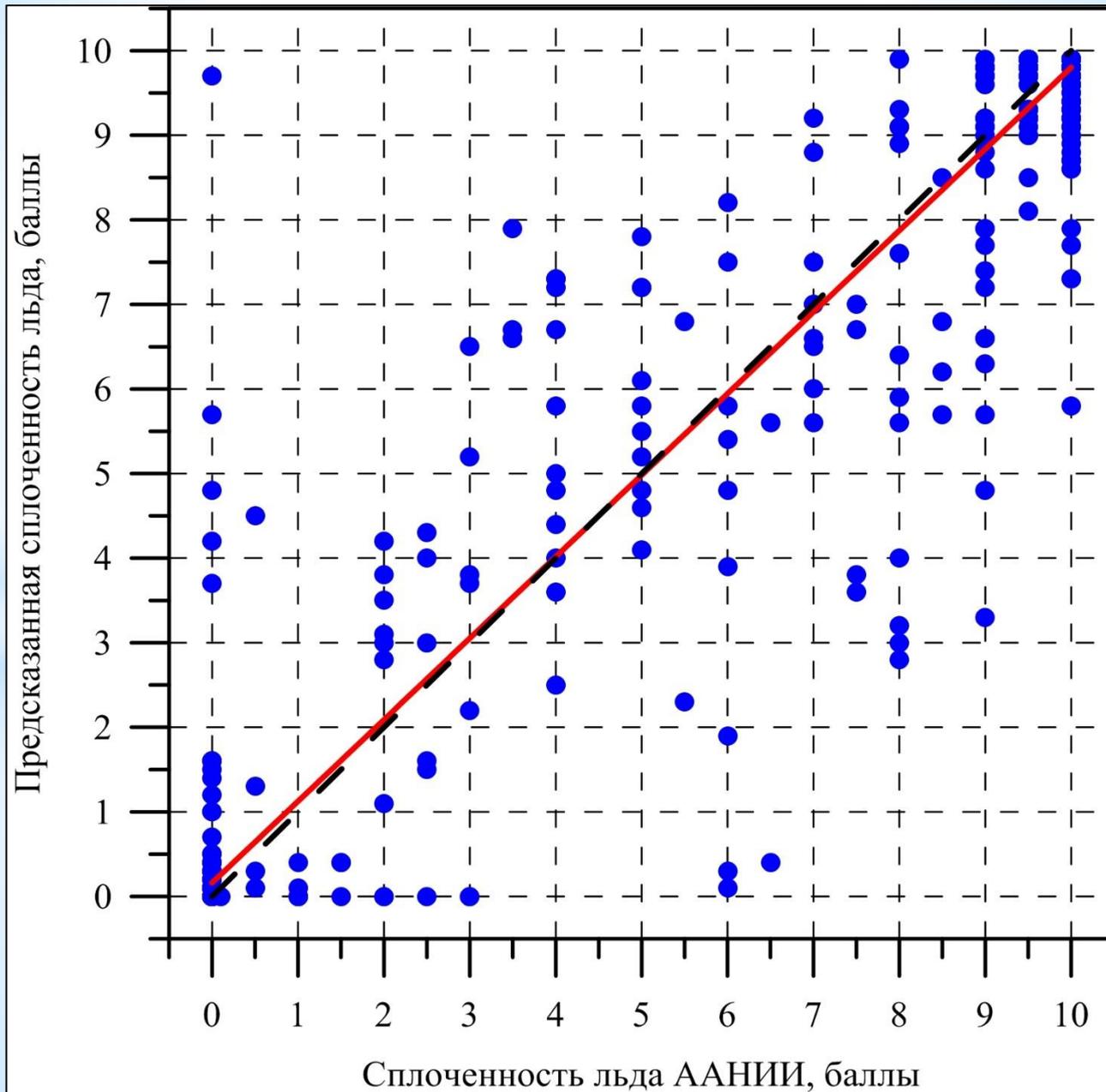
РЕЗУЛЬТАТ



Разброс значений для модели XGBoost. $R^2 = 0,96$



РЕЗУЛЬТАТ



Разброс значений для модели XGBoost. $R^2 = 0,96$

ПЛАНЫ

- Анализ результатов.
- Сравнение с другими алгоритмами.
- Анализ результатов по 2024 году.
- MIRAS → AMSR2, SSMIS, МТВЗА-ГЯ → Алгоритм

Публикации:

1. Тихонов В.В., Алексеева Т. А., Афанасьева Е. В., Соколова Ю. В., Хвостов И. В., Романов А. Н. О возможности определения сплоченности ледяного покрова арктических морей по данным спутника SMOS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 6. С. 329-325. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-329-335.

2. Готовится ...

Спасибо!

Thanks!

