

ВЛИЯНИЕ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ МОРСКОГО ЛЬДА НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕГО СПЛОЧЕННОСТИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ МИКРОВОЛНОВОЙ РАДИОМЕТРИИ

*Тихонов В.В.^{1,2,3}, Алексеева Т.А.^{2,1}, Соколова Ю.В.¹, Афанасьева Е.В.^{2,1},
Боярский Д.А.¹, Раев М.Д.¹, Шарков Е.А.¹*

¹Институт космических исследований РАН, г. Москва

²Арктический и антарктический научно исследовательский институт, г. Санкт-Петербург

³Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул



ГРЯЗНЫЙ ЛЕД



Терригенные отложения (осадочные горные породы)

- со дна морей,
- в результате стока рек,
- ветровая эрозия суши.

Прибрежные моря Северного Ледовитого океана:

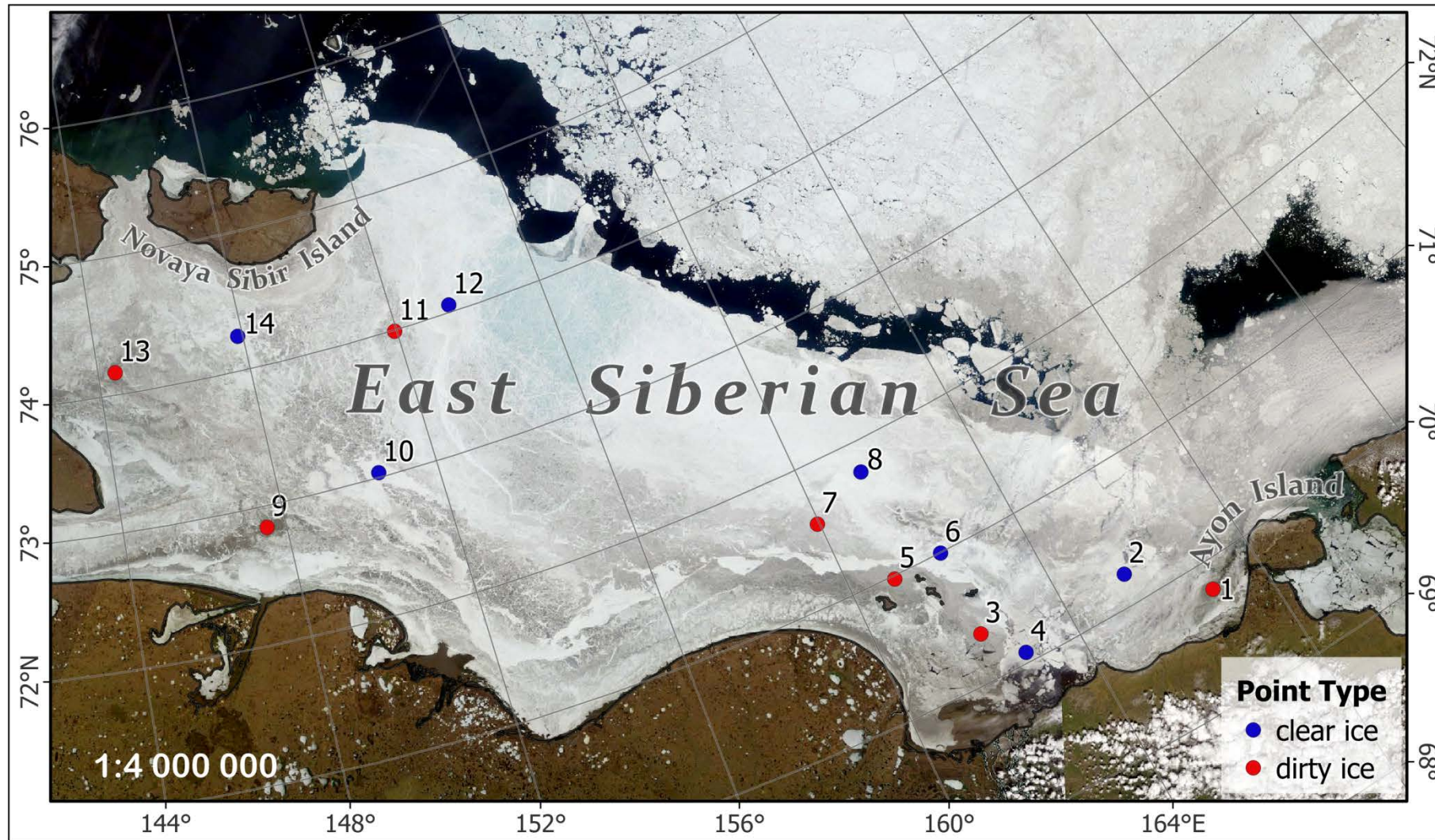
- Карское море,
- море Лаптевых,
- Восточно-Сибирское море,
- Чукотское море,
- море Бофорта.

Чукотское море - 50% ледяного покрова.

1. Алексеева Т.А., Соколова Ю.В., Тихонов В.В. и др. Анализ областей морского льда в Северном Ледовитом океане, неопределяемых алгоритмом ASI по данным спутниковой микроволновой радиометрии // Исслед. Земли из космоса. 2021. № 6. С. 22–38. DOI: 10.31857/S0205961421060026.

2. Алексеева Т.А., Соколова Ю.В., Афанасьева Е.В. и др. Влияние загрязненности морского льда на ошибки в определении сплочённости в период таяния по данным спутниковой микроволновой радиометрии // Исслед. Земли из космоса. 2022. № 5. С. 30–46. <https://doi.org/10.31857/S0205961422050037>.

РЕГИОН ИССЛЕДОВАНИЯ: ВОСТОЧНО-СИБИРСКОЕ МОРЕ

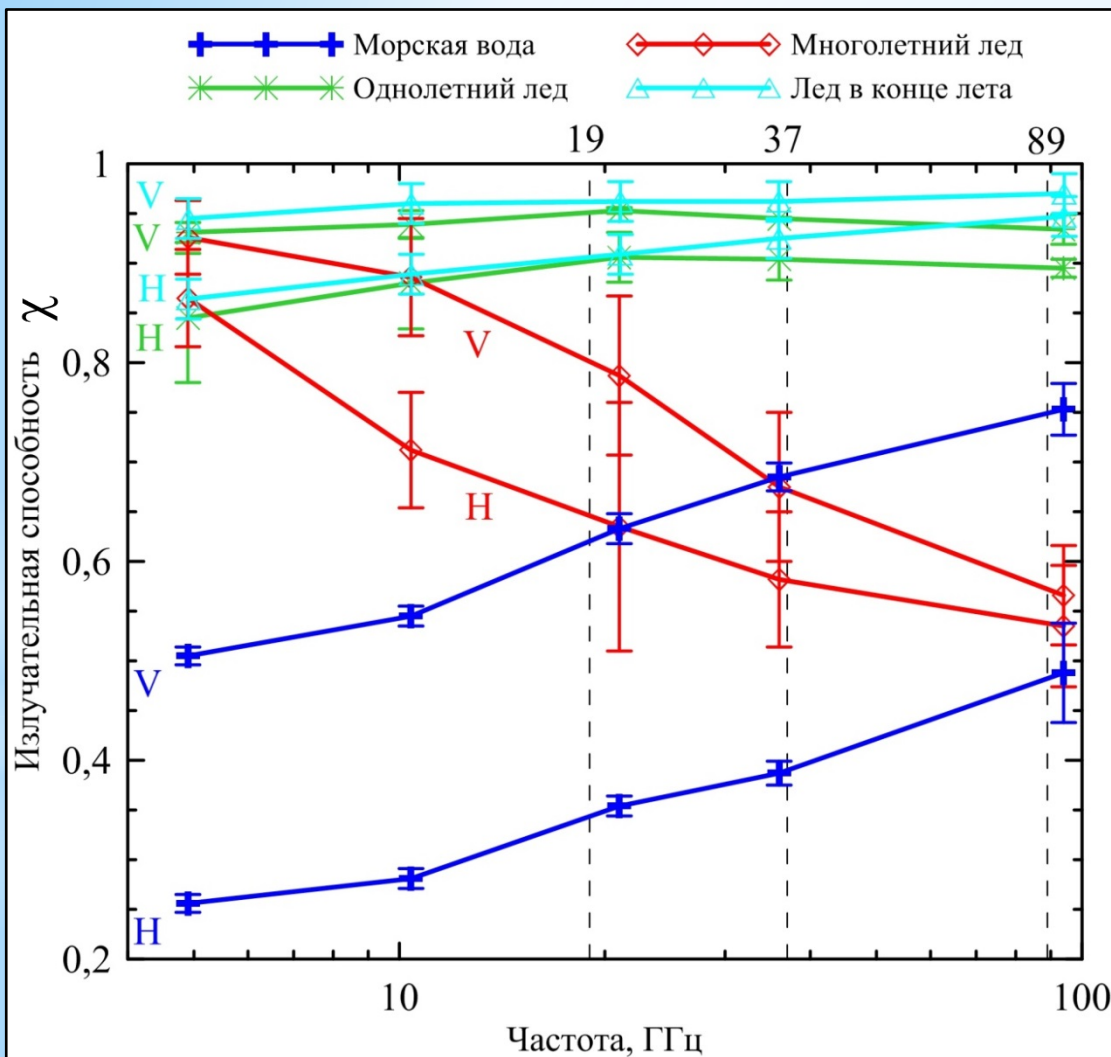


Загрязненность,
сплоченность,
поверхность льда
(видимый диапазон):

- MODIS (Terra, Aqua)
разрешение 250 м,
- Landsat-8
разрешение 30 м,
- Sentinel-2
разрешение 10 м.

14 областей с максимально схожими характеристиками: одинаковой сплоченностью льда (сплошной лед – припай, 10 баллов), историей нарастания и разрушения. Области выбирались попарно – с чистым льдом и загрязнённым. Области с нечетными номерами – лед имел максимальную загрязненность (3 балла), с четными – был чистым.

АЛГОРИТМЫ СПУТНИКОВОЙ МИКРОВОЛНОВОЙ РАДИОМЕТРИИ



ASI, NasaTeam (NT), Bootstrap (BT), OSI SAF hybrid, OSI SAF (TUD)
NOAA/NSIDC Sea Ice Concentration Climate Data Record (CDR)

Алгоритм ASI

85.5, 91.655, 89 ГГц

$$P = T_{\text{я}}^V - T_{\text{я}}^H = (\chi^V - \chi^H)T$$

Алгоритм NT

19 ГГц V и H, 37 ГГц V

$PR(19)$ и $GR(V)$

3 типа поверхности: FY, MY, OW

Алгоритм BT

сплоченный лед:

37 ГГц V и H

другие регионы:

19,35 V и 37 ГГц V

Алгоритм CDR

NT и BT → ?:

19 ГГц V и H,

37 ГГц V и H

Алгоритм OSI SAF hybrid

Bristol ≡ BT:

19 ГГц V, 37 ГГц V и H

BT – вода, Bristol – лед, до 4 б. – среднее

Алгоритм TUD

BT – 19 ГГц V и 37 ГГц V,

85 ГГц V и H

$$C = \left(C_{BT} \left[1.35 - (T_{\text{я}}(85V) - T_{\text{я}}(85H)) / 40 \right] \right)^{0.5} - 0.03$$

ASI – данные AMSR-2 (разрешение 6,25 км),

NT, BT, CDR – данные SSMIS (разрешение 25 км),

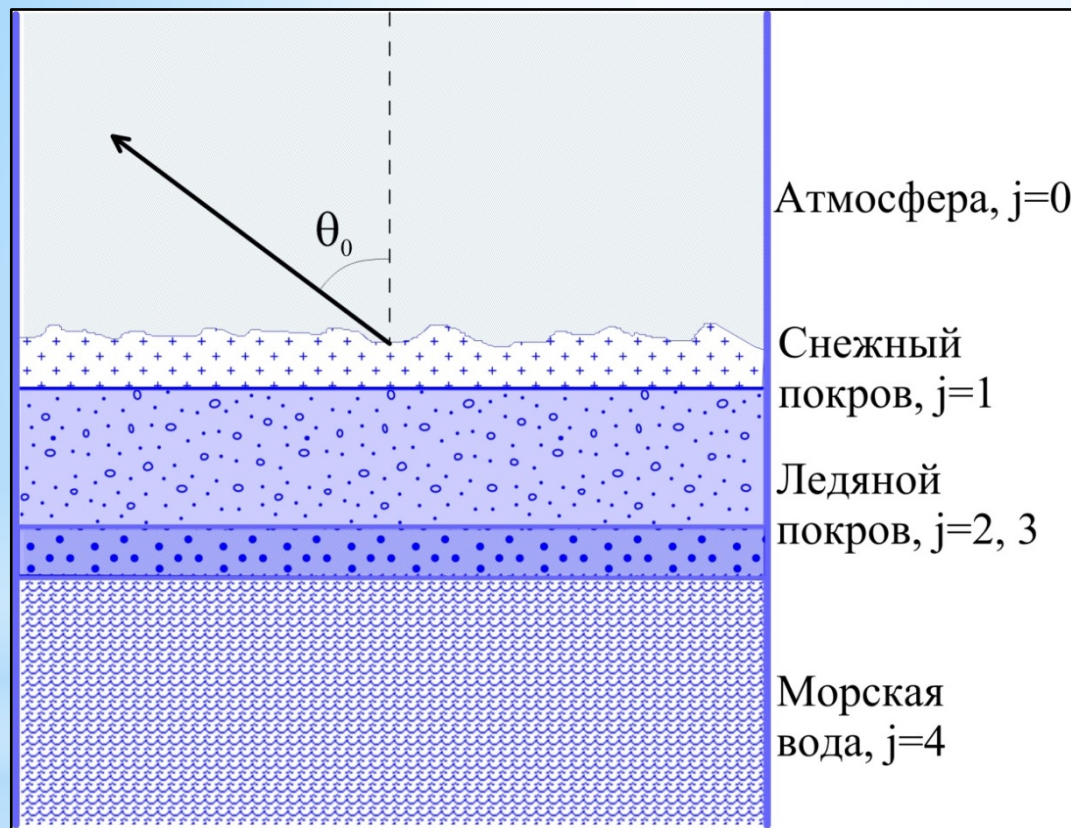
OSI SAF hybrid – данные SSMIS (разрешение 10 км),

TUD – данные AMSR-2 (разрешение 10 км).

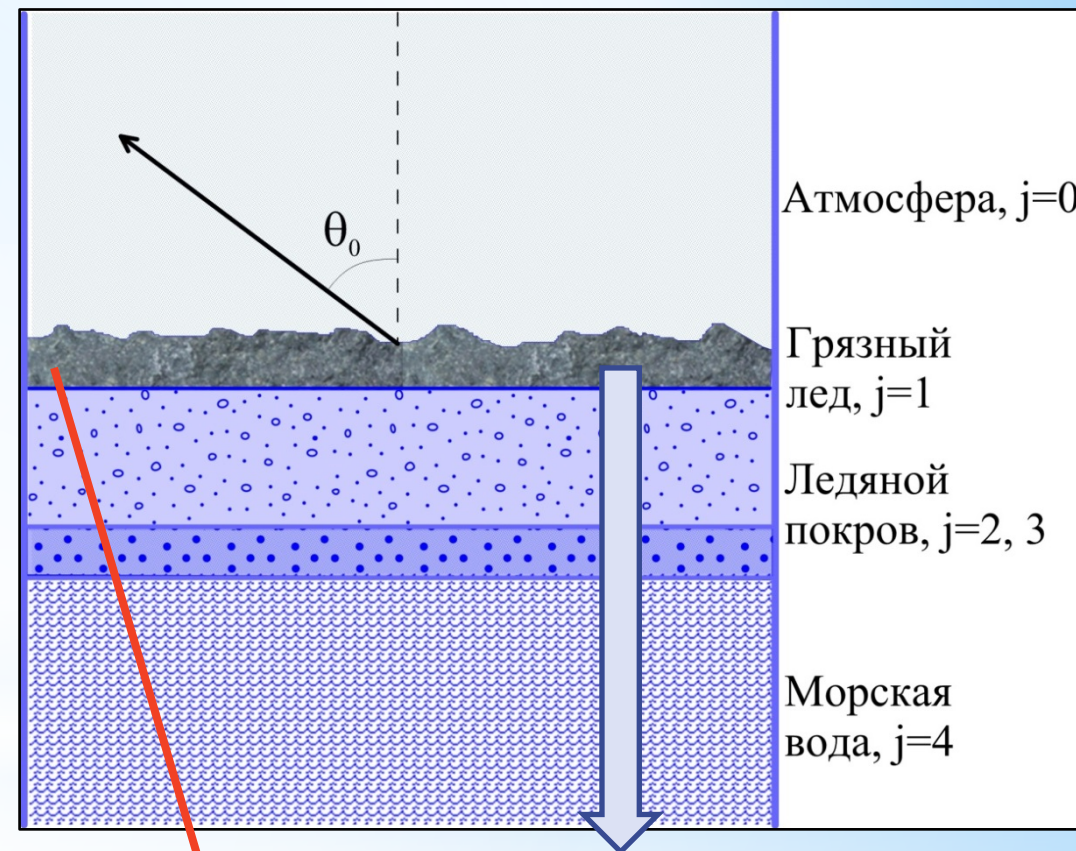
1. NORSEX Group. Norwegian remote sensing experiment in a marginal ice zone // Science. 1983. Vol. 220(4599). P. 781– 787.

2. Onstott R.G., Grenfell T.C., Matzler C., Luther C.A., Svendsen E.A. Evolution of microwave sea ice signatures during early summer and midsummer in the marginal ice zone // J. Geophys. Res. 1987. Vol. 92. No. C7. P. 6825– 6835.

МОДЕЛЬ



$$T_{я}^{H,V} = f(\varepsilon_j, T_j)$$



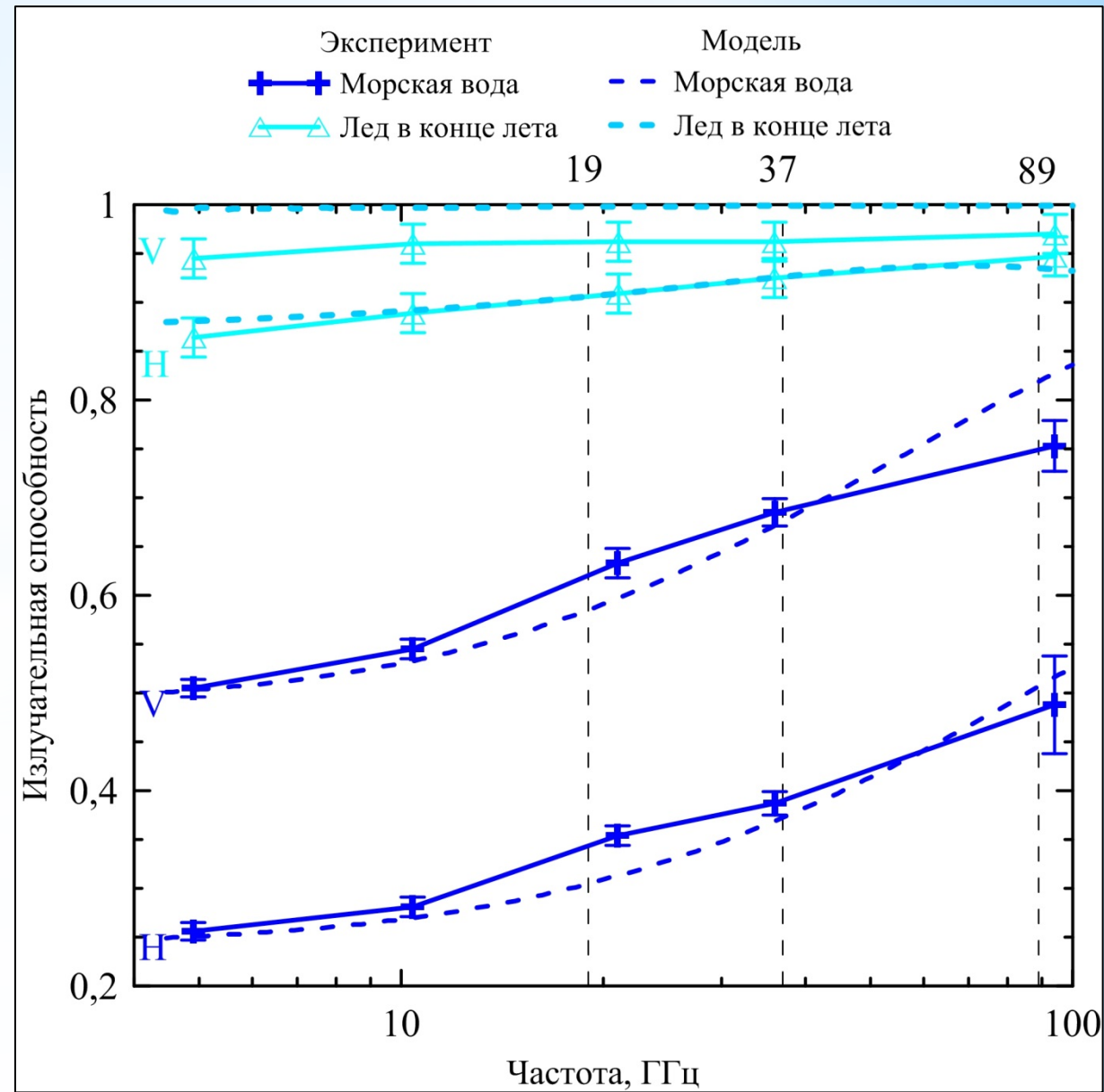
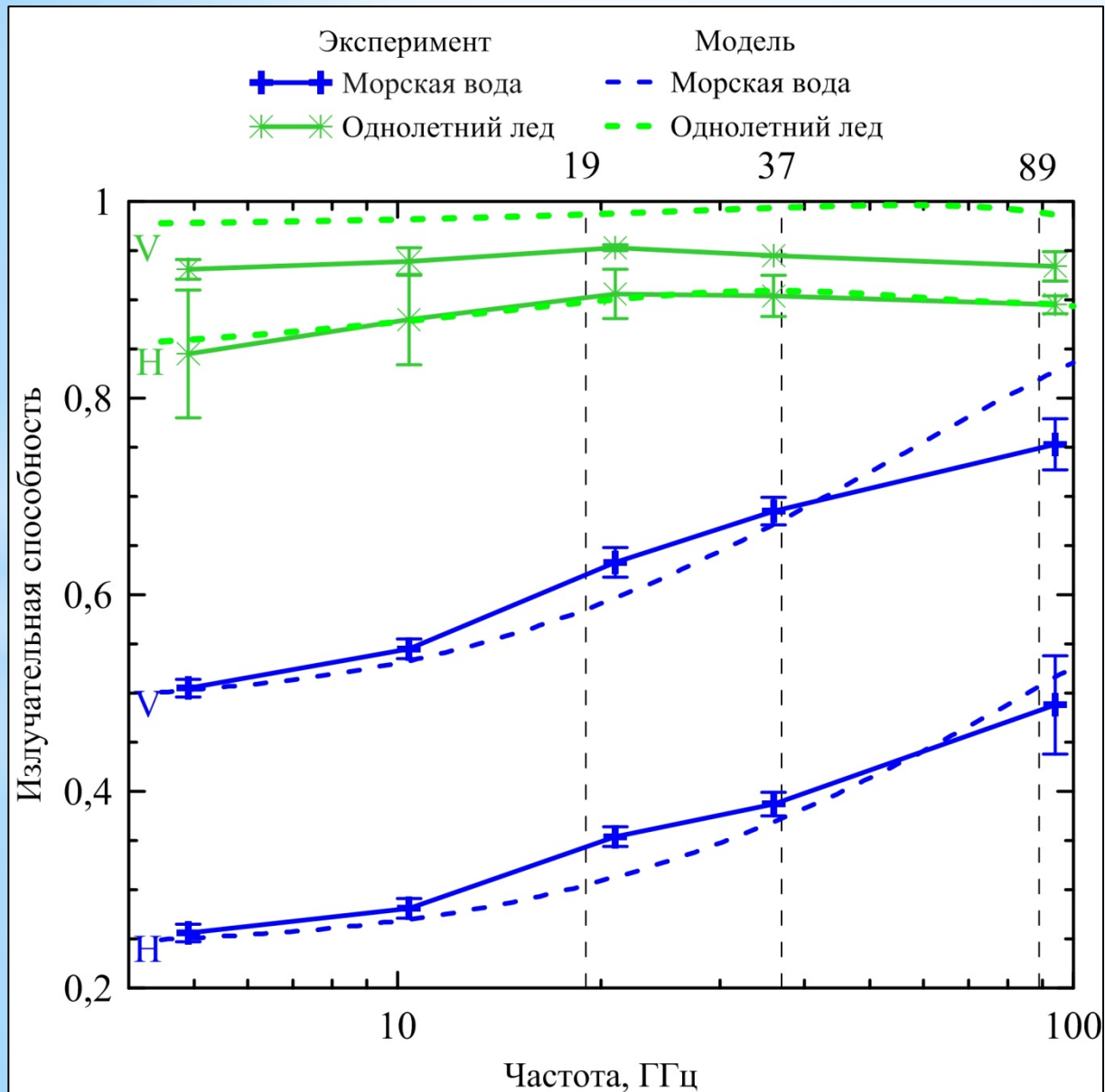
лед ($V_{\text{л}}$), грязь ($V_{\text{г}}$), вода ($V_{\text{в}}$), воздух (V_0)

илистые и глинистые фракции
размер частиц менее 63 мкм

$$\sqrt{\varepsilon_{\text{гмл}}} = V_{\text{л}}\sqrt{\varepsilon_{\text{л}}} + V_{\text{г}}\sqrt{\varepsilon_{\text{г}}} + V_{\text{в}}\sqrt{\varepsilon_{\text{в}}} + V_0\sqrt{\varepsilon_0}$$

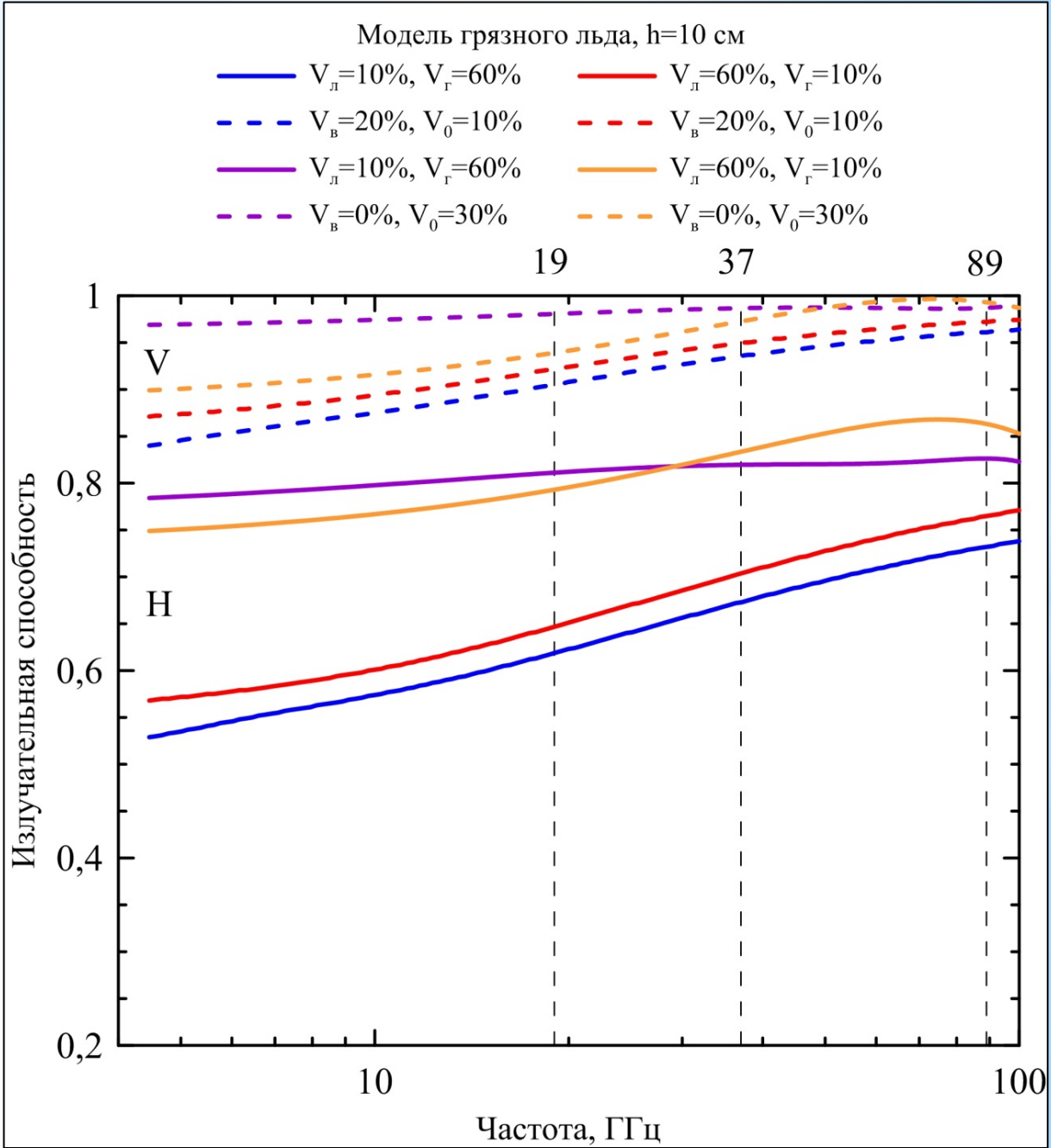
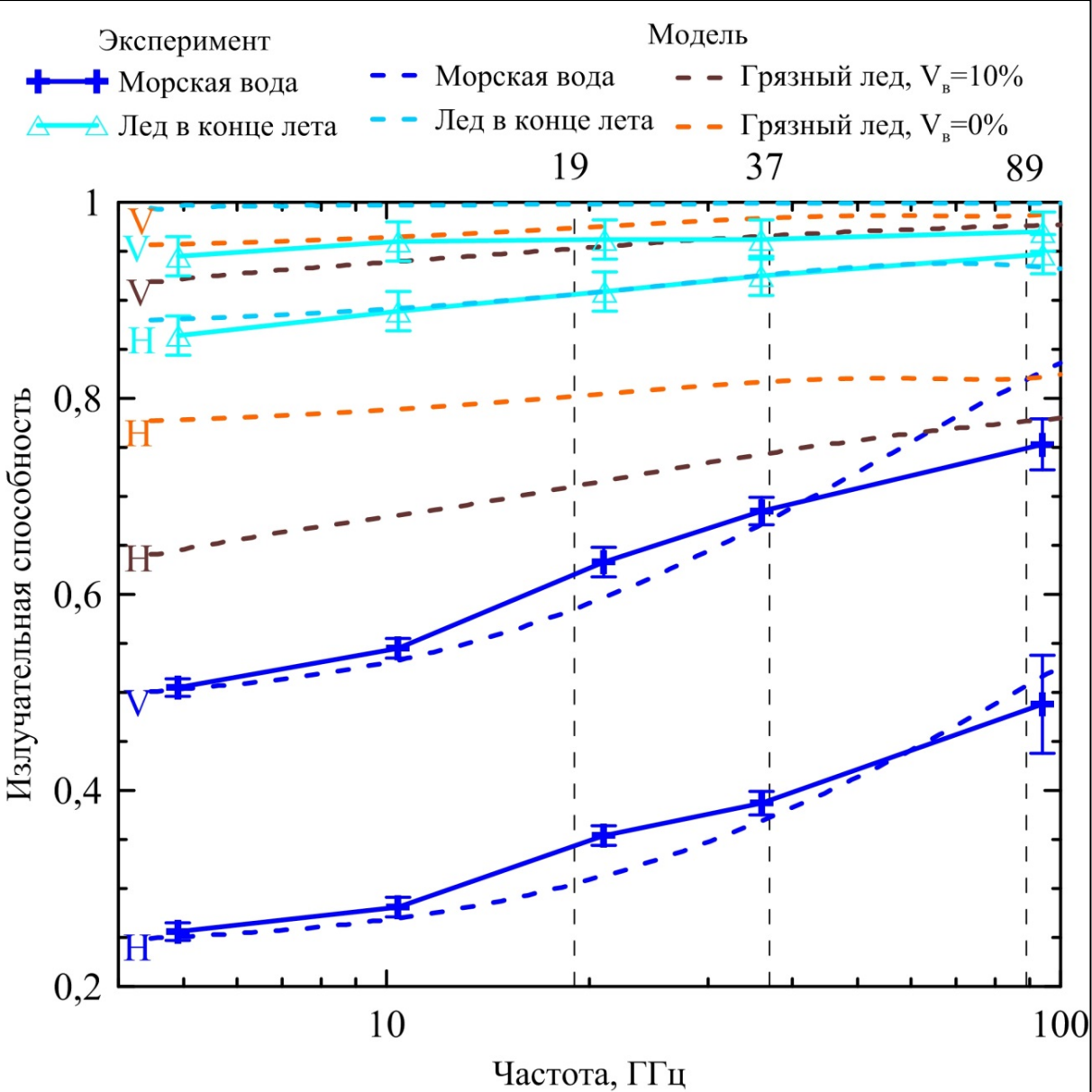
1. Тихонов В.В., Хвостов И.В., Романов А.Н., Шарков Е.А. Модель собственного микроволнового излучения устьевых областей арктических рек с учетом попадания в пиксель радиометра поверхности суши // Исследование Земли из космоса. 2024. № 3. С. 16-29. DOI: 10.31857/S0205961424030026
2. Tikhonov V.V., Boyarskii D.A., Sharkov E.A., Raev M.D., Repina I.A., Ivanov V.V., Alexeeva T.A., Komarova N.Yu. Microwave model of radiation from the multilayer "Ocean-atmosphere" system for remote sensing studies of the Polar Regions // Progr. in Electromagn. Res. B. 2014. Vol. 59. P. 123–133. DOI: 10.2528/PIERB14021706
3. Tikhonov V., Khvostov I., Romanov A., Sharkov E. Theoretical study of ice cover phenology at large freshwater lakes based on SMOS MIRAS data // The Cryosphere. 2018. Vol. 12. No. 8. P. 2727–2740. <https://doi.org/10.5194/tc-12-2727-2018>.

МОДЕЛЬ



МОДЕЛЬ

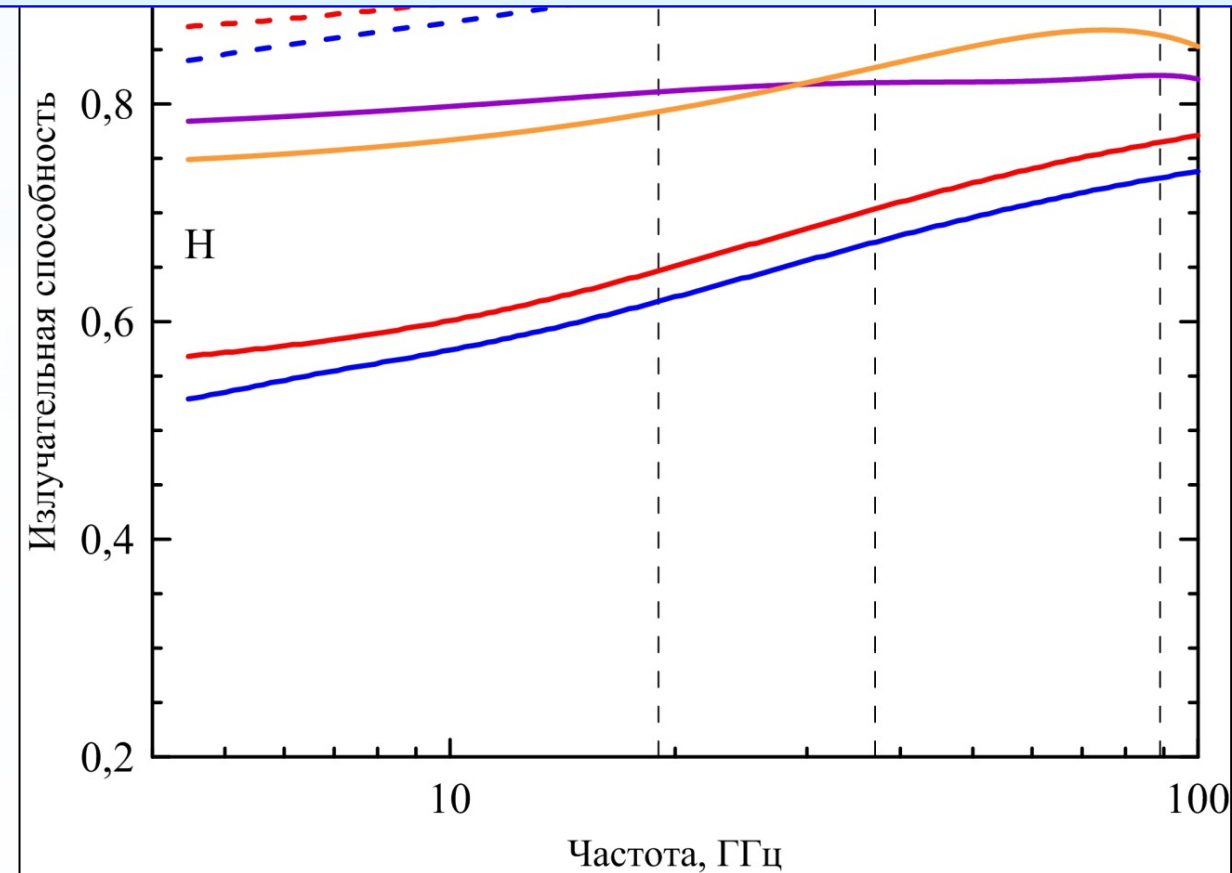
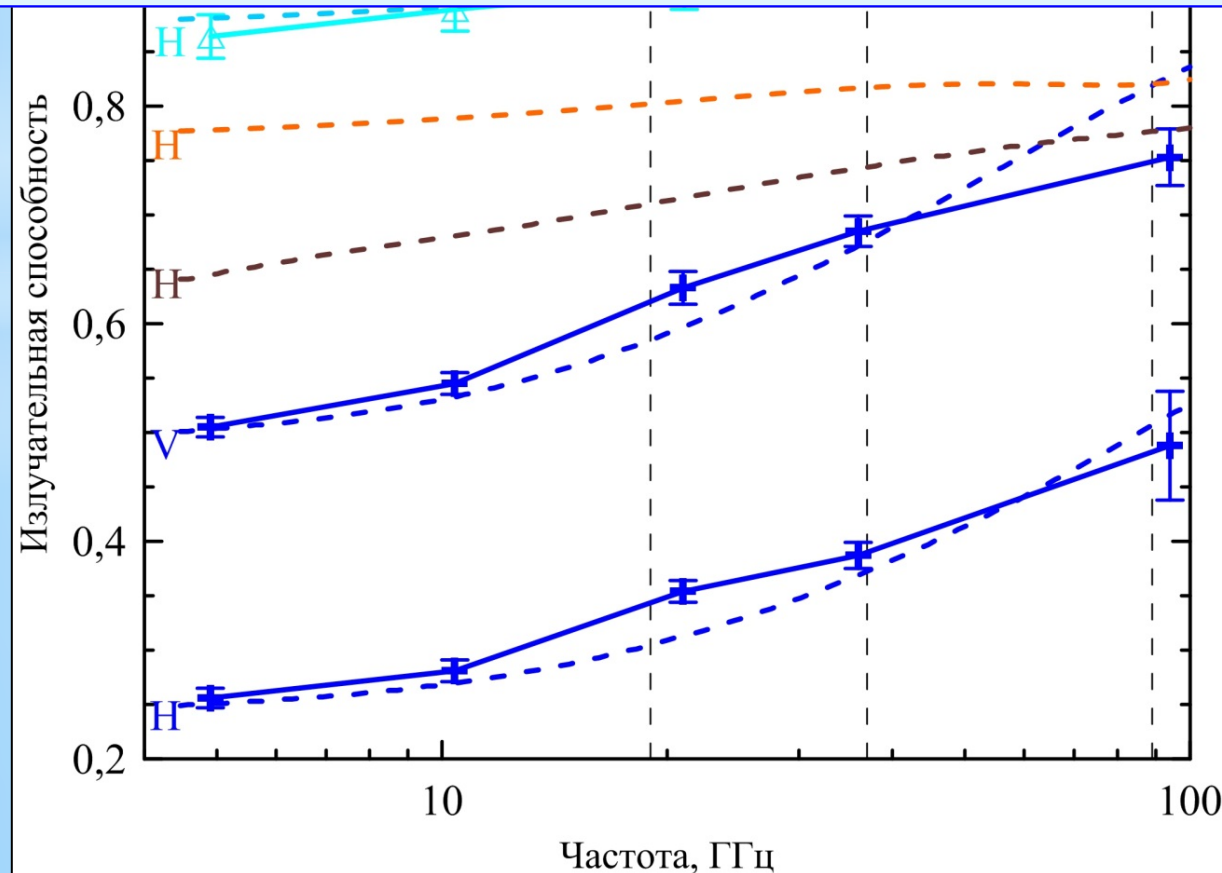
$V_{\text{л}}=40\%, V_{\text{г}}=40\%$



ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ВЫВОДЫ:

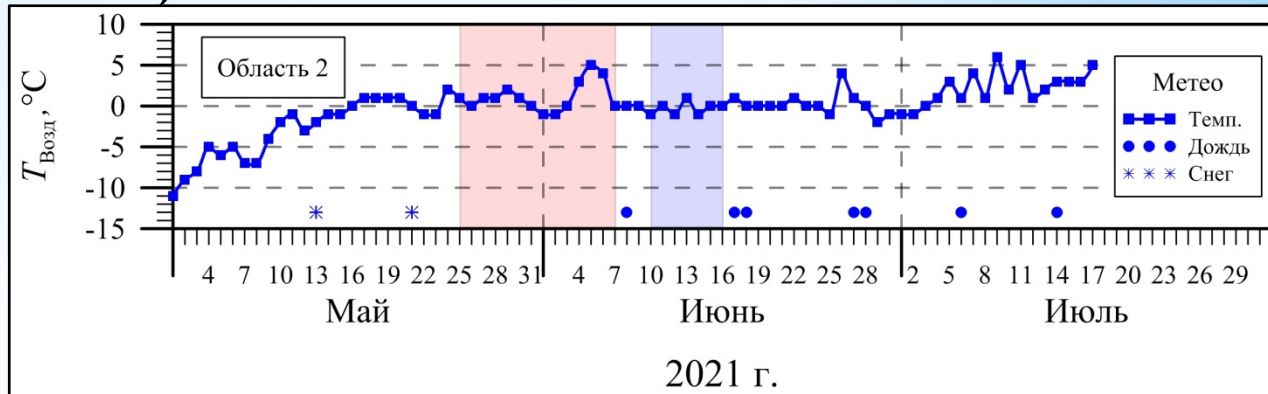
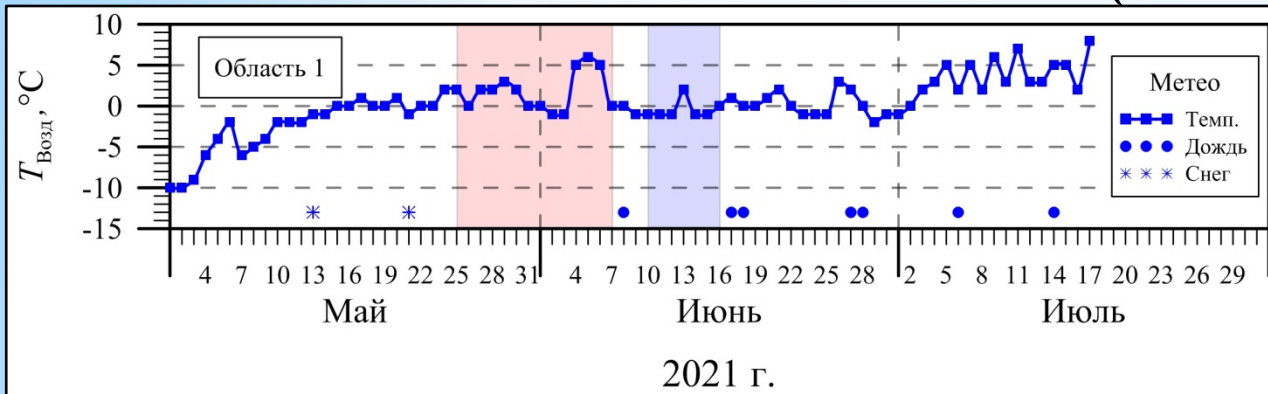
$P_{(90 \text{ ГГц})}$ грязного льда $\gg P_{(90 \text{ ГГц})}$ чистого льда $\sim P_{(90 \text{ ГГц})}$ воды $\rightarrow$ ASI, TUD $\downarrow$ смл

χ^H грязного льда $< \chi^H$ чистого льда $\rightarrow$ NT, OSI SAF hybrid $\downarrow$ смл

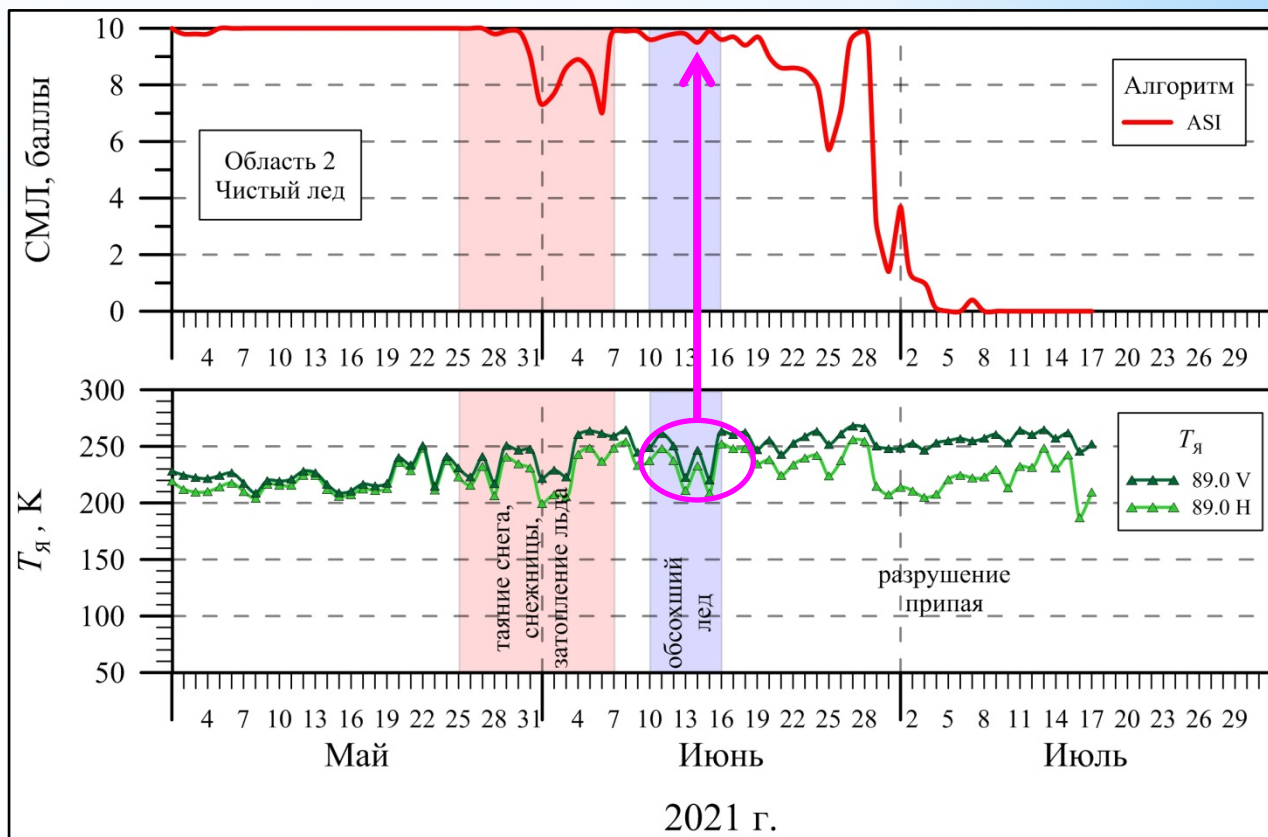
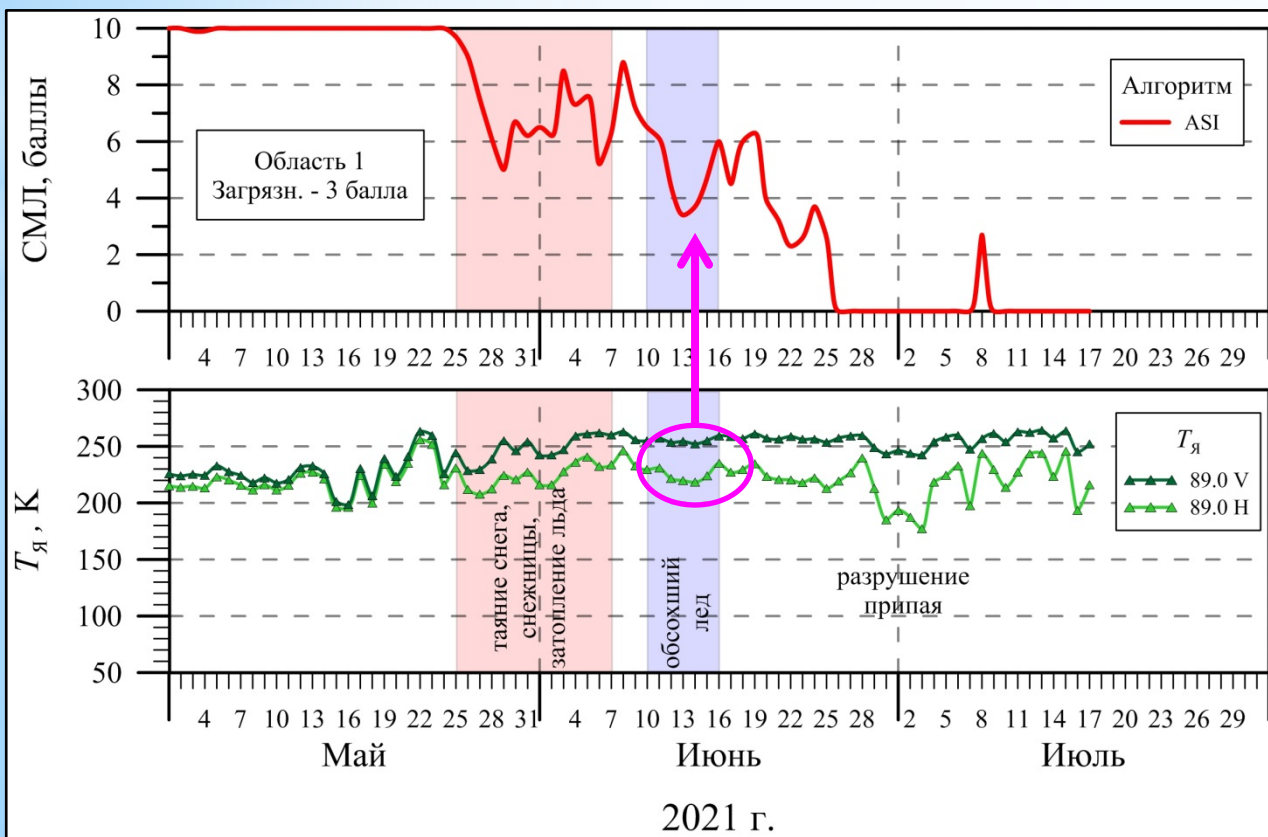


АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ

(область 1 и 2)



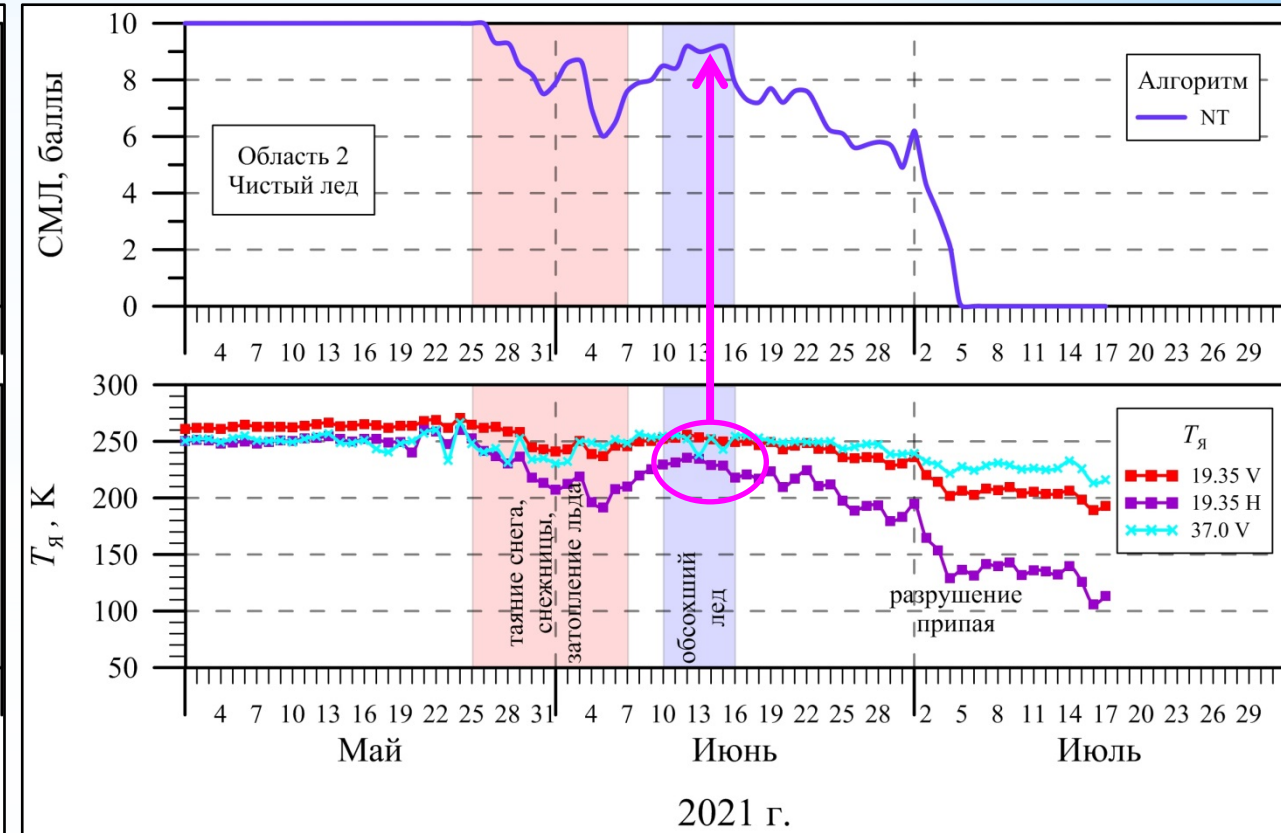
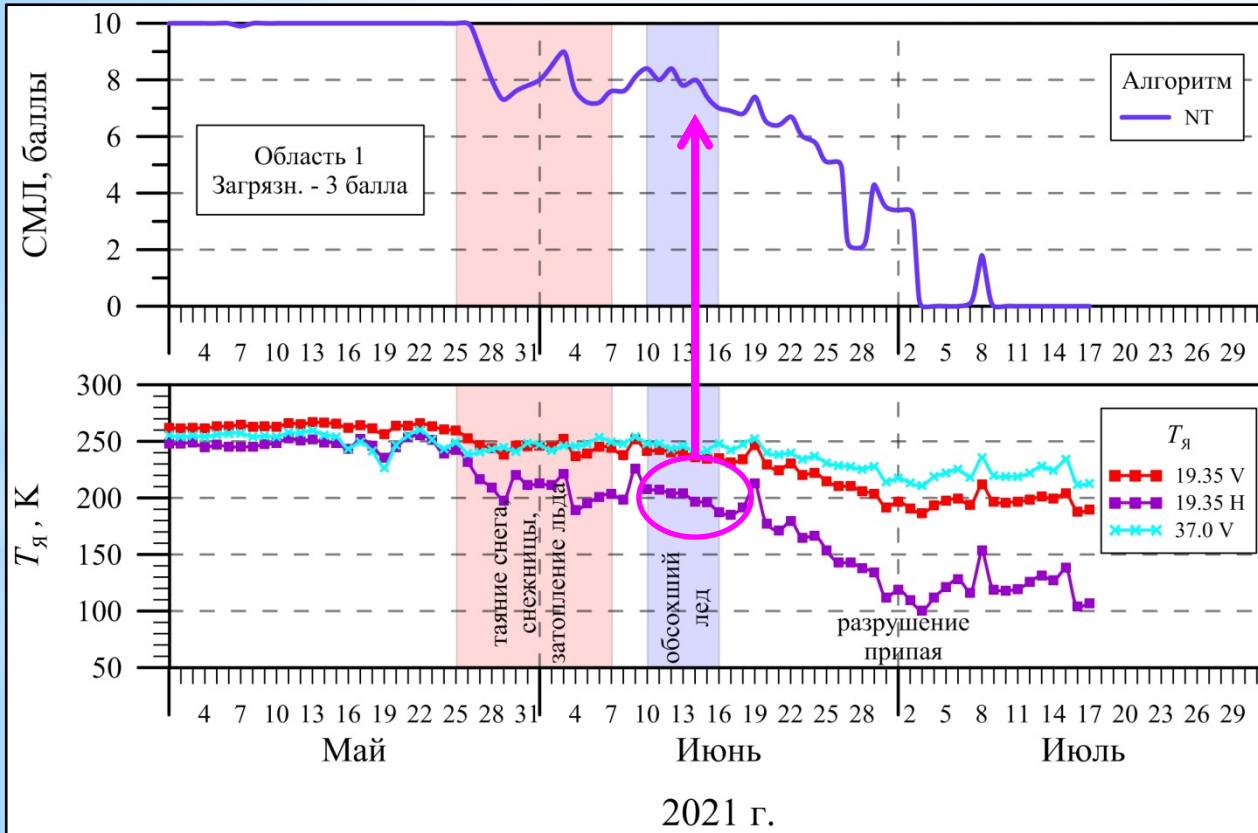
ASI



АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ

(область 1 и 2)

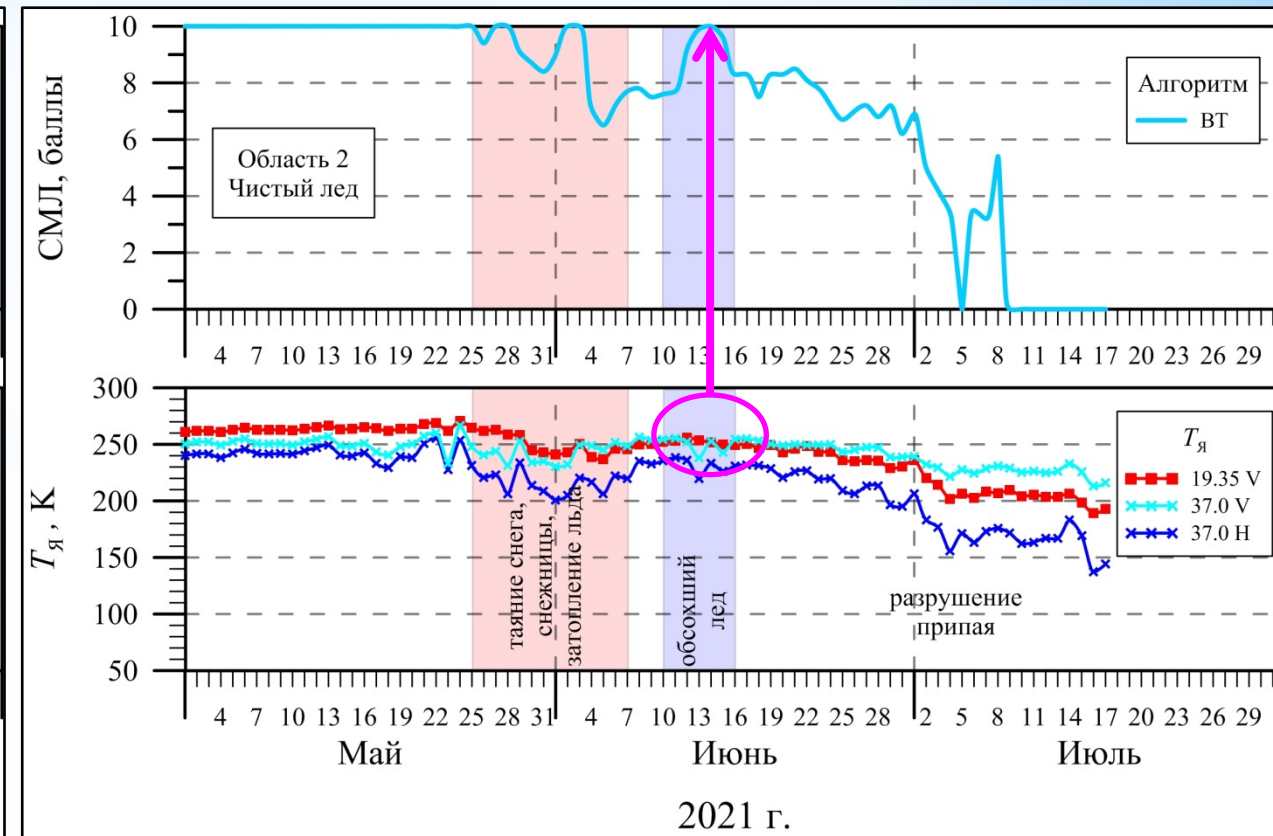
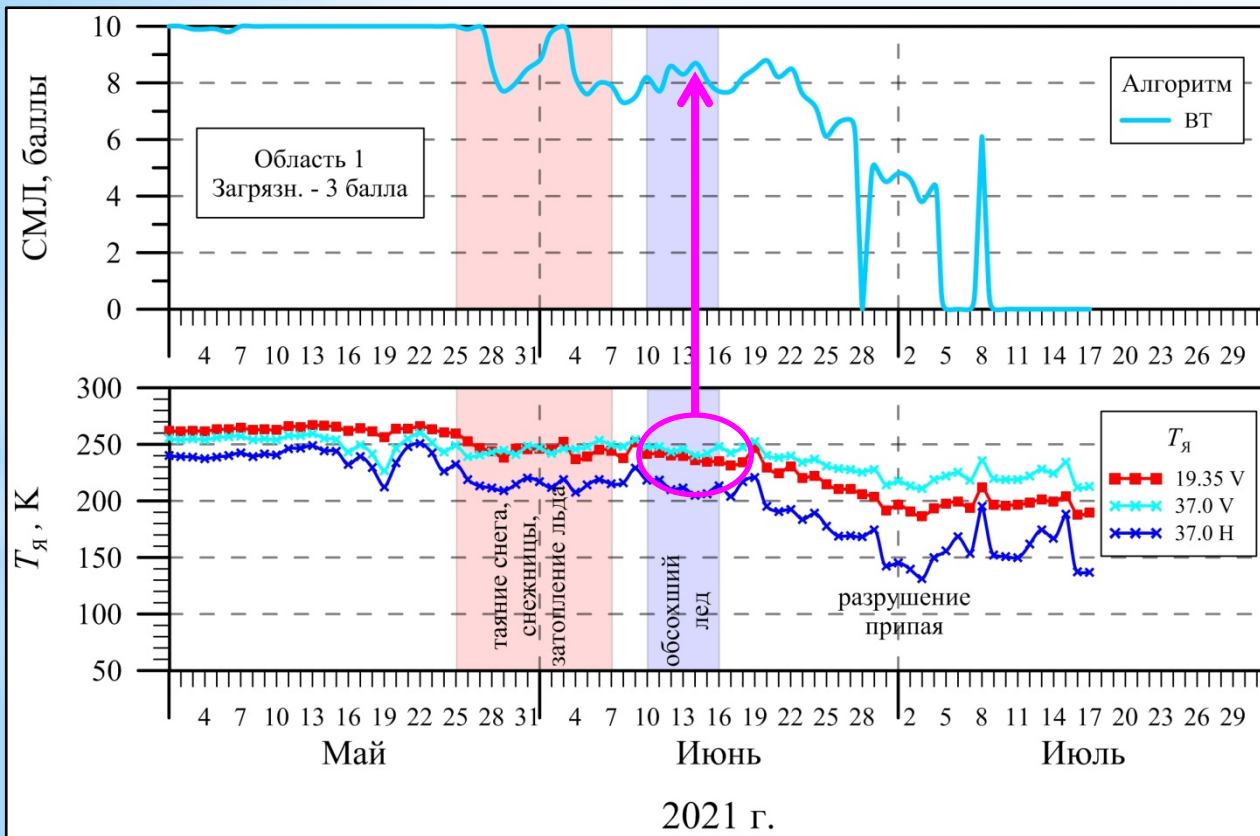
NT



АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ

(область 1 и 2)

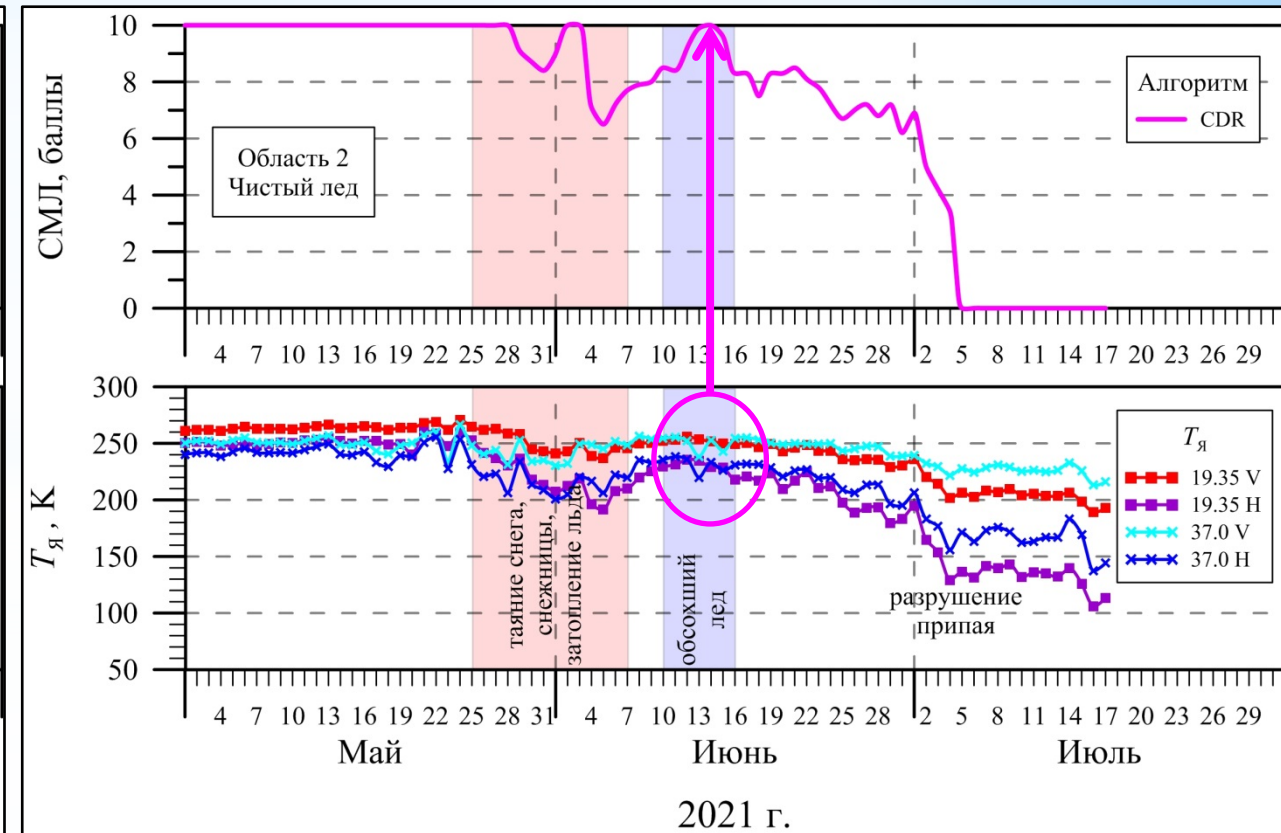
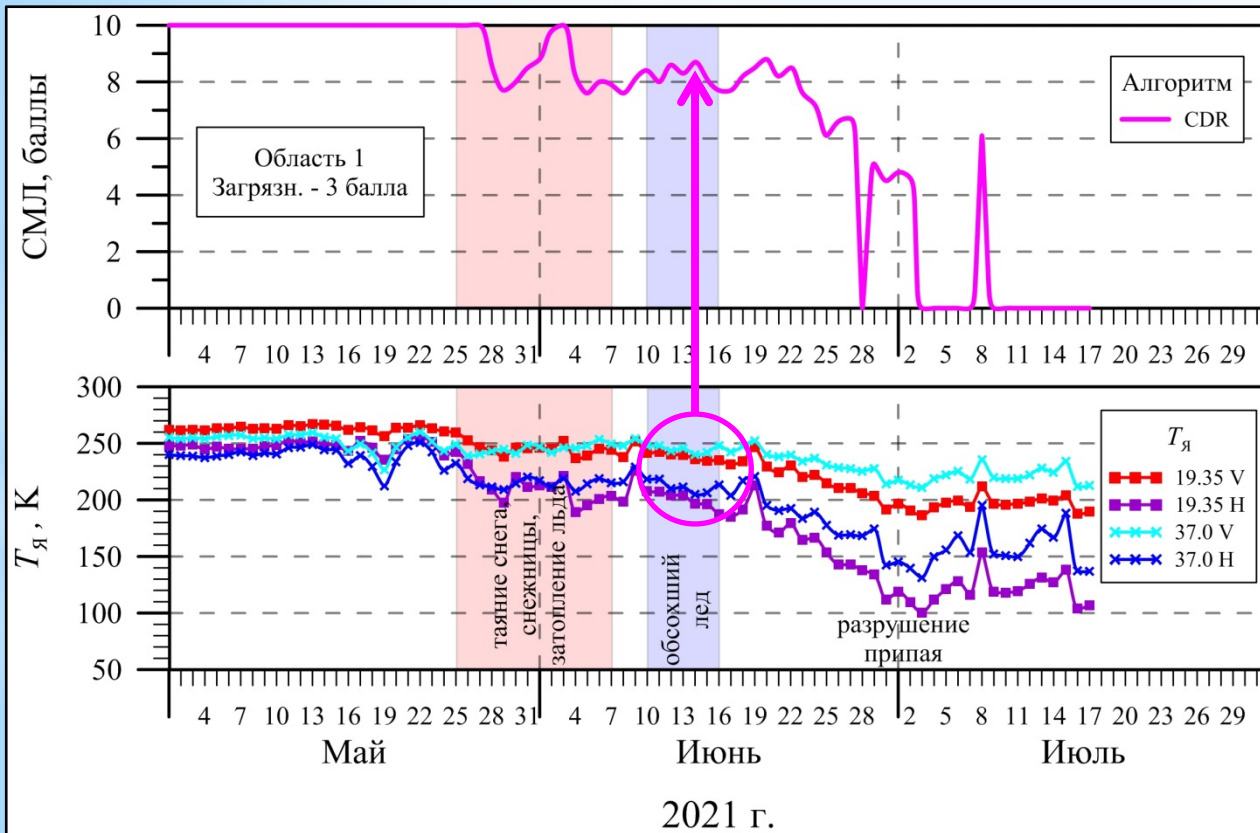
ВТ



АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ

(область 1 и 2)

$$CDR=f(NT, BT)$$

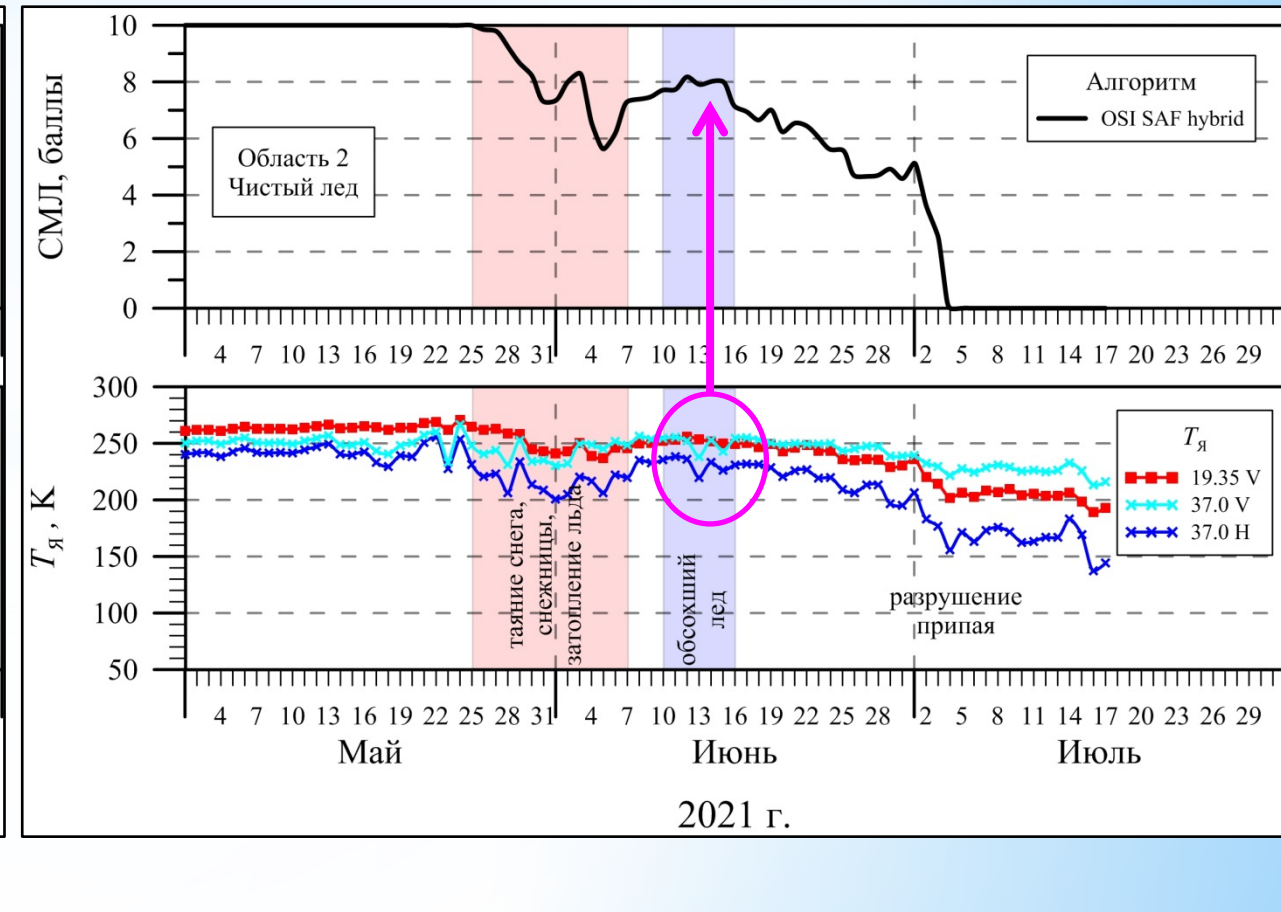
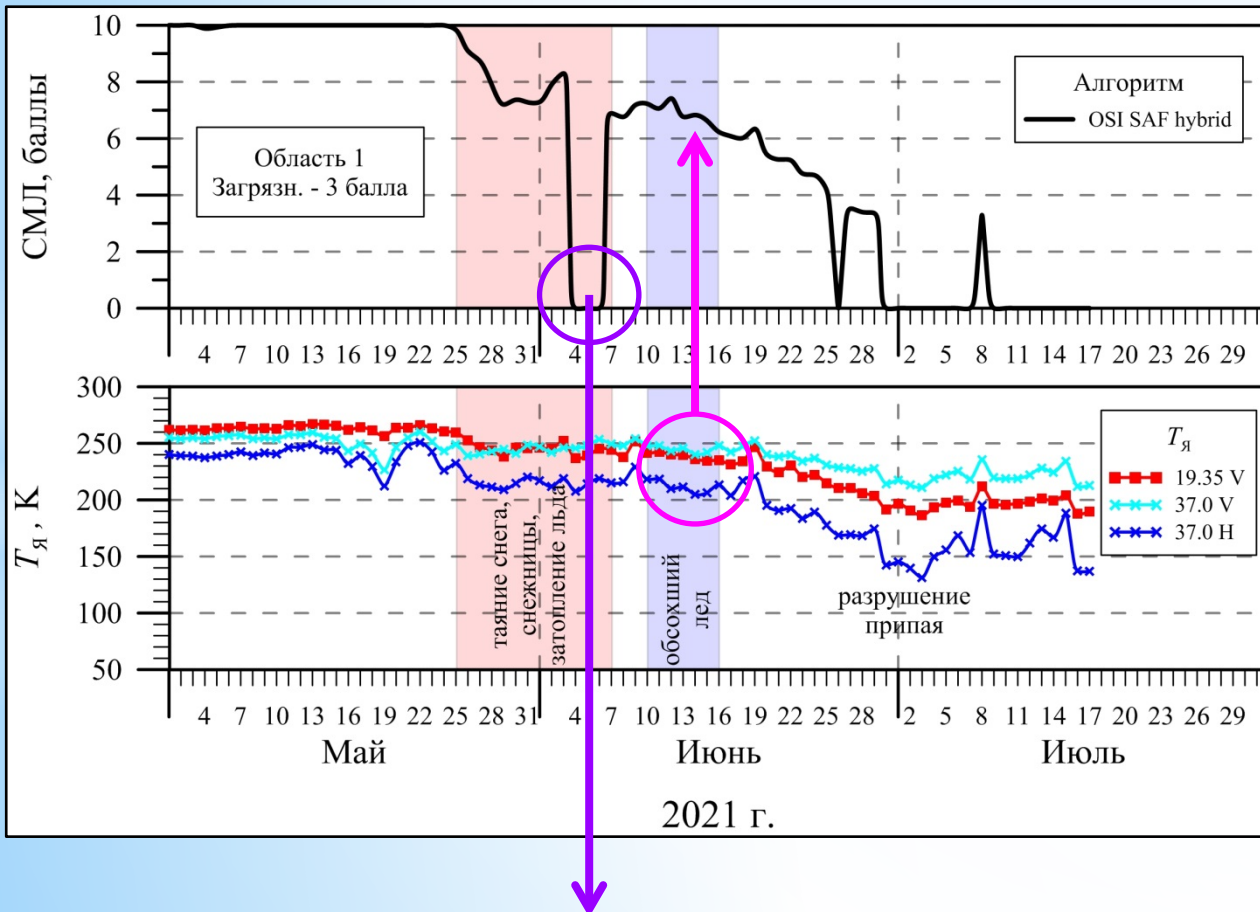


Недостатки NT и BT

АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ

(область 1 и 2)

OSI SAF hybrid=f (BT, Bristol)

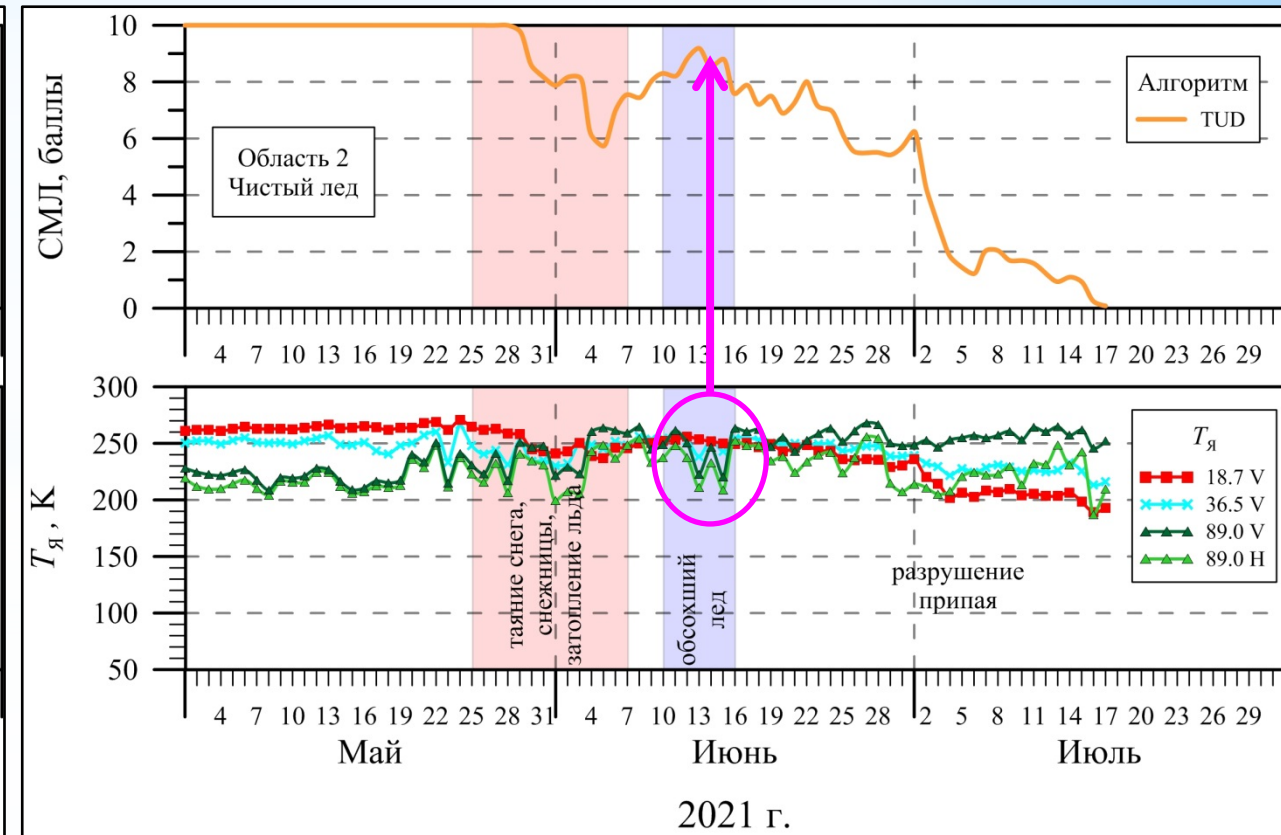
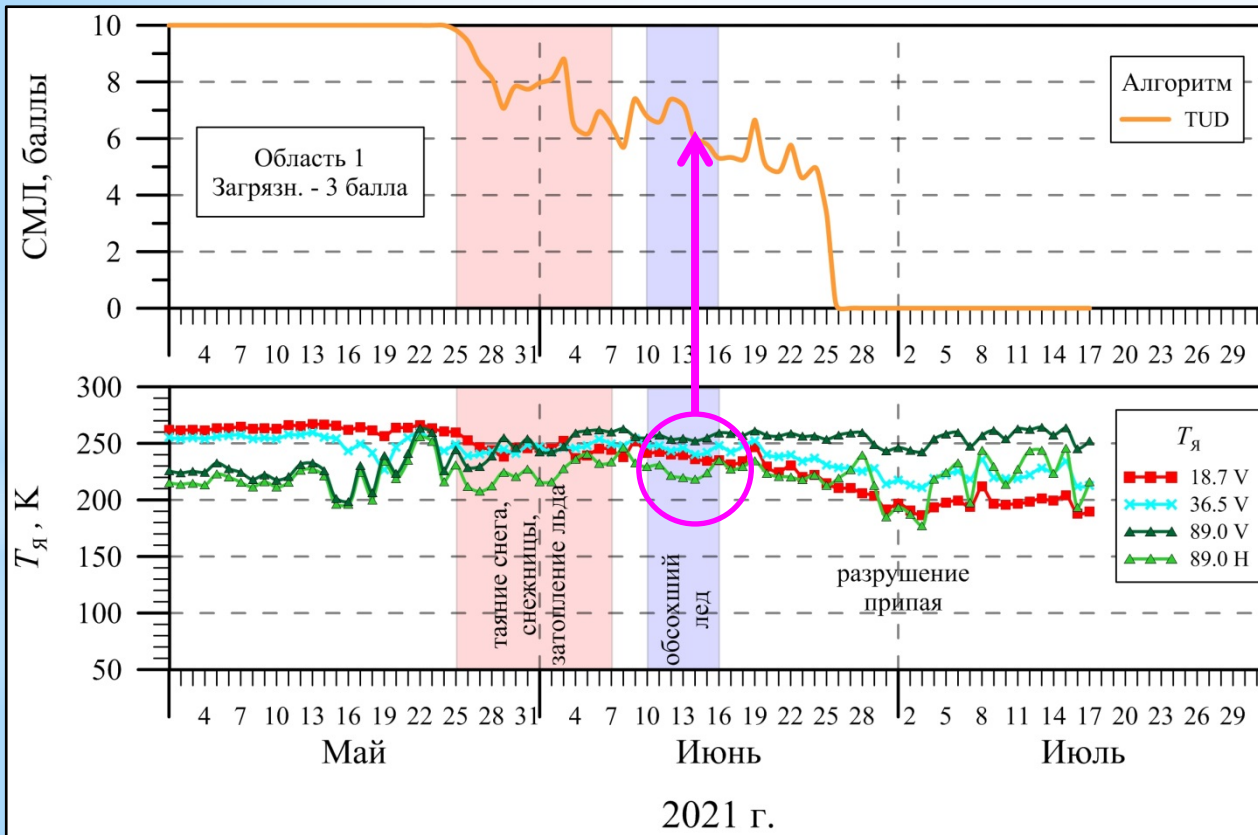


Программный сбой ?

АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ

(область 1 и 2)

$$TUD=f(VT, 85V-85H)$$



Ошибка TUD < Ошибка ASI

АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ

(области 1 – 14)

Алгоритм	Средняя ошибка, баллы
ASI	3,0
NT	0,7
BT	0,6
CDR	0,6
OSI SAF hybrid	0,9
TUD	2,1

Каналы
на
V поляризации

P
ВЫСОКОЧАСТОТНОГО
канала

ВЫВОДЫ

Ошибки при определении сплоченности морского льда по данным СМР:

- экстремальные погодные условия,
- атмосферные помехи,
- шероховатость поверхности океана из-за волнения,
- влажный снежный покров,
- разрушенность льда,
- наличие снежиц на поверхности ледяного покрова,
- битые льды,
-,
- **загрязнение поверхности льда осадочными породами!**

ПУБЛИКАЦИИ

1. Алексеева Т.А., Соколова Ю.В., Тихонов В.В., Смоляницкий В.М., Афанасьева Е.В., Раев М.Д., Шарков Е.А. Анализ областей морского льда в Северном Ледовитом океане, неопределяемых алгоритмом ASI по данным спутниковой микроволновой радиометрии // Исслед. Земли из космоса. 2021. № 6. С. 22–38. DOI: 10.31857/S0205961421060026.
2. Алексеева Т.А., Соколова Ю.В., Афанасьева Е.В., Тихонов В.В., Раев М.Д., Шарков Е.А., Ковалев С.М., Смоляницкий В.М. Влияние загрязненности морского льда на ошибки в определении сплочённости в период таяния по данным спутниковой микроволновой радиометрии // Исслед. Земли из космоса. 2022. № 5. С. 30–46.
<https://doi.org/10.31857/S0205961422050037>.
3. Тихонов В.В., Алексеева Т.А., Соколова Ю.В., Афанасьева Е.В., Боярский Д.А., Раев М.Д., Шарков Е.А. Влияние загрязненности морского льда на определение его сплоченности по данным спутниковой микроволновой радиометрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 5. С. 274–292.
DOI:10.21046/2070-7401-2025-22-5-274-292
4. Alekseeva T.A., Sokolova J.V., Tikhonov V.V., Smolyanitskiy V.M., Afanasieva E.V., Raev M.D., Sharkov E.A. Analysis of Sea Ice Areas Undetectable by Satellite Microwave Radiometry (ASI Algorithm) in the Arctic Ocean // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2021. Vol. 57. No. 12. P. 1690-1704. DOI: 10.1134/S0001433821120033.
5. Alekseeva T.A., Sokolova J.V., Afanasyeva E.V., Tikhonov V.V., Raev M.D., Sharkov E.A., Kovalev S.M., Smolyanitskiy V.M. The Contribution of Sea-Ice Contamination to Inaccuracies in Sea-Ice Concentration Retrieval from Satellite Microwave Radiometry Data during the Ice-Melt Period // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2022. Vol. 58. No. 12. P. 1470–1484. DOI: 10.1134/S0001433822120039.
6. Alekseeva Tatiana, Borodkin Vladimir, Pavlova Evgeniya, Afanasyeva Ekaterina, Sokolova Julia, Alekseev Vladislav, Korobov Pyotr, Tikhonov Vasiliy and Ershova Anastasia. Interannual variability of sea ice dirtiness in the East Siberian Sea based on satellite data // Geomatics. 2025. In press.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-17-00161

«Анализ ледовых условий плавания и элементов динамики ледяного покрова в районе Северного морского пути как основа качественных долгосрочных прогнозов»

(<https://rscf.ru/project/23-17-00161/>)

Спасибо!