

Потенциал микроволновой радиометрии в L-диапазоне для оценки сплоченности морского ледяного покрова на примере данных спутника SMOS

Ю.В. Соколова¹, В.В. Тихонов^{1,2,3},
Д.Р. Катамадзе¹, Т.А. Алексеева^{1,2},
Е.В. Афанасьева^{1,2}, И.В. Хвостов³,
А.Н. Романов³

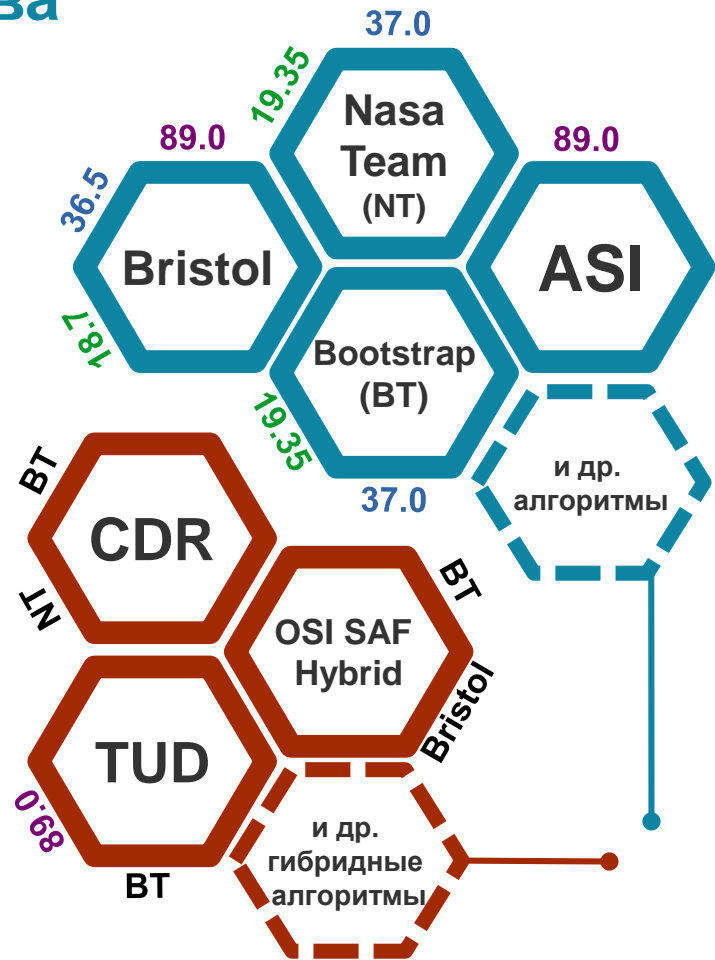
¹ИКИ РАН, ²ААНИИ, ³ИВЭП СО РАН

Радиометры, частоты и алгоритмы для задачи оценки сплоченности морского ледяного покрова

Прибор	Годы работы	Рабочие частоты
SSMR (SeaSat, Nimbus-7)	1978 –1988	6.6, 10.69, 18, 21, 37 ГГц
SSM/I (DMSP F08-F15)	1987 – 2020	19.35, 22.235, 37.0, 85.5 ГГц
SSMIS (DMSP F16-F19)	2004 – н.в.	19.35, 22.235, 37.0, 91.655 ГГц
AMSR-E (Aqua)	2002 – 2016	6.925, 10.65, 18.7, 23.8, 36.5, 89.0 ГГц
AMSR-2 (GCOM-W)	2012 – н.в.	6.925, 7.3, 10.65, 18.7, 23.8, 36.5, 89.0 ГГц

Диапазон*	Частота, ГГц	Длина волн, см
L	1-2	15-30
S	2-4	7.5-15
C	4-8	3.75-7.5
X	8-12	2.5-3.75
Ku	12-18	1.67-2.5
K	18-26.5	1.13- 1.67
Ka	26.5-40	0.5-1.13
Q	33-50	0.6-0.9
U	40-60	0.5-0.75
V	40-75	0.5-0.6
W	75-110	0.27-0.4

* Классификация IEEE



Чувствительность алгоритмов к различным источникам ошибок

1

Изменчивость излучательной способности морского льда

$T_{\text{физ}}$

Влажность
Соленость
Включения соли и воздуха (геометрия и распределение) ...

ϵ

2

Изменчивость излучательной способности снежного покрова

$T_{\text{физ}}$

Влажность
Солёность
Размер зёрен
Плотность
Толщина
Ледяные корки ...

ϵ

3

Атмосферные эффекты

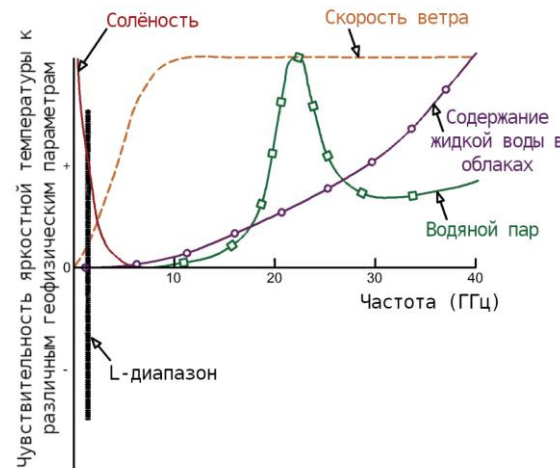
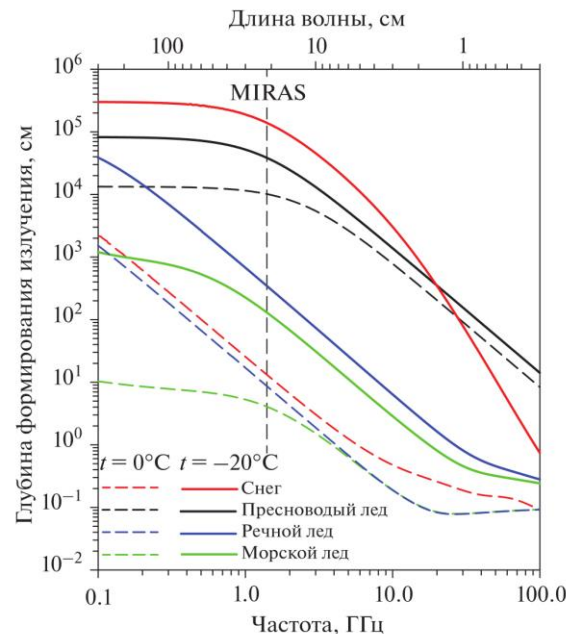
Водяной пар
Водность облаков ...

4

Поверхностные эффекты

Шероховатость морской пов-ти: волнение, пена
Шероховатость ледяной пов-ти: торосистость

$T_{\text{физ}}$ — физическая температура, ϵ — комплексная диэлектрическая проницаемость

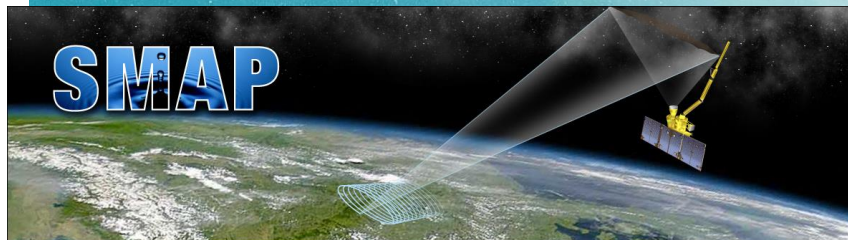
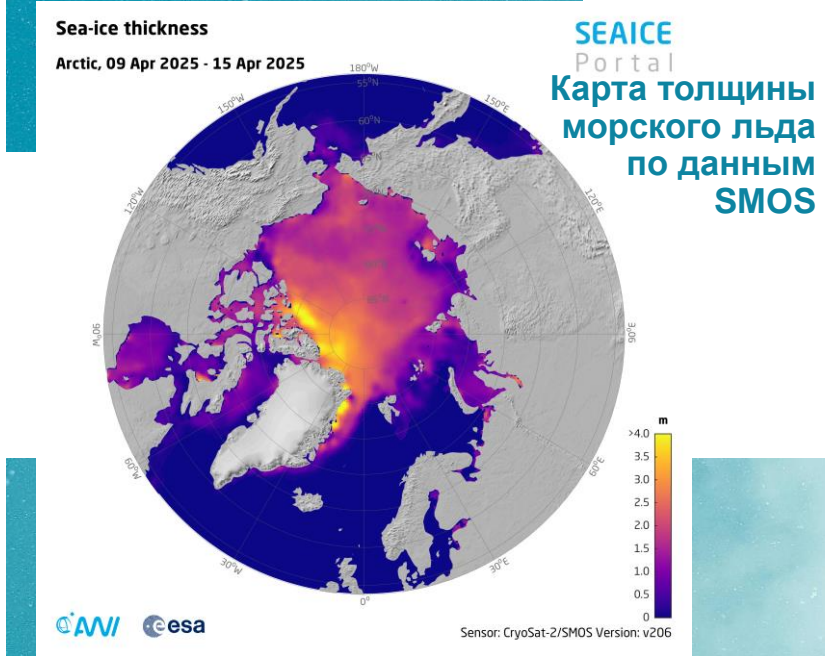


Тихонов, В.В., Хаустов, И.В., Романов, А.Н., Шарков, Е.А., Боярский, Д.А., Комарова, Н.Ю., Синицкий, А.И. Особенности собственного излучения Обской губы в L-диапазоне в период педостава.
<https://doi.org/10.31857/S0205961420030070>

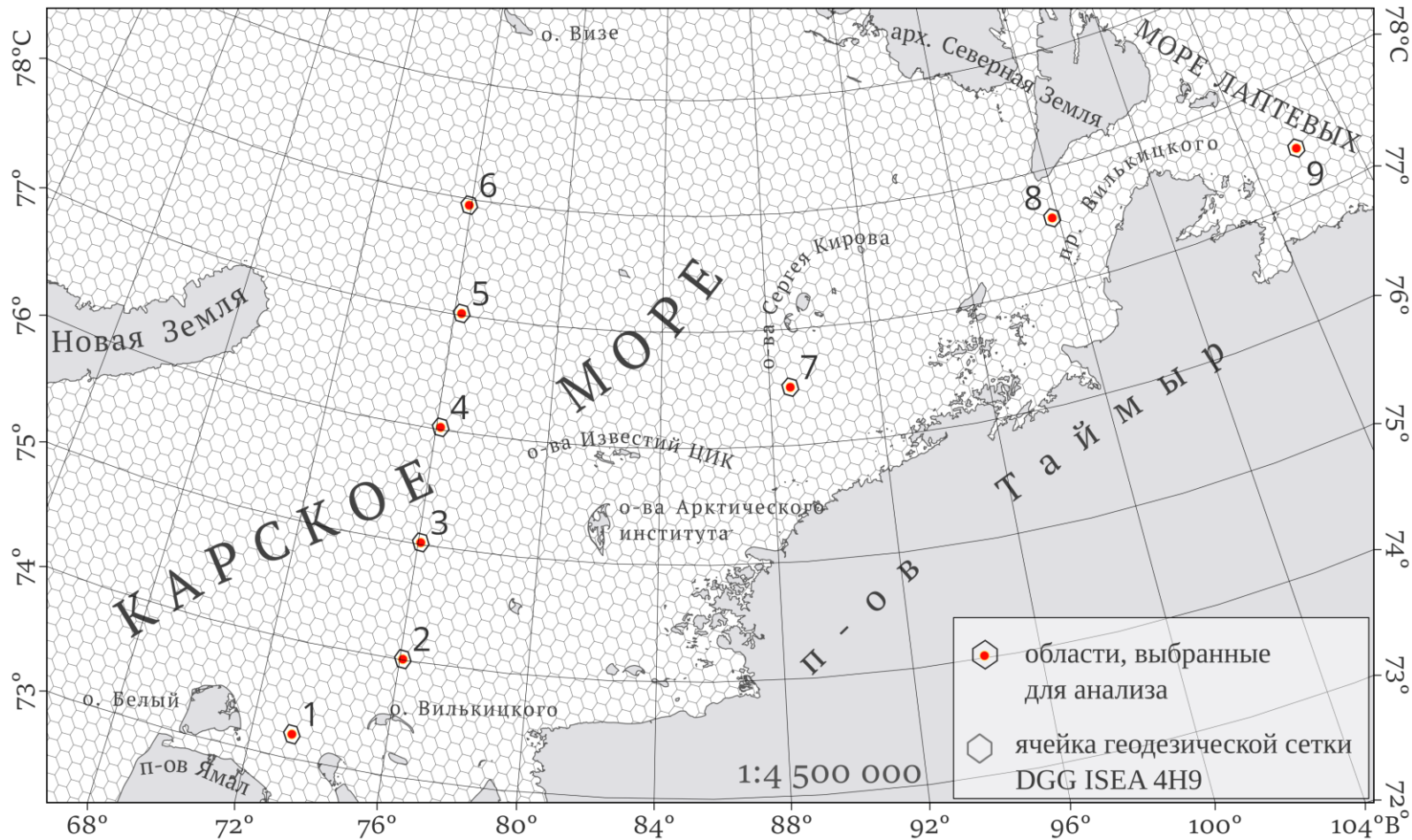
* Gabarro, C., Turtel A., Elousegui P. et al. New methodology to estimate Arctic sea ice concentration from SMOS combining brightness temperature differences in a maximum-likelihood estimator. 10.5194/tc-11-1987-2017

От измерений солёности и влажности почвы к измерениям толщины и сплоченности морского льда

Спутник	SMOS Soil Moisture and Ocean Salinity	SMAP Soil Moisture Active Passive
Радиометр	MIRAS Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis	L-радиометр
Метод съёмки	интерферометрический	коническое сканирование
Год запуска	2009	2015
Назначение	измерения влажности почвы и солёности океана	измерения влажности почвы
Частота	1,41 ГГц	1,41 ГГц
Разрешение	35-50 км	36 км
Поляризации	H, V (+ полная)	H, V (+ полная)
Полоса захвата	1000 км	1000 км
Углы съёмки	0-60°	40°



Регион исследования и исходные данные



- 1 **СМЛ** по низкочастотным данным радиометра **MIRAS**
- 2 **СМЛ** по высокочастотным данным радиометров **SSMIS** и **AMSR-2**
- 3 **СМЛ** от экспертов **ААНИИ**
- 4 Метеорологическое поле **температуры воздуха и температуры поверхности моря**

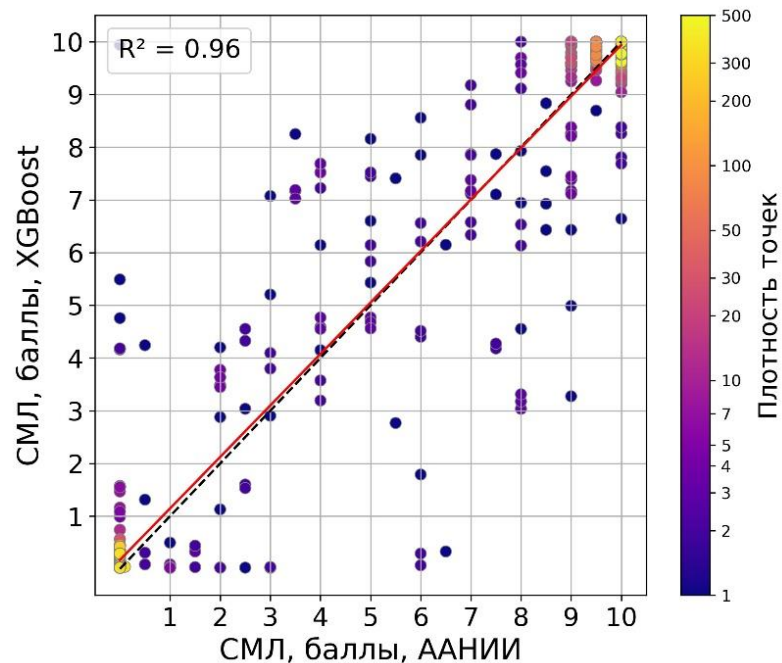
1. СМЛ по данным MIRAS

○ Исходные данные SMOS (MIRAS):

- продукт L1C SMOS (MIR_SCSF1C)
- угол зондирования 42.5°
- разрешающая способность $\sim 35 \times 50$ км
- полнополяризованный набор данных
- привязка к дискретной гексагональной геодезической сетке DGG ISEA 4H9 с линейным размером ячейки ~ 15 км

○ Метод машинного обучения (МО) для определения сплоченности морского льда:

- Метод МО **XGBoost** (*eXtreme Gradient Boosting*).
- Атрибуты модели: Tb_V , Tb_H , Tb_H / Tb_V , $PR = Tb_V - Tb_H / Tb_V + Tb_H$
- Целевая переменная модели: сплоченность ААНИИ за 2022 и 2023 гг.
- Обучение на данных за 2022 год, оценка качества — на данных за 2023 год



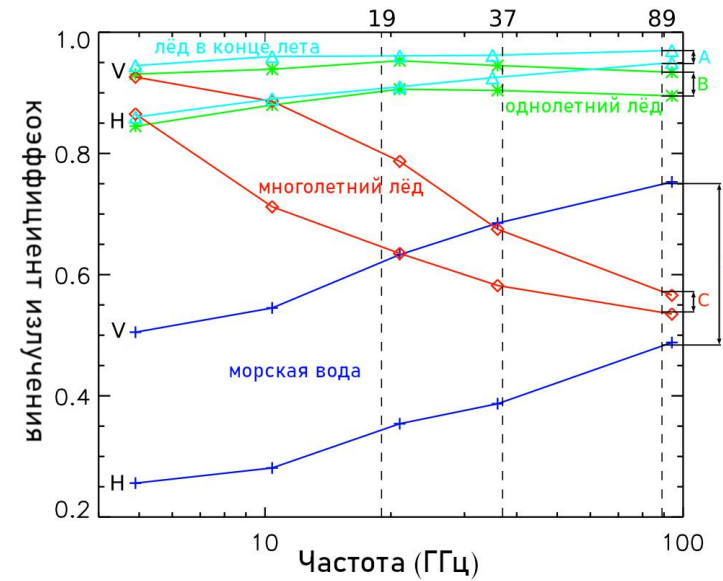
Тихонов В.В., Катамадзе Д.Р., Алексеева Т.А., Афанасьева Е.В., Соколова Ю.В., Хвостов И.В., Романов А.Н. Анализ сплочённости ледяного покрова в Карском море по данным радиометра MIRAS спутника SMOS с использованием методов машинного обучения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024а. Т. 21. № 6. С. 344–355. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-344-355.

2. СМЛ по данным SSMIS, AMSR-2

Алгоритм	Прибор	Основа алгоритма
ASI ARTIST (Arctic Radiation and Turbulence Interaction SStudy) Sea Ice	AMSR-2	PD^{89}
SIC CDR Sea Ice Concentration Climate Data Record	SSMIS	NT: GR_V^{37-19}, PR^{19} BT: 19V, 37V, 37H
OSI SAF Hybrid Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility	SSMIS	BT: 19V, 37V, Bristol: 19V, 37V, 37H
TUD Technical University of Denmark	AMSR-2	BT: 19V, 37V PD^{89}

- **Точки привязки** (характерные яркостные температуры для 100% льда и морской воды): фиксированные или динамические

- **Устранение атмосферных и поверхностных эффектов:** погодные фильтры на основе PR и GR



Spren G., Kaleschke L., Heygster G., Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels, Journal of Geophysical Research: Oceans, 2008, V. 113, No. C2, Article C003384, 14 p., DOI: 10.1029/2005JC003384

Поляризационные соотношения:*

$$PR_f = \frac{Tb(f_V) - Tb(f_H)}{Tb(f_V) + Tb(f_H)}$$

Градиентные соотношения:

$$GR_V^{f1-f2} = \frac{Tb(f_V^{f1}) - Tb(f_V^{f2})}{Tb(f_V^{f1}) + Tb(f_V^{f2})}$$

Поляризационные разницы:

$$PD_f = Tb(f_V) - Tb(f_H)$$

PR_f — поляризационное соотношение для частоты f

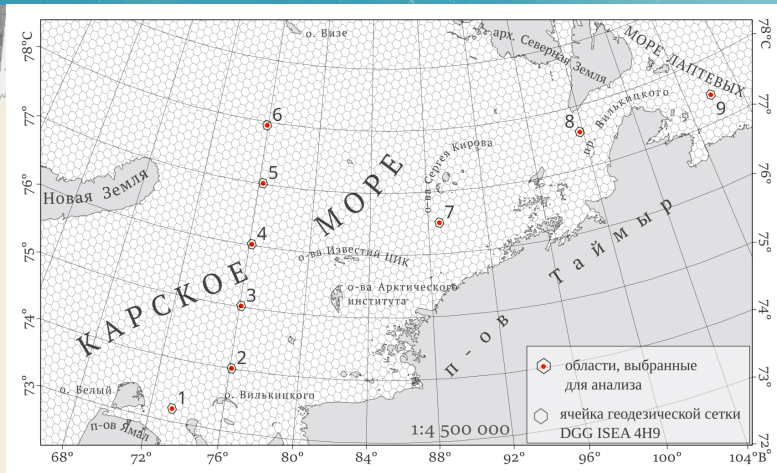
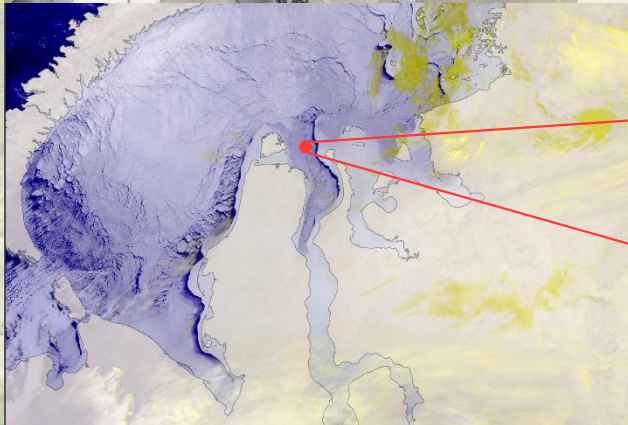
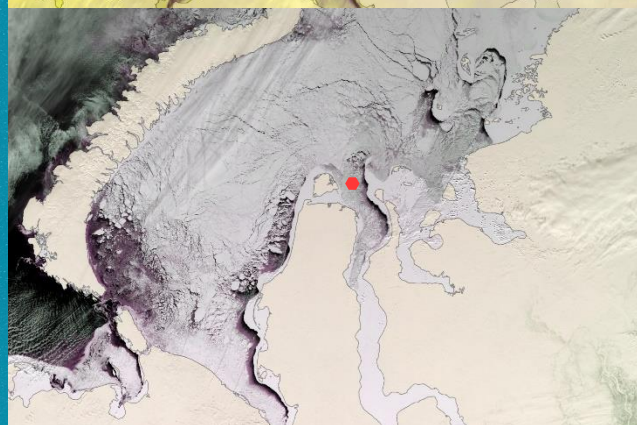
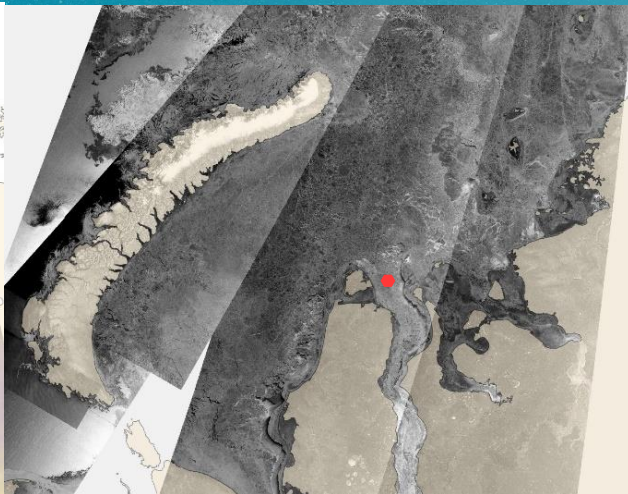
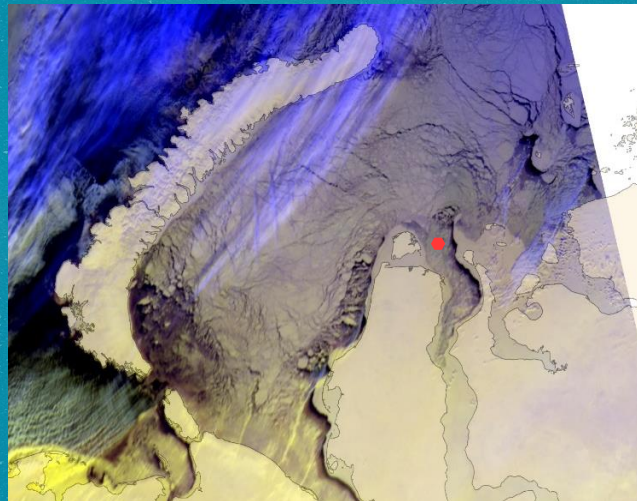
GR_V^{f1-f2} — градиентное соотношение для частот $f1$ и $f2$ на поляризации V

PD_f — поляризационная разница для частоты f

$Tb(f_V)$ — яркостная температура для вертикальной поляризации

$Tb(f_H)$ — яркостная температура для горизонтальной поляризации

3. Эталонная СМЛ от ААНИИ

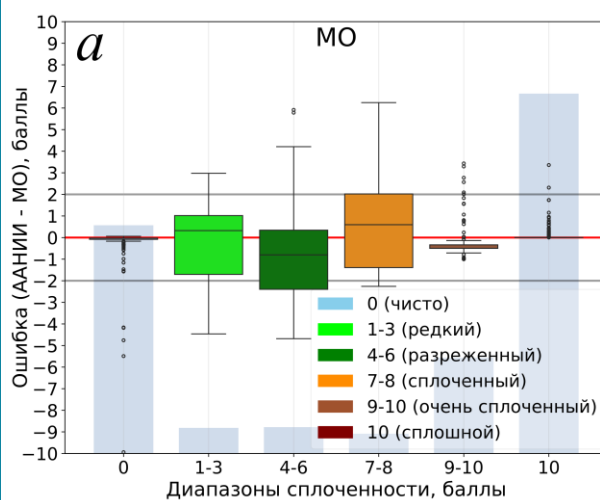


Ячейка
сетки
SMOS
DGG
ISEA
4H9

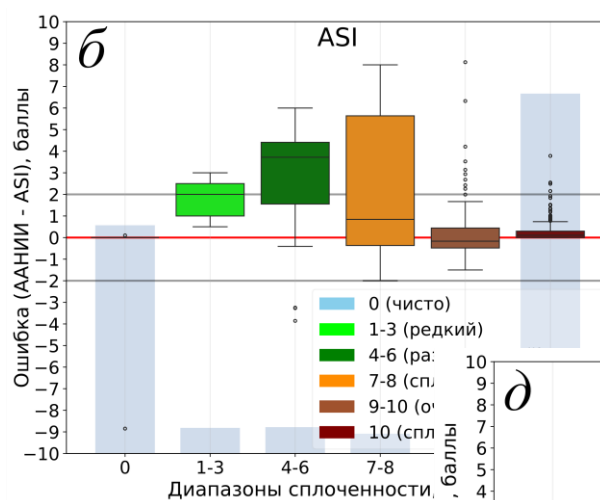
$S \sim$
195 км²

Комплексное
визуальное
дешифрирование
оптических и
радиолокационных
данных ДЗЗ

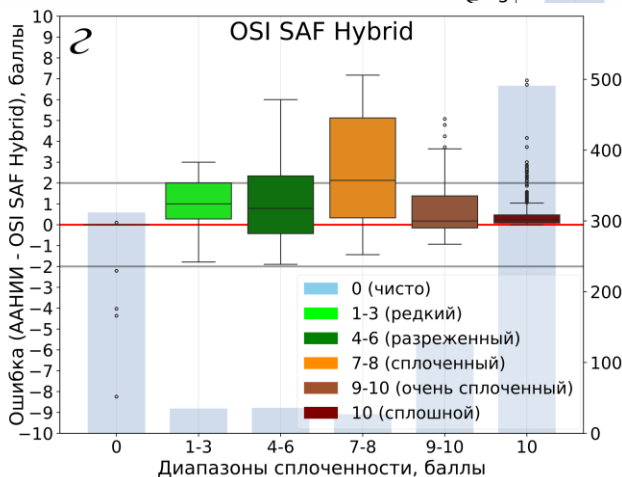
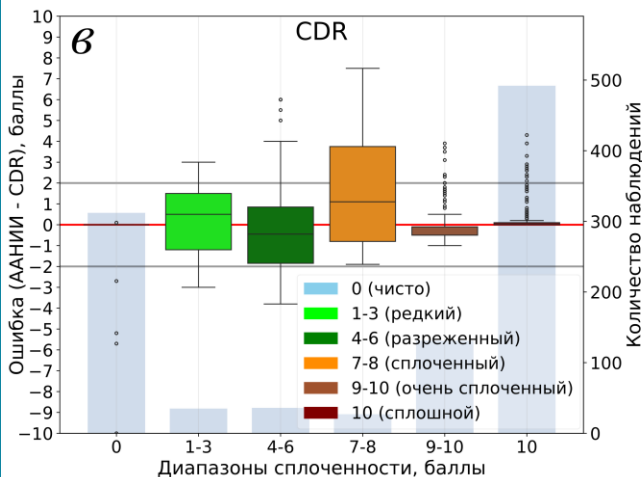
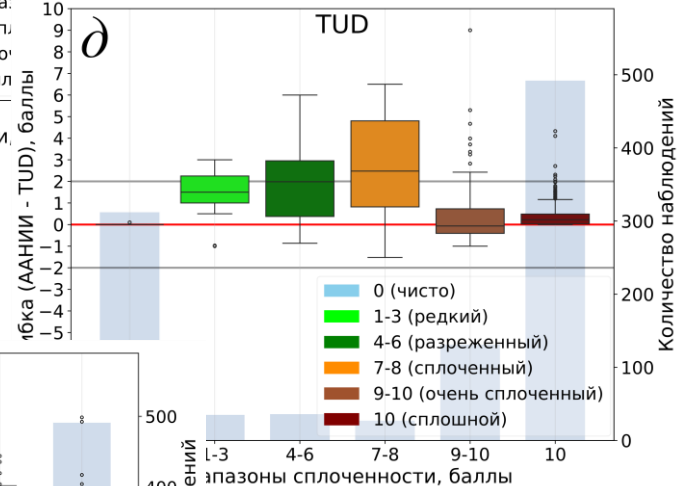
Распределения ошибок алгоритмов для разных диапазонов сплоченностей



(а) MO, данные SMOS (MIRAS)
(б) ASI, данные AMSR-2
(в) CDR, данные SSMIS

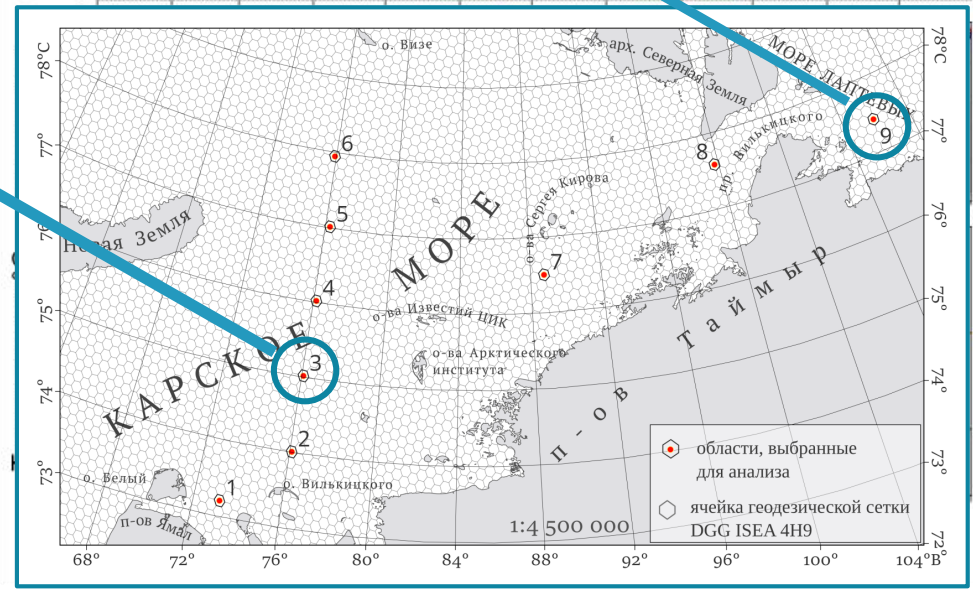
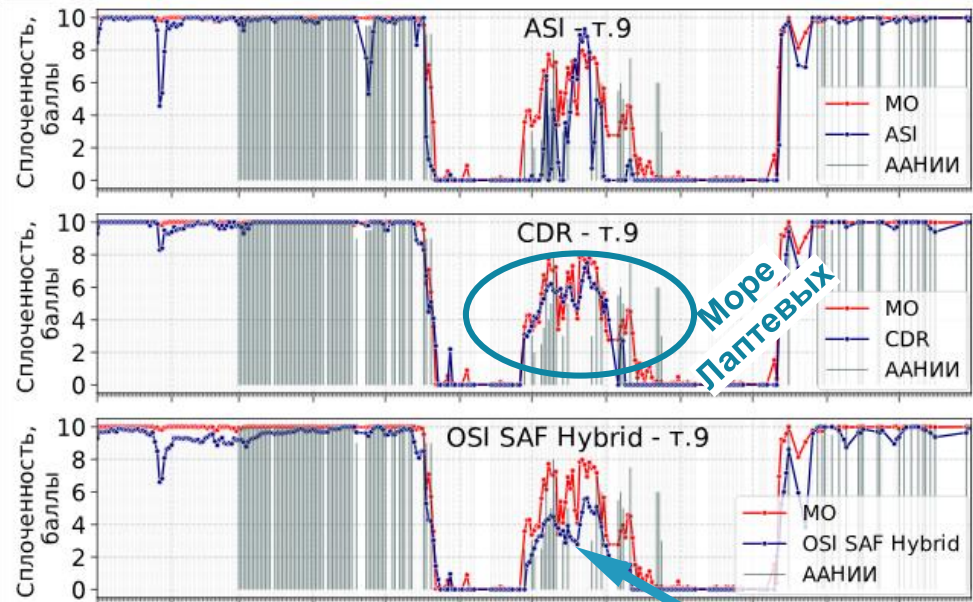
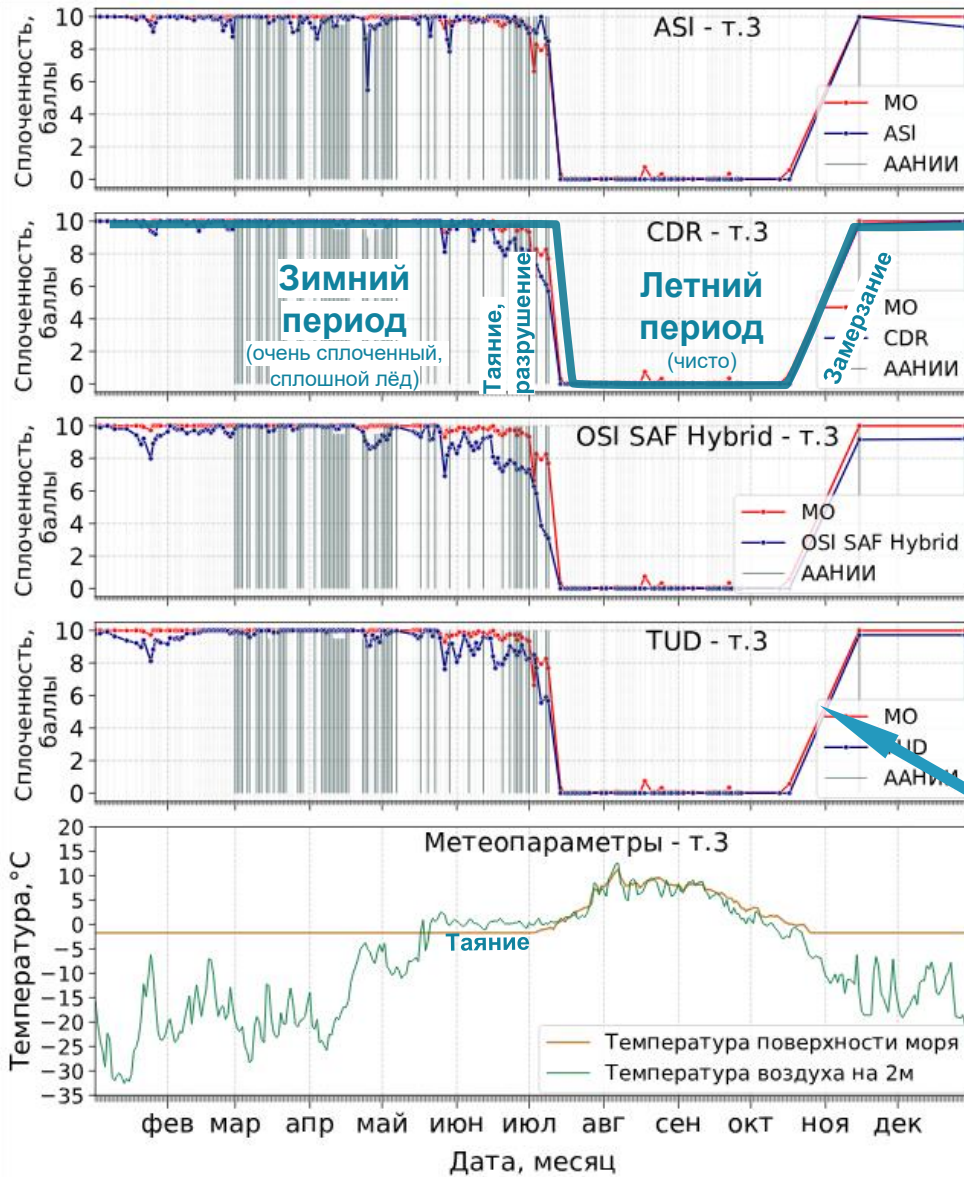


(г) OSI SAF Hybrid, данные SSMIS
(д) TUD, данные AMSR-2

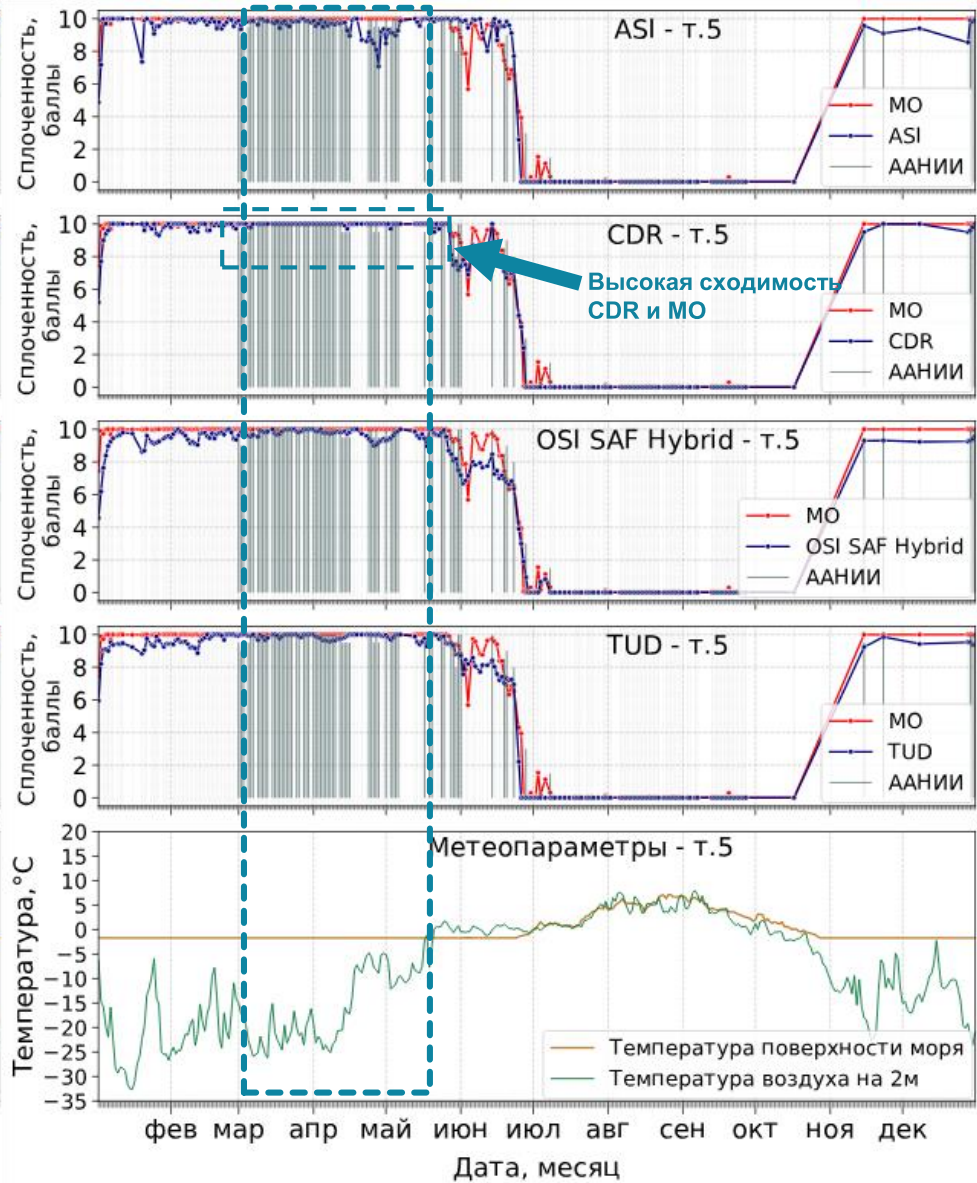
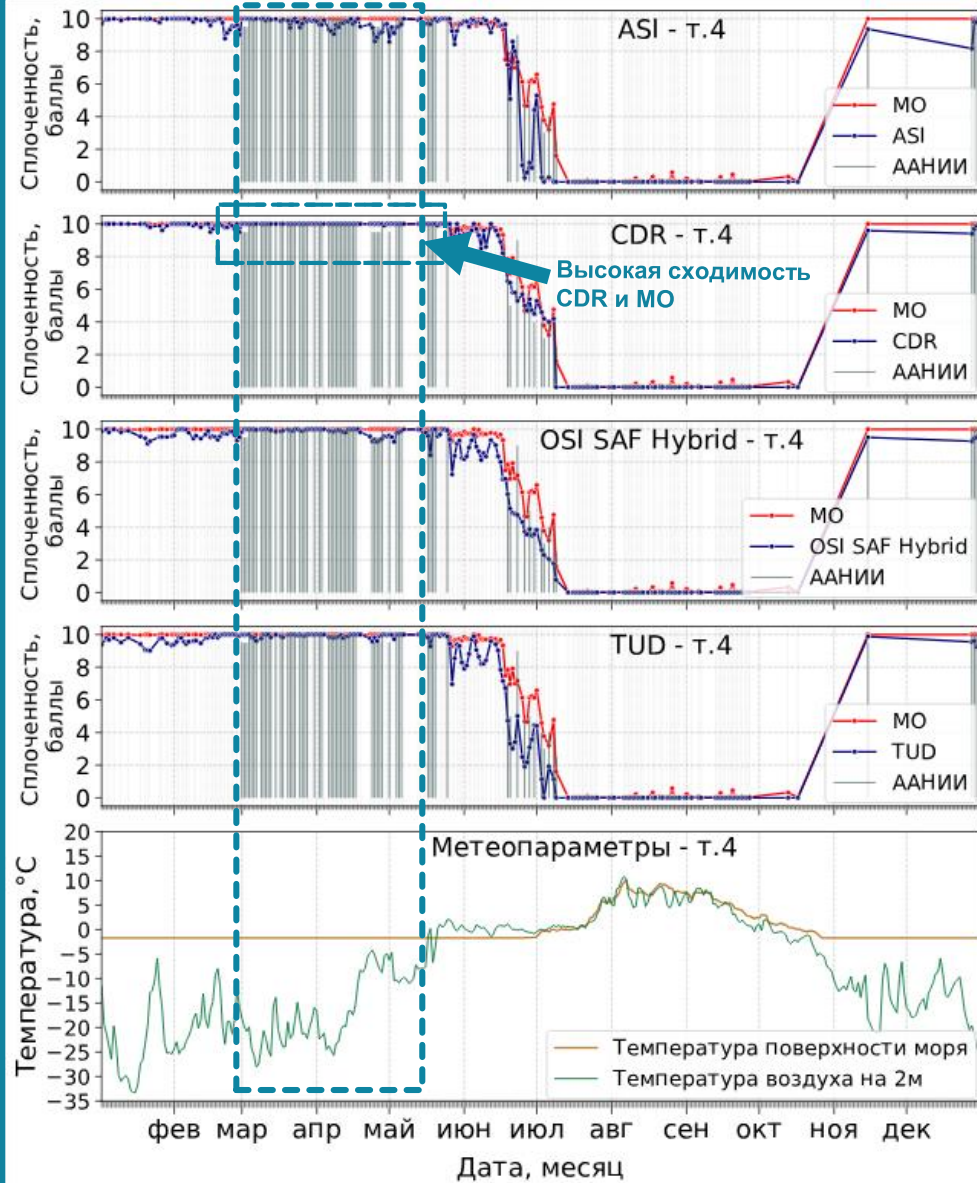


Ошибки алгоритмов	MO	ASI	CDR	OSI SAF Hybrid	TUD
Среднее	0,60	0,81	0,68	1,11	1
Медиана	-0,07	1,08	0,11	0,72	1,02
Ст.откл.	1,45	1,46	1,6	1,45	1,31

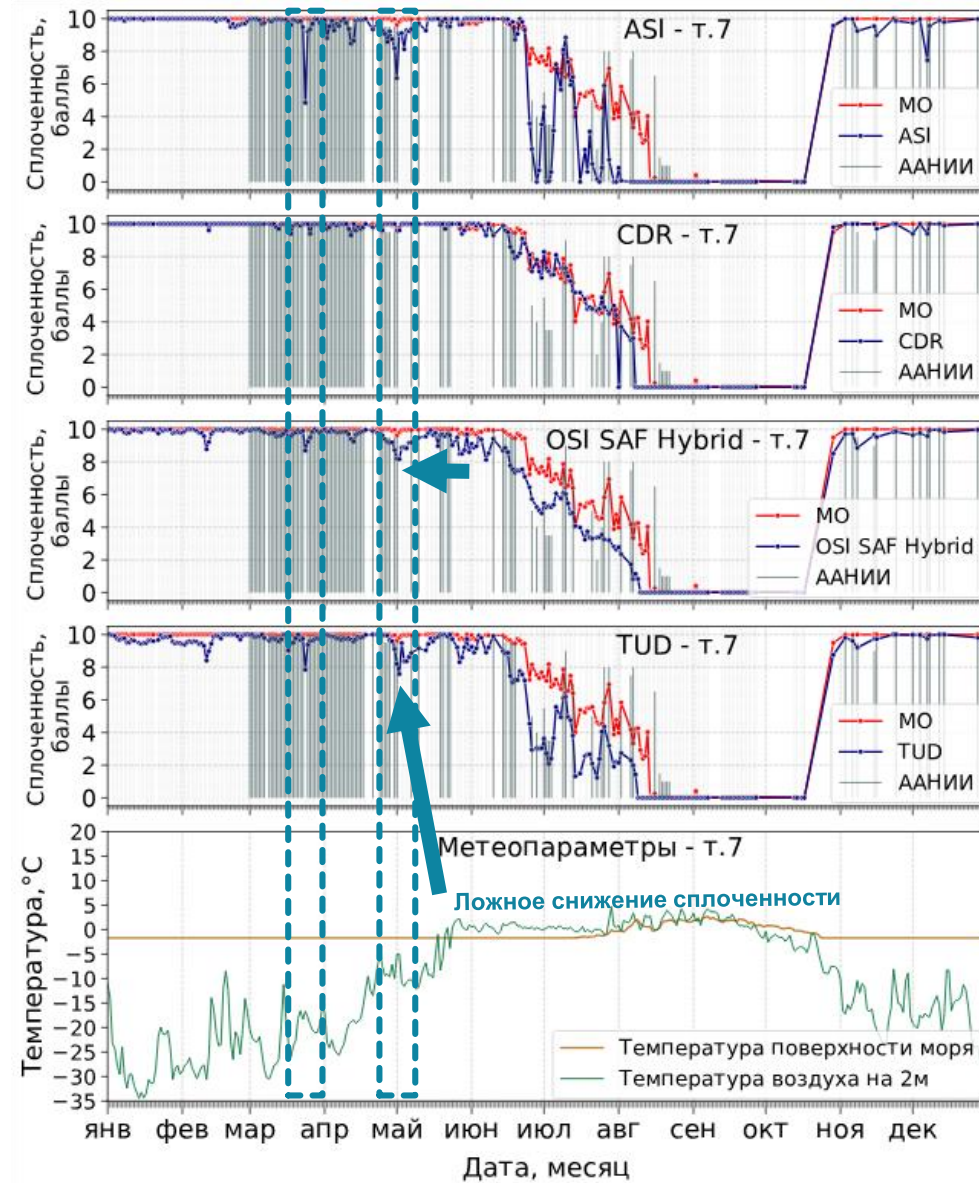
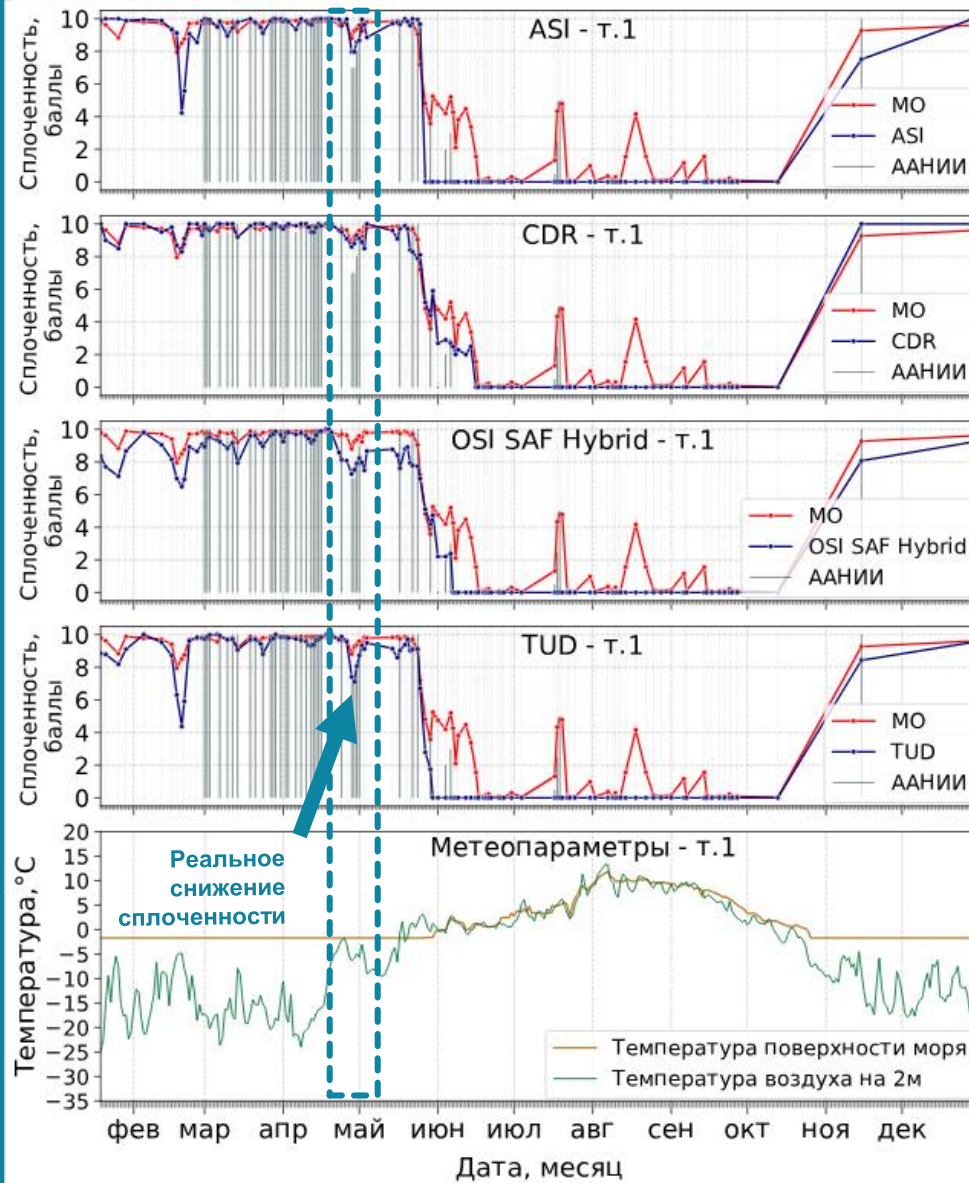
Сравнение временных рядов СМЛ



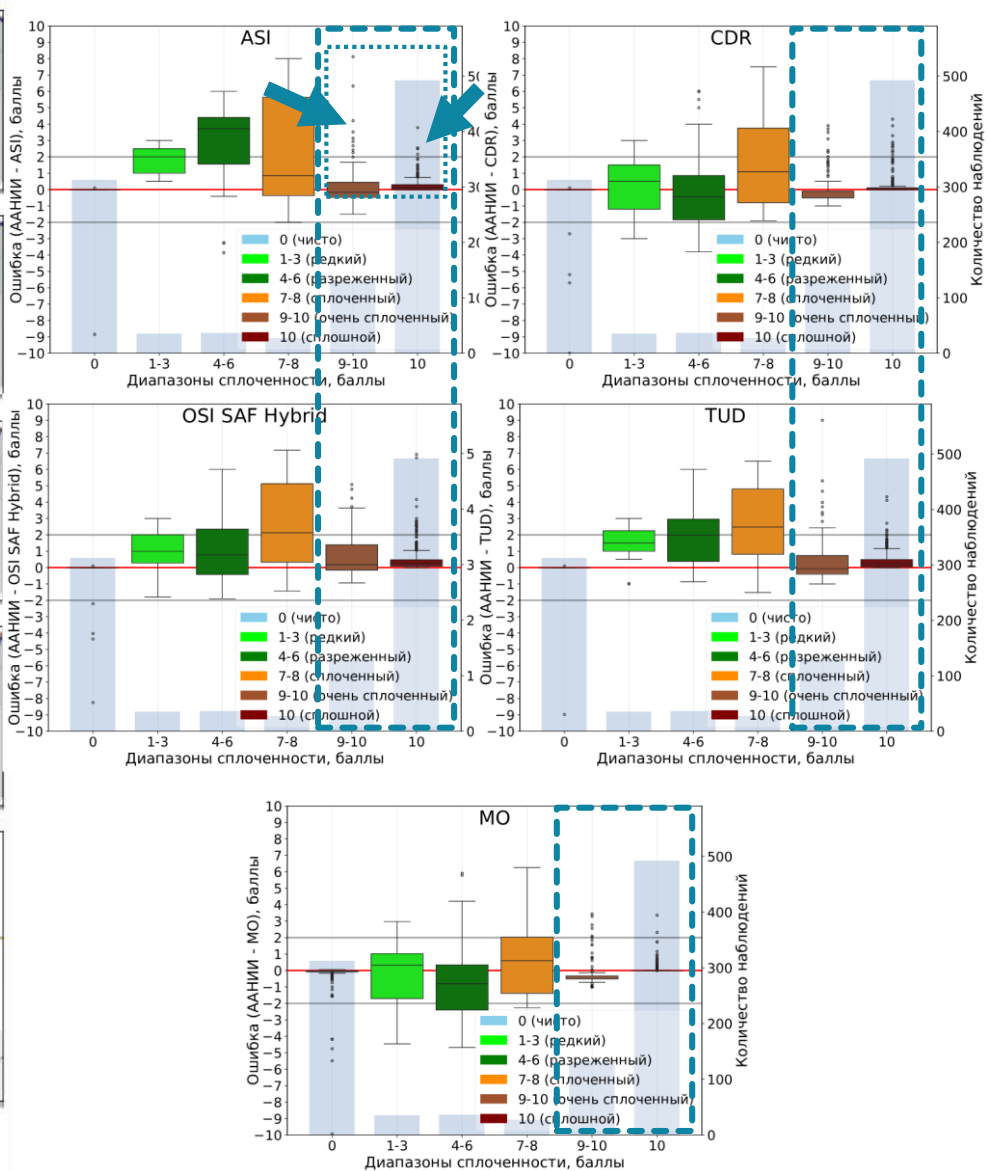
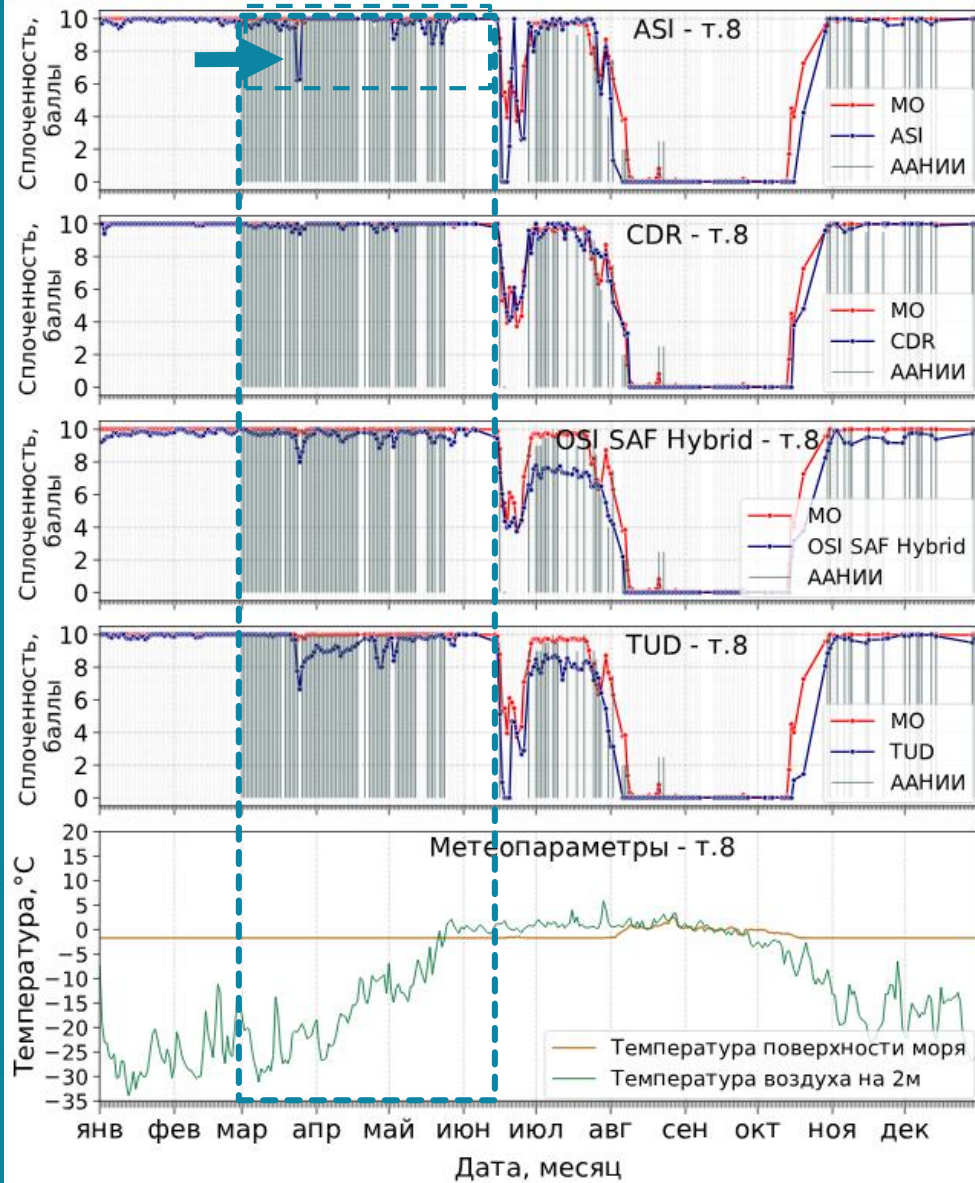
Сравнение временных рядов СМЛ



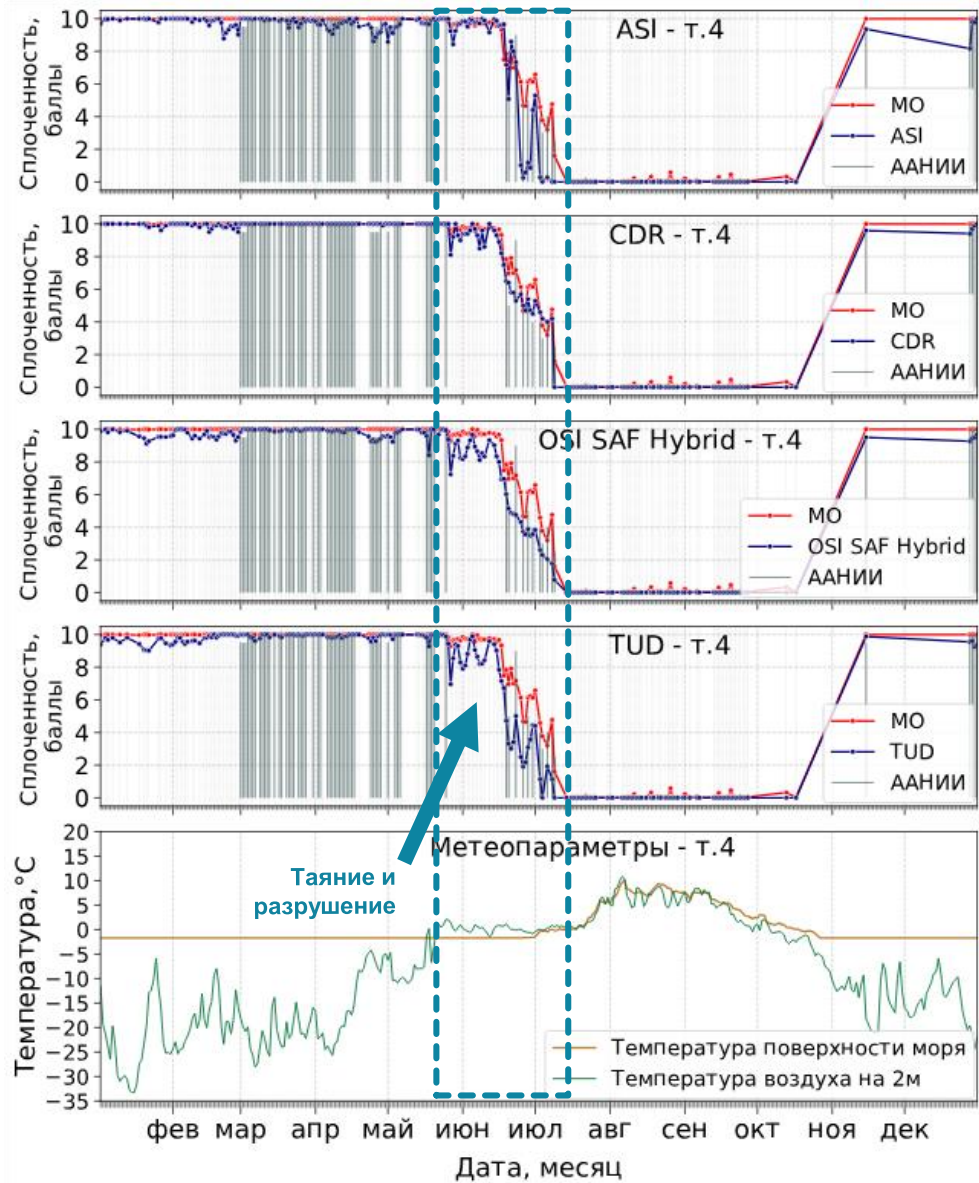
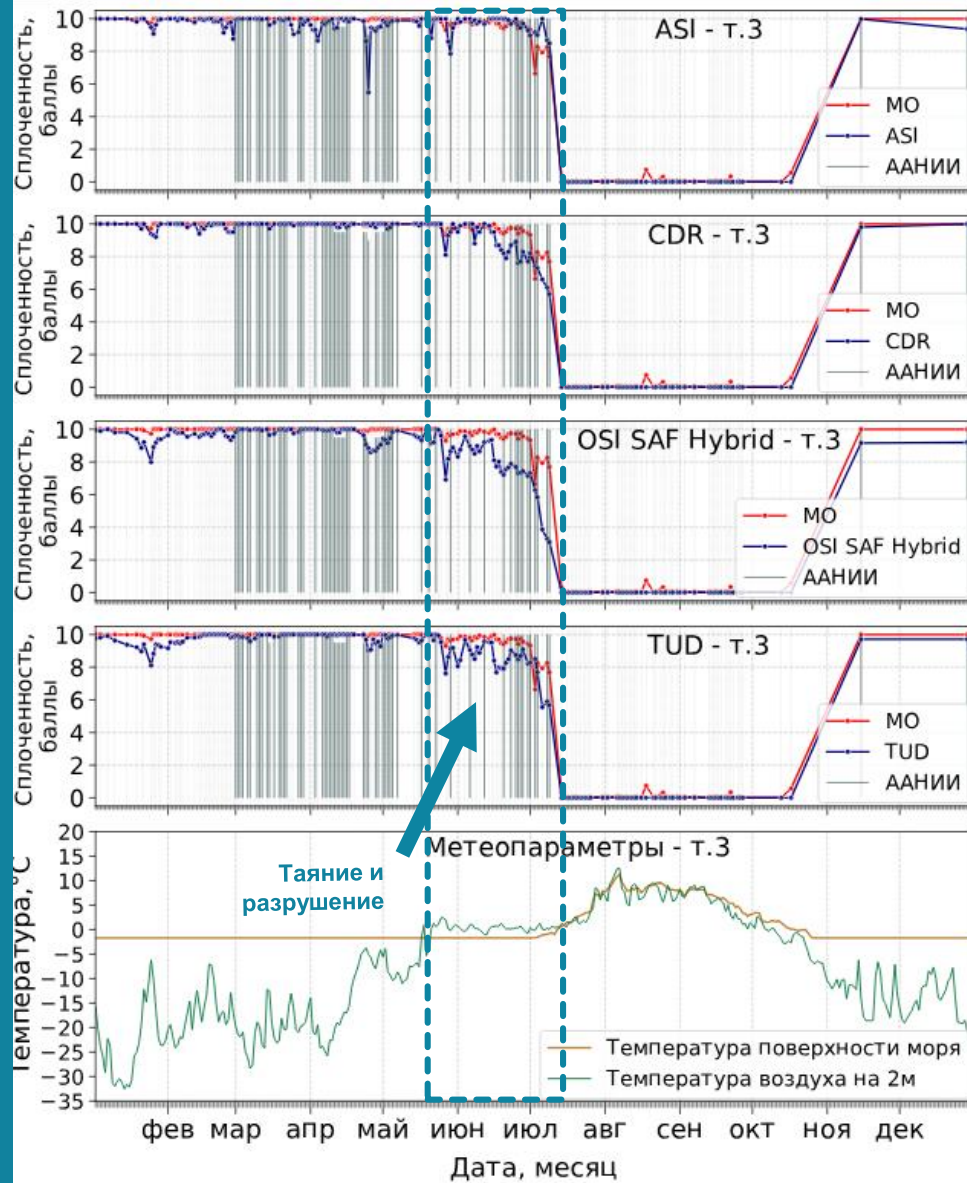
Сравнение временных рядов СМЛ



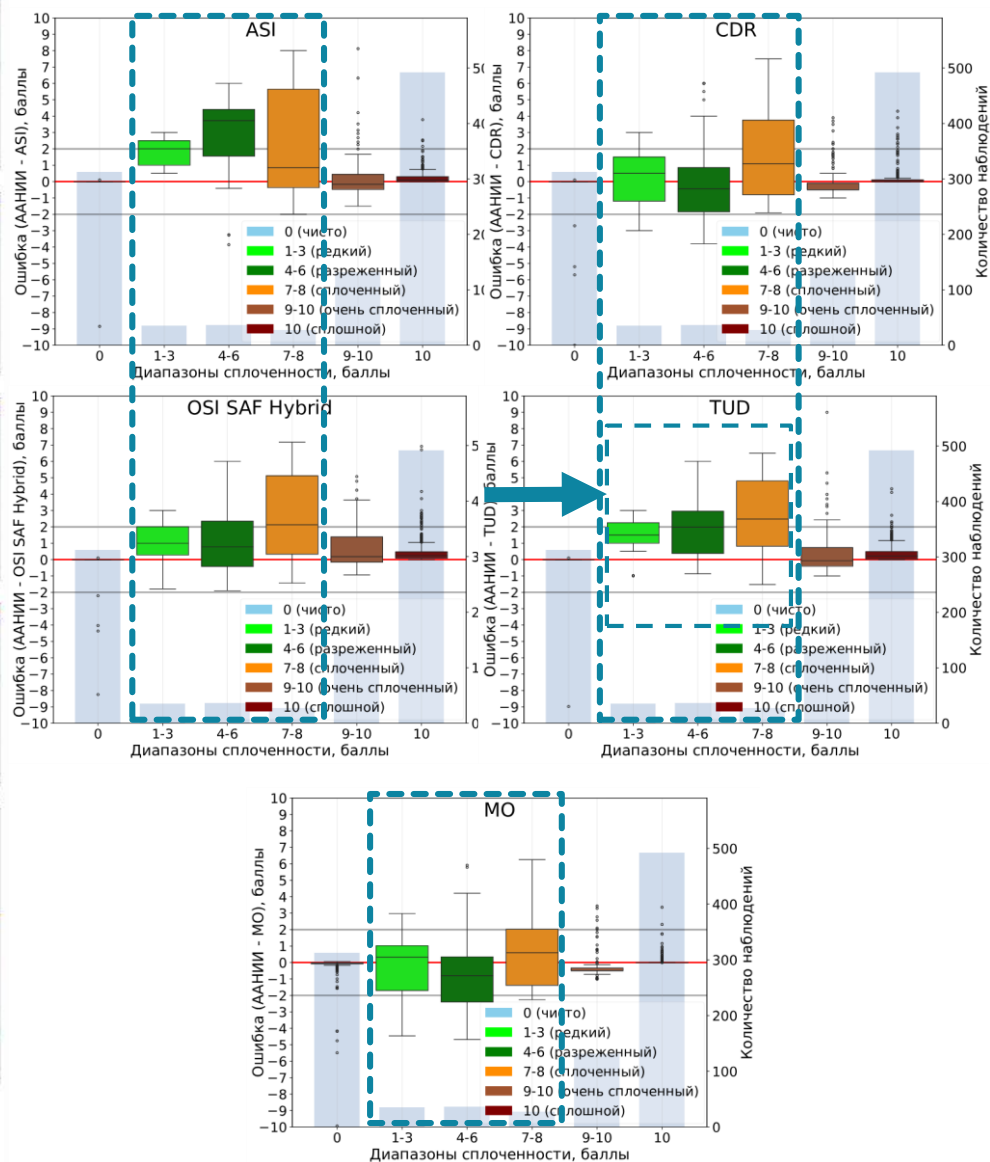
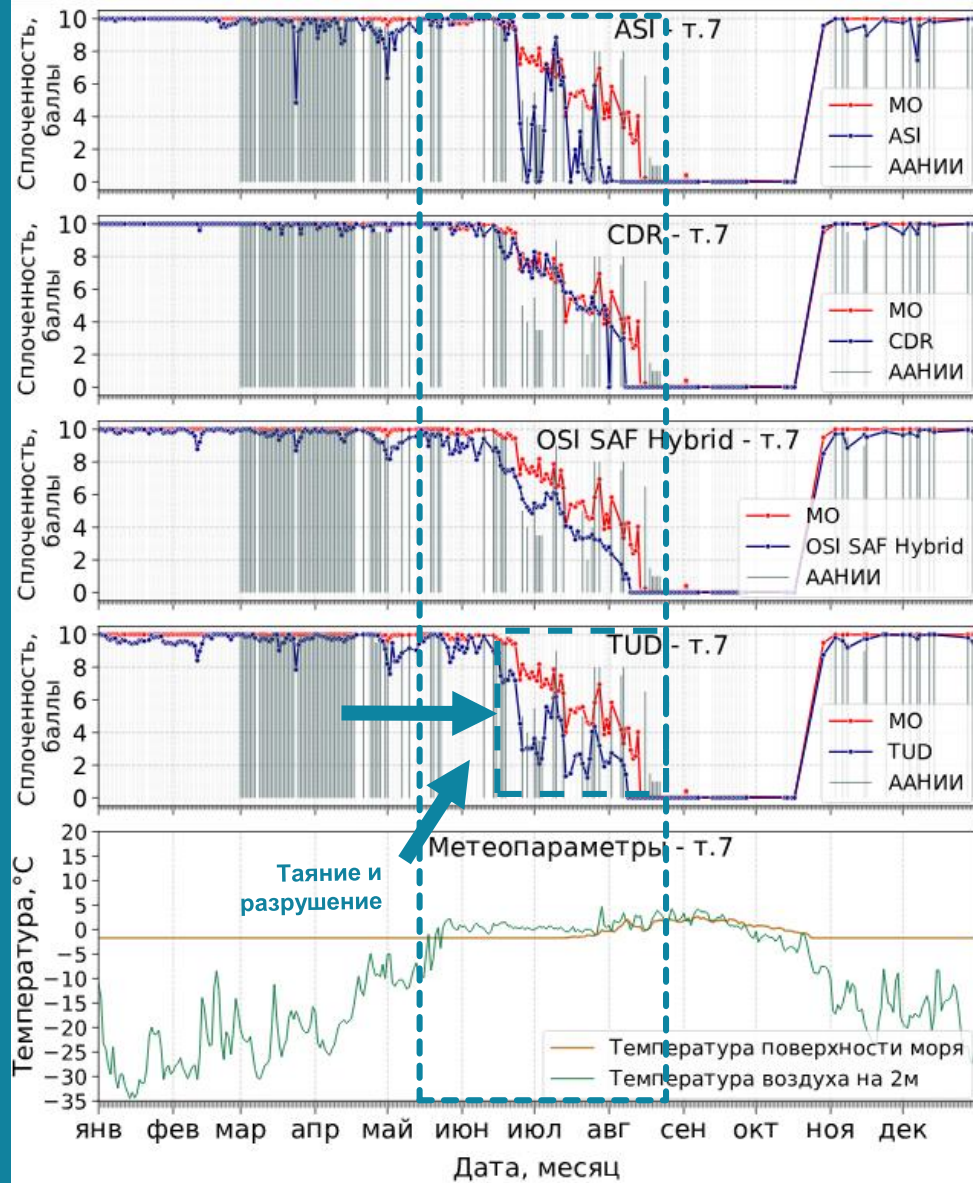
Сравнение временных рядов СМЛ



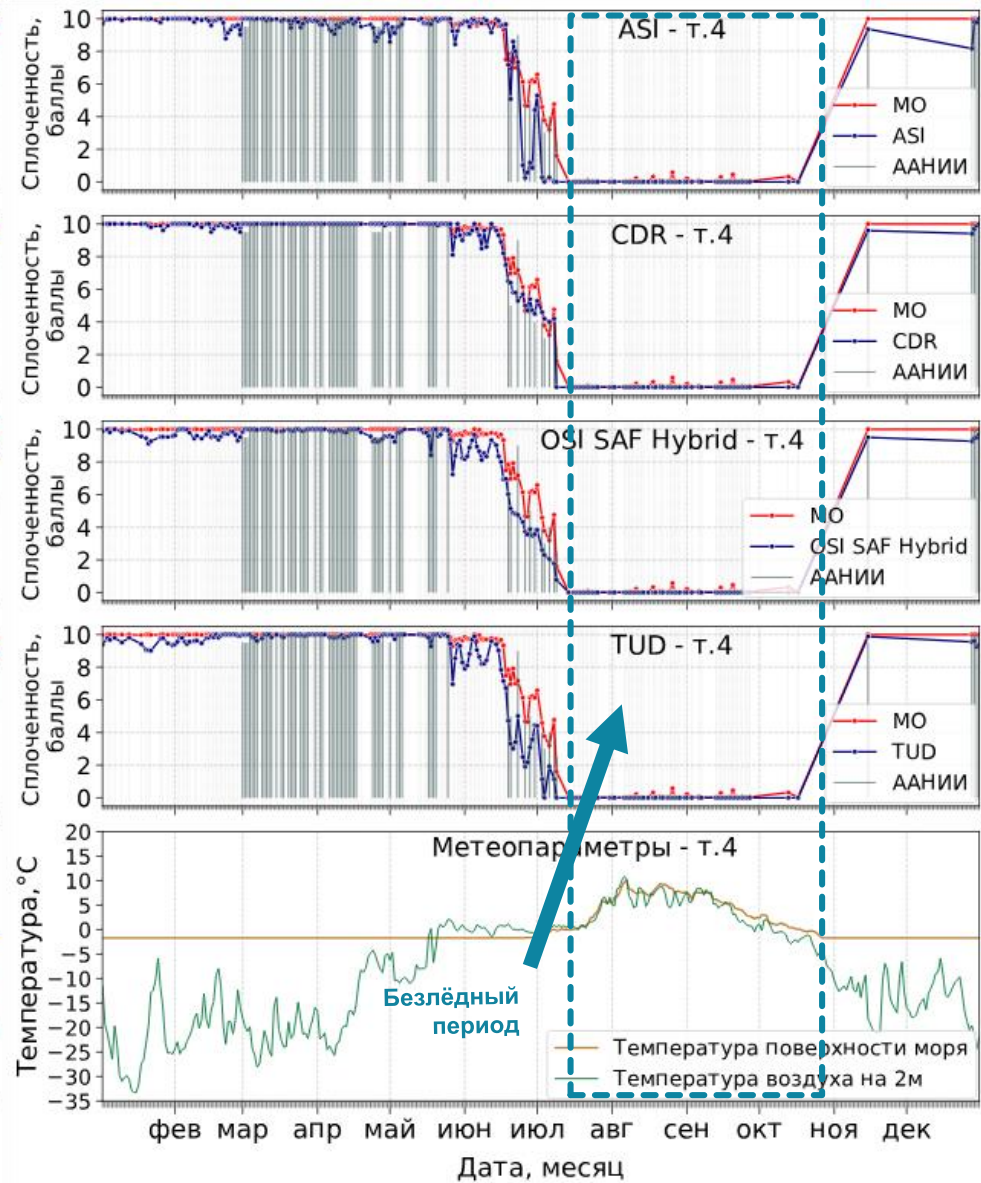
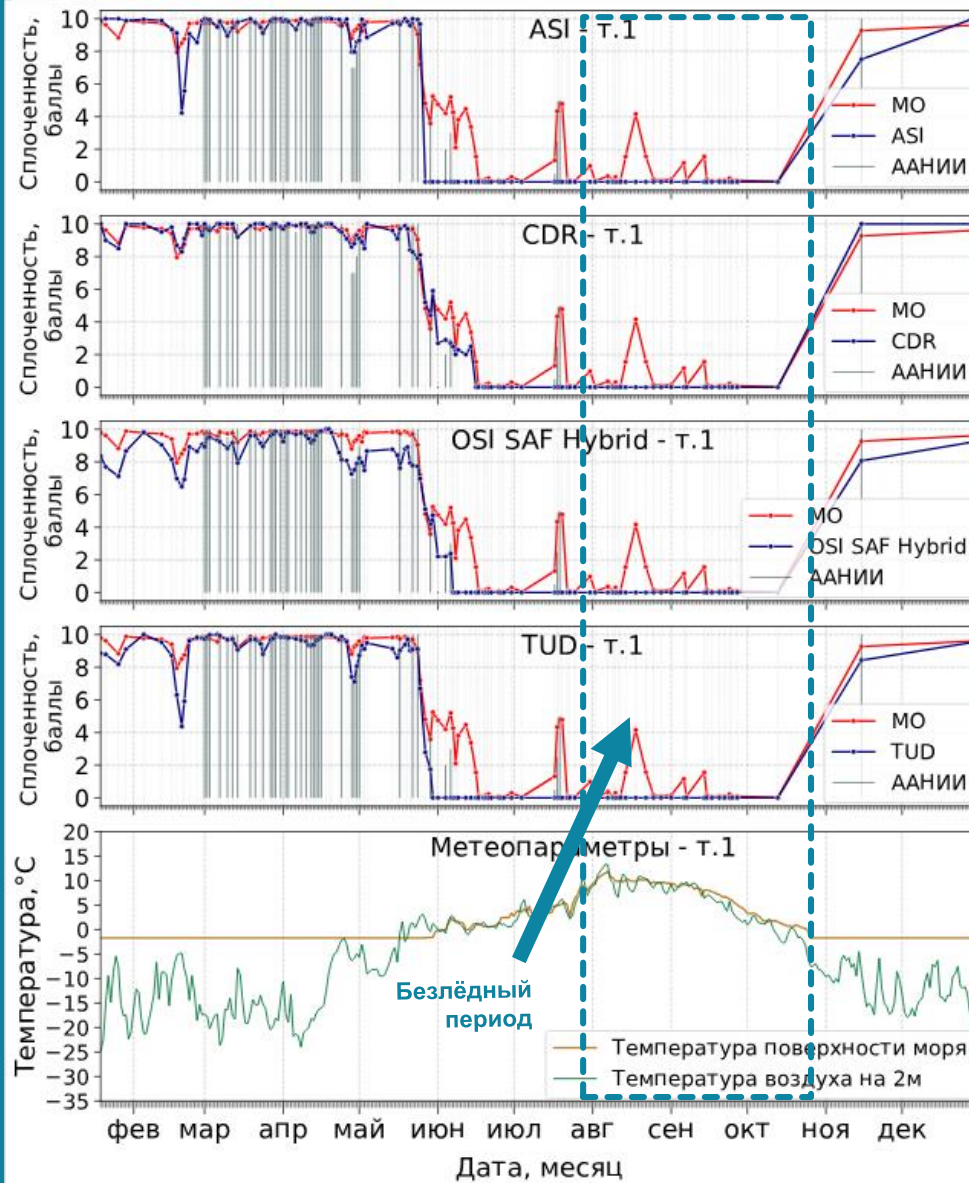
Сравнение временных рядов СМЛ



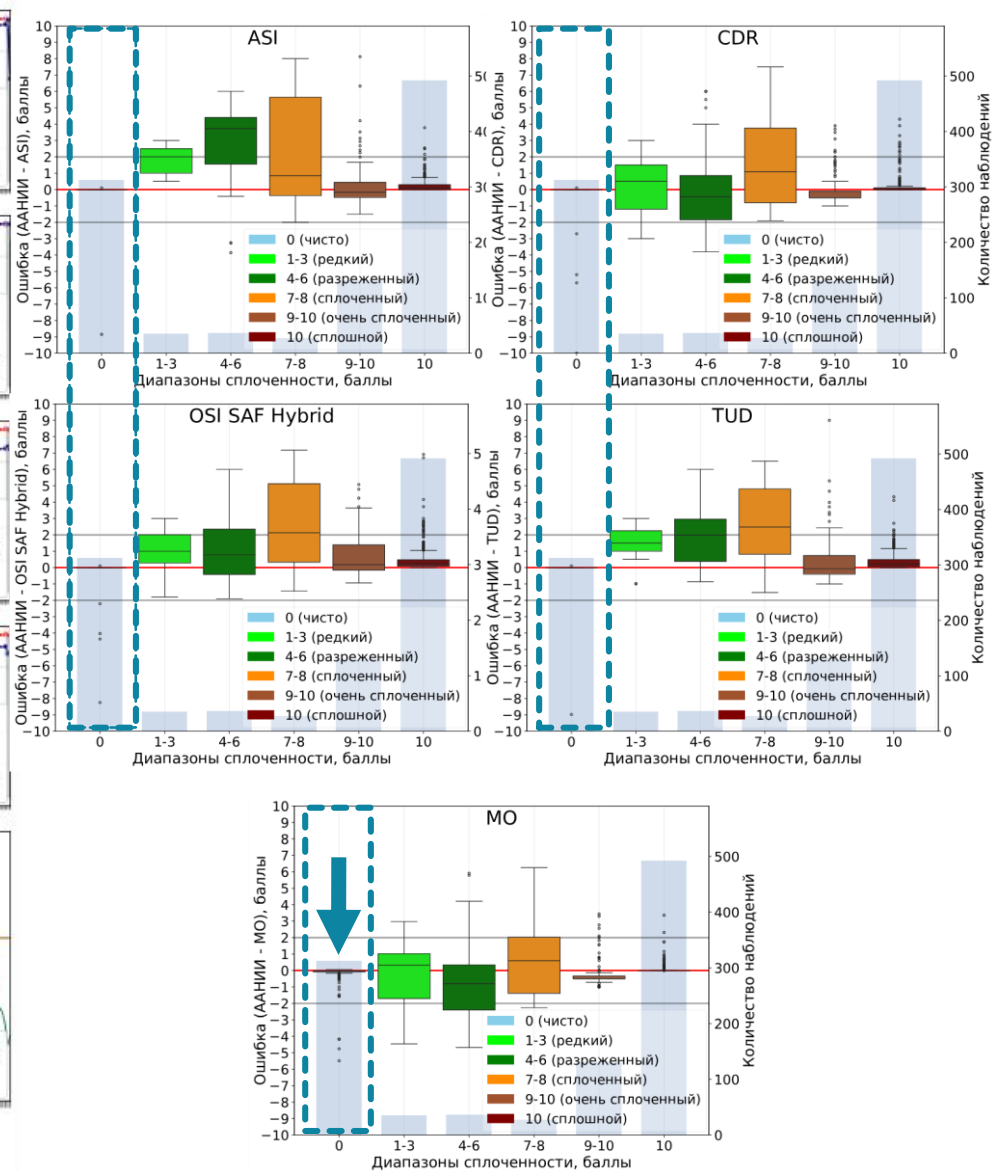
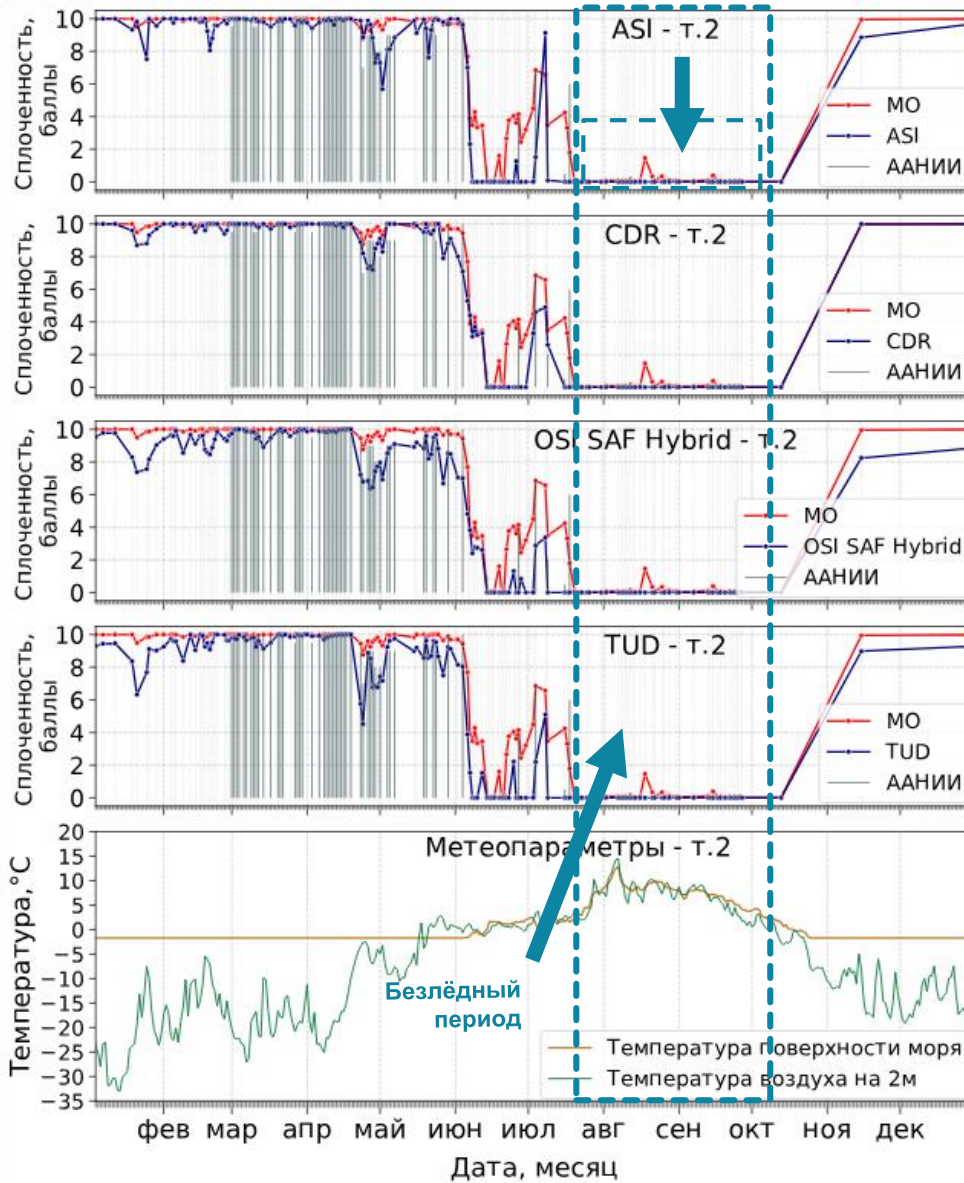
Сравнение временных рядов СМЛ



Сравнение временных рядов СМЛ



Сравнение временных рядов СМЛ



Зимний период

- МО по данным SMOS показывает наилучшие результаты определения СМЛ по сравнению с другими алгоритмами
- показал устойчивость к изменению температуры воздуха

Летний период / Период таяния и разрушения

- МО демонстрирует ошибки, сопоставимые по величине и разбросу с другими алгоритмами, однако в среднем показывает немного более высокую точность

Летний период / Безледный период

- МО выдает больше ложных регистраций наличия льда из-за отсутствия погодных фильтров

Наилучшую сходимость с графиками МО показал алгоритм **CDR**



Влияние толщины льда на определение СМЛ

- L-диапазон (1.4 ГГц) чувствителен к наличию тонких льдов толщиной менее 50-60 см → недооценка СМЛ¹ ← требуются дополнительные исследования

Радиочастотные помехи

- потеря данных из-за помех на частоте 1.4 ГГц, частота и мощность которых меняется во времени и пространстве²

Пространственное разрешение


- низкое разрешение по сравнению с высокочастотными данными

¹Kaleschke L., Tian-Kunze X., Maaß N. et al. Sea ice thickness retrieval from SMOS brightness temperatures during the Arctic freeze-up period // Geophysical Research Letters. 2012. V. 39. No. 5. Article GL050916. 5 p. DOI: 10.1029/2012GL050916

²Oliva R., Daganzo E., Richaume P. et al. Status of Radio Frequency Interference (RFI) in the 1400–1427 MHz passive band based on six years of SMOS mission // Remote Sensing of Environment. 2016. V. 180. P. 64–75. DOI: 10.1016/j.rse.2016.01.013.

Результаты исследования показывают перспективность использования низкочастотных данных SMOS в сочетании с методами машинного обучения для определения СМЛ

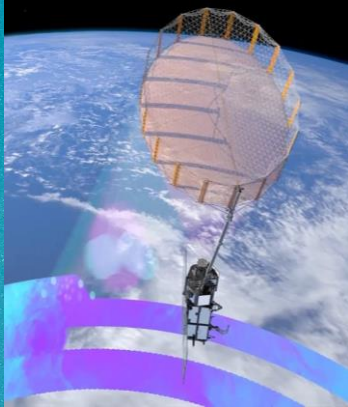
Однако наиболее эффективным подходом представляется **комбинирование** данных **SMOS** с информацией, получаемой от высокочастотных радиометров, таких как **SSMIS** и **AMSR-2**



Идеальный
рецепт?

CIMR

Copernicus
Imaging
Microwave
Radiometer



Основная задача миссии:
мониторинг изменений в Арктике

Планируемые даты запуска:

CIMR-A – 2029

CIMR-B – 2035

Ширина полосы:

1900 км

Угол съёмки:

52° и 55°

Глобальный охват:

48 часов

- Измерения микроволнового излучения на частотах:
1.4, 6.9, 10.6, 18.7 и 36.5 ГГц
- Высокое пространственное разрешение:
1.4 ГГц - **58 км**,
6.9 и 10.6 ГГц - **15 км**,
18.7 ГГц - **5 км**,
36.5 ГГц - **4.5 км**
- Поляризации:
H, V, параметры Стокса
- Предложен **алгоритм IceCREAM** (*Ice Concentration REtrieval from the Analysis of Microwaves*) для определения СМЛ, использующий каналы **6-36 ГГц**

Благодарю за внимание!

j.sokolova@cosmos.ru



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. 329–335. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-329-335.



Тихонов В.В., Катамадзе Д.Р., Алексеева Т.А., Афанасьева Е.В., Соколова Ю.В., Хвостов И.В., Романов А.Н. **Анализ сплочённости ледяного покрова в Карском море по данным радиометра MIRAS спутника SMOS с использованием методов машинного обучения** // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024а. Т. 21. № 6. С. 344–355. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-344-355.



Соколова Ю.В., Тихонов В.В., Катамадзе Д.Р., Алексеева Т.А., Афанасьева Е.В., Хвостов И.В., Романов А.Н. **Данные радиометра MIRAS спутника SMOS для оценки сплоченности морского ледяного покрова** // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (в печати)