ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ СПУТНИКА SMOS ДЛЯ АНАЛИЗА ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА АРКТИЧЕСКИХ АКВАТОРИЙ В ПЕРИОД ЛЕДОСТАВА

Тихонов В.В.

Институт космических исследований РАН, г. Москва
Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул
Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург

vtikhonov@asp.iki.rssi.ru , vasvlatikh@yandex.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЗОННОЙ ДИНАМИКИ ЯРКОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗАМЕРЗАЮЩИХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ С УЧЕТОМ ПОПАДАНИЯ В ПИКСЕЛЬ РАДИОМЕТРА УЧАСТКОВ СУШИ

НА ПРИМЕРЕ ЕНИСЕЙСКОГО ЗАЛИВА И ДАННЫХ СПУТНИКА SMOS

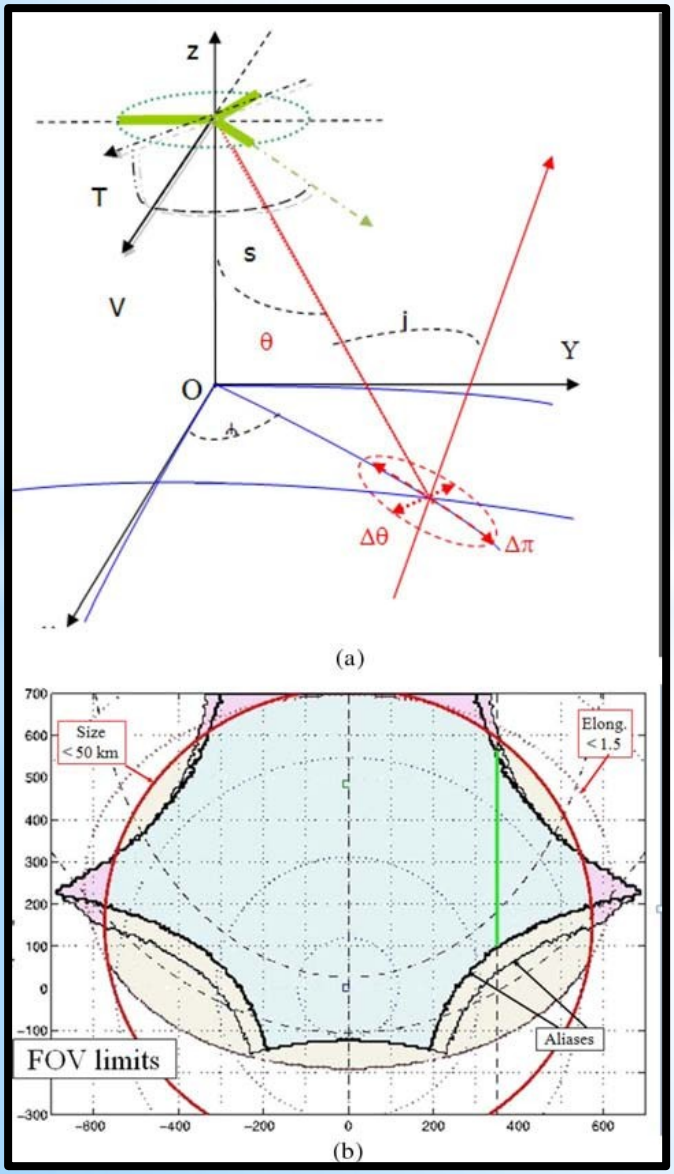
Тихонов В.В.[1,2,3], Хвостов И.В.[2], Романов А.Н.[2], Шарков Е.А.[1]

[1]Институт космических исследований РАН, г. Москва
[2]Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул
Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург

vtikhonov@asp.iki.rssi.ru , vasvlatikh@yandex.ru

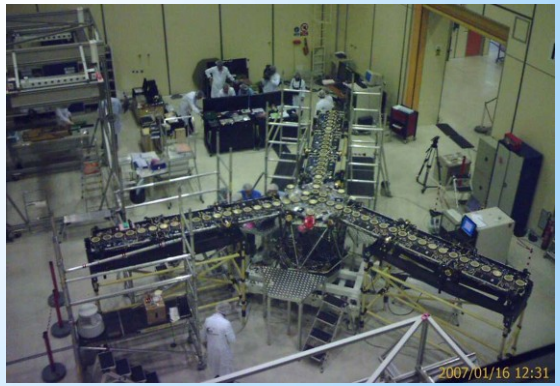
ДАННЫЕ

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



f = 1.4 (H, V) ГГц

θ = 10…60°



ДАННЫЕ

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

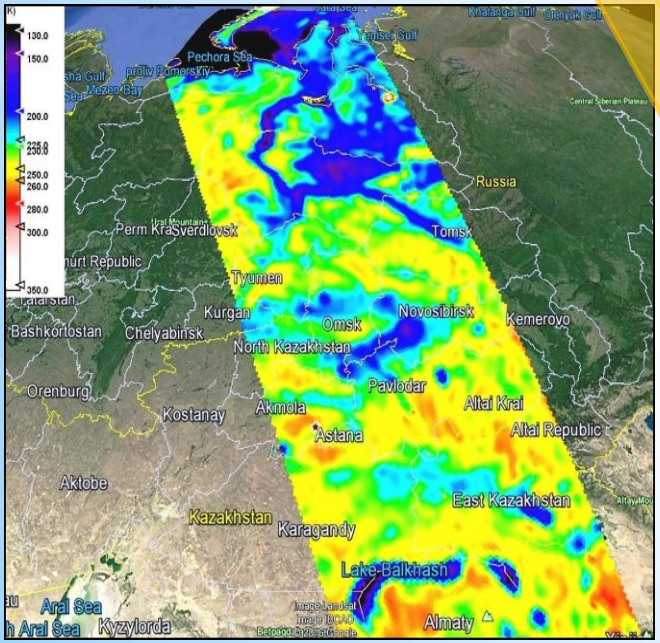
Продукт SMOS L1C

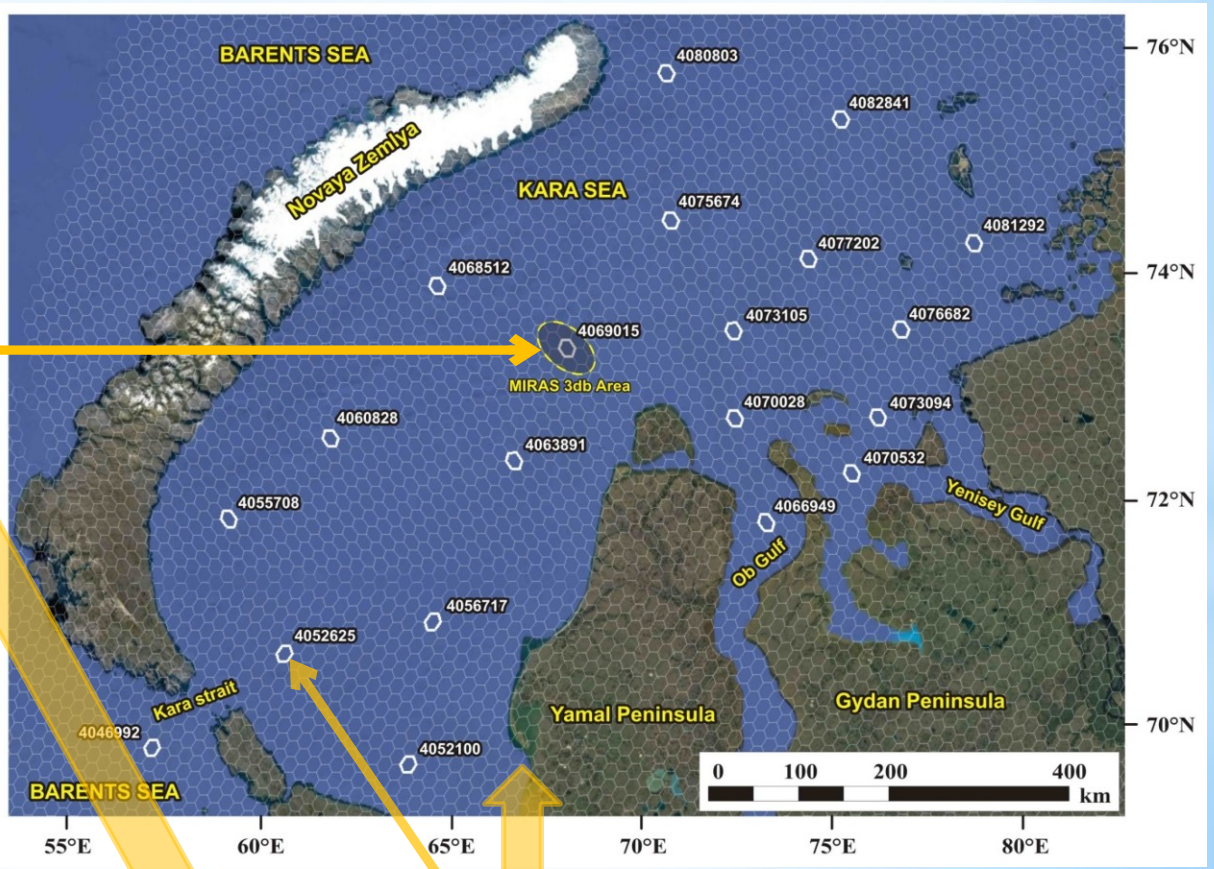
f = 1.4 (H, V) ГГц

$\theta = 42.5°$

Пиксель 35x65 км

$S_П$ = 1780 км² (3 дБ) ~ 9 яч.

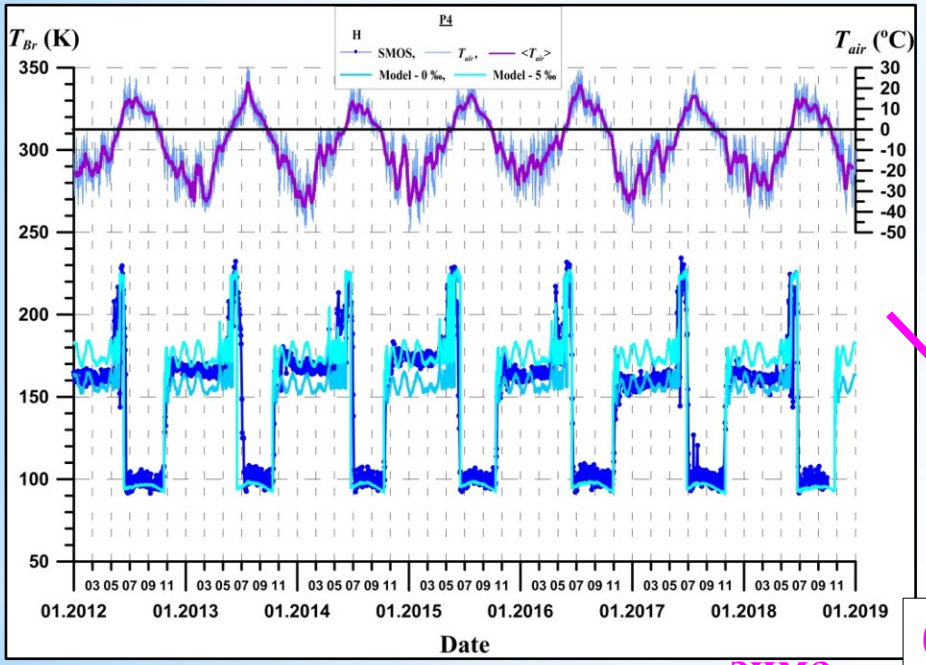




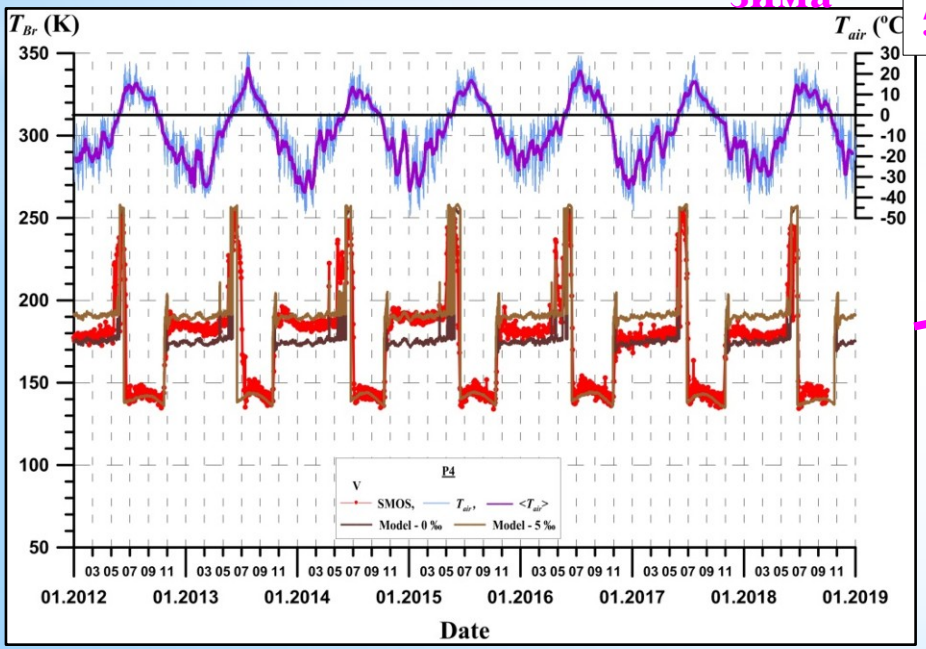
Дискретная геодезическая сетка DGG ISEA 4H9

$l_Я$ = 16 км, $S_Я$ = 195 км²

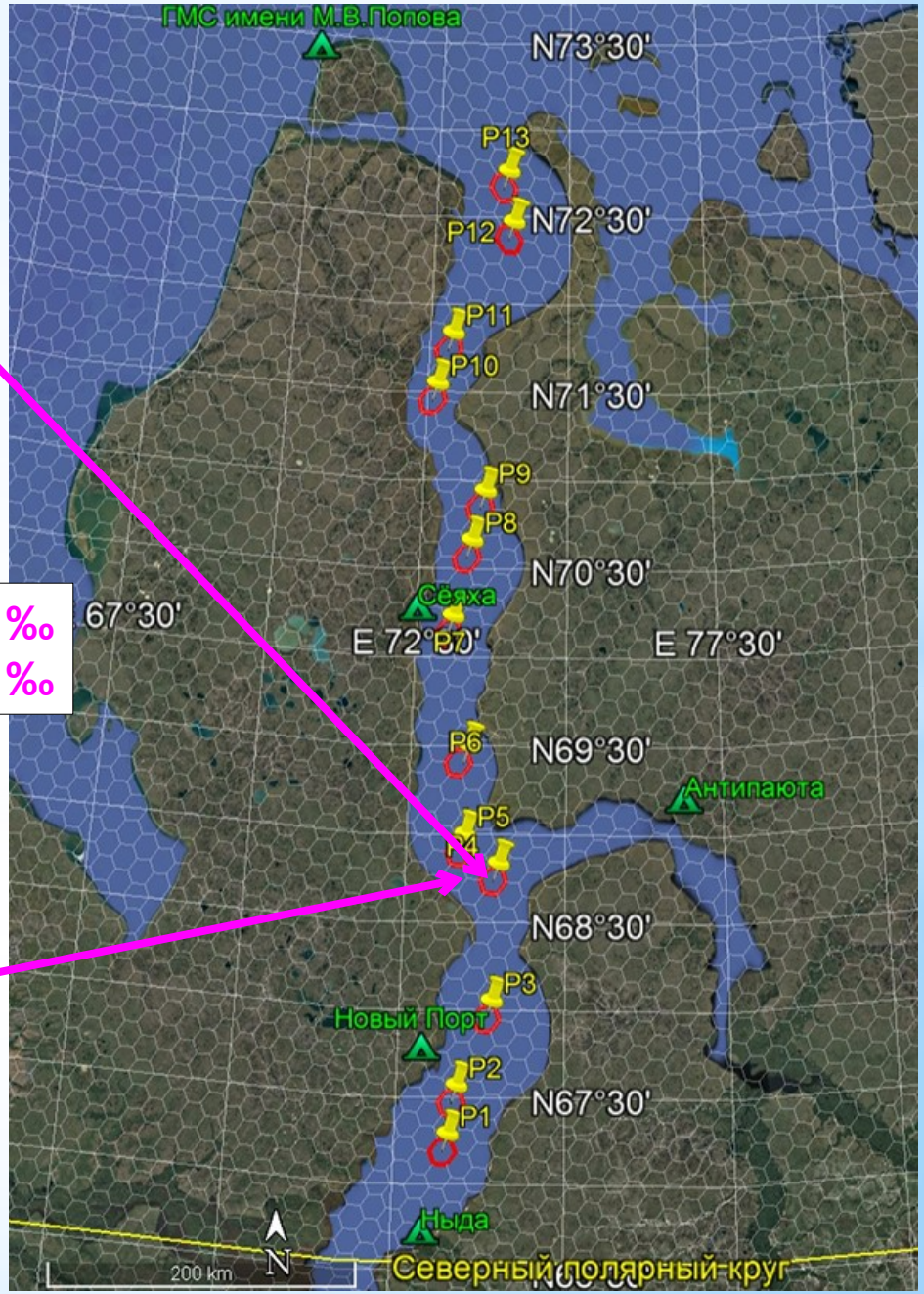
ОБСКАЯ ГУБА



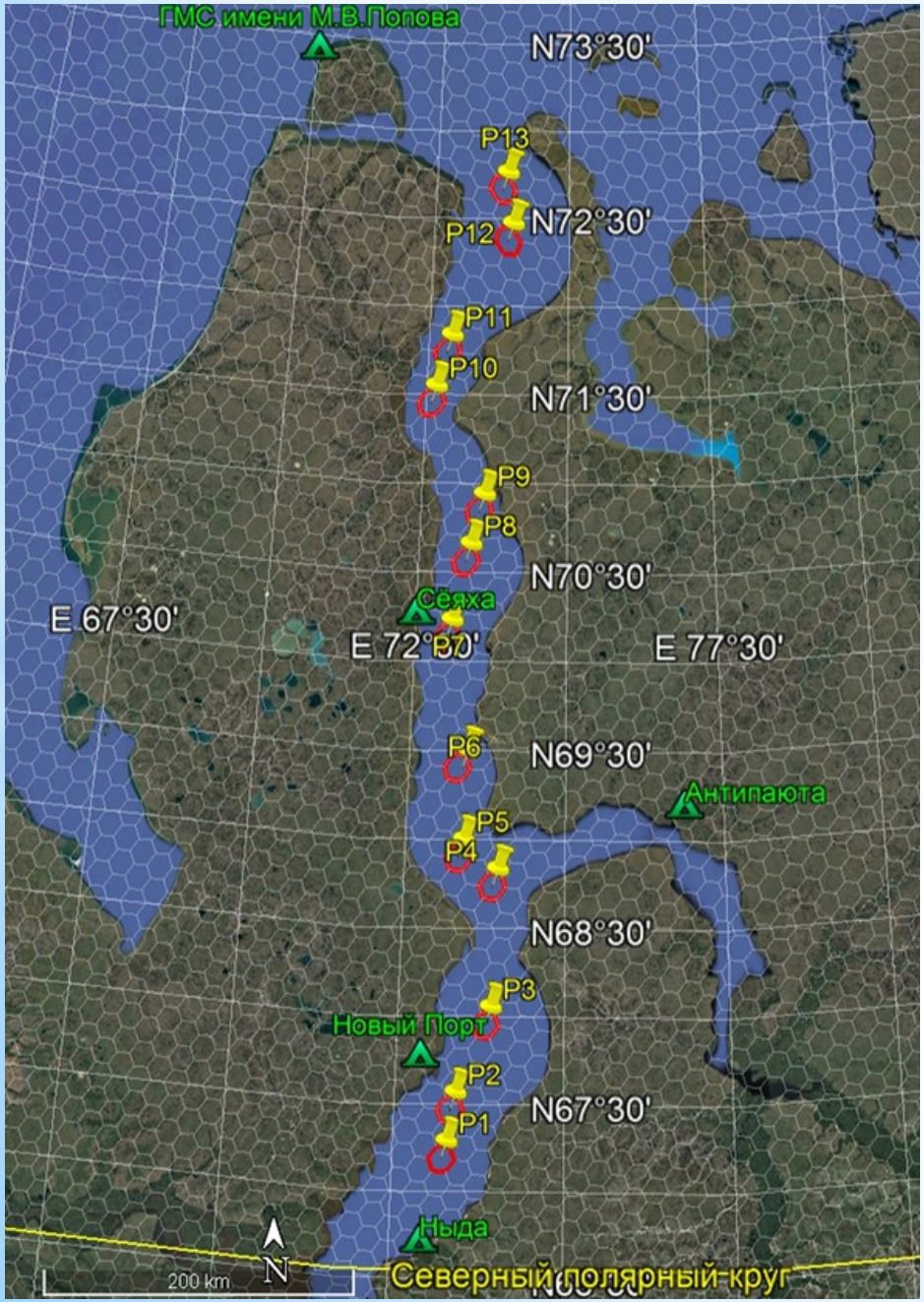
зима



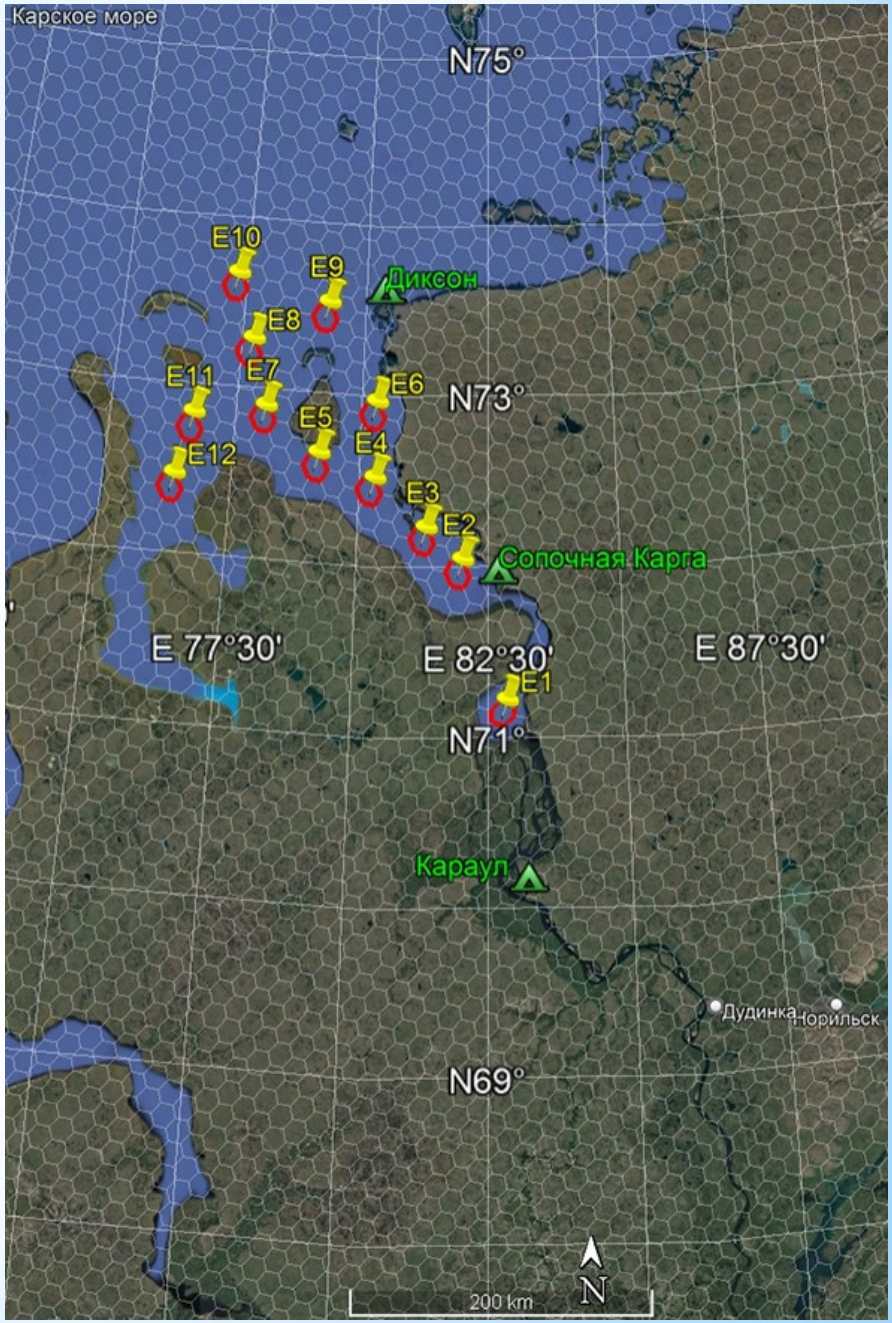
0 ‰
5 ‰



ОБСКАЯ ГУБА

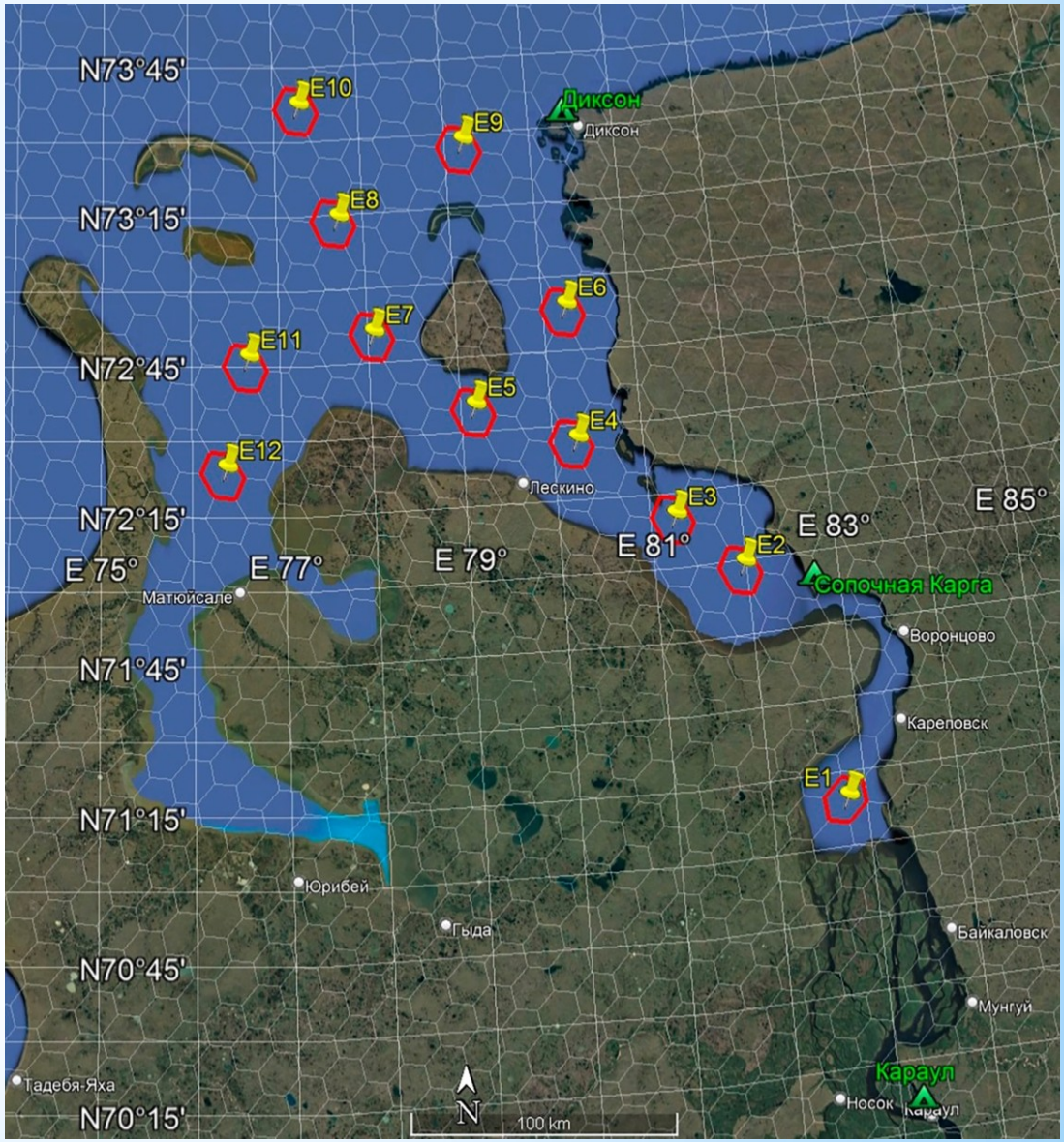


ЕНИСЕЙСКИЙ ЗАЛИВ



ЕНИСЕЙСКИЙ ЗАЛИВ

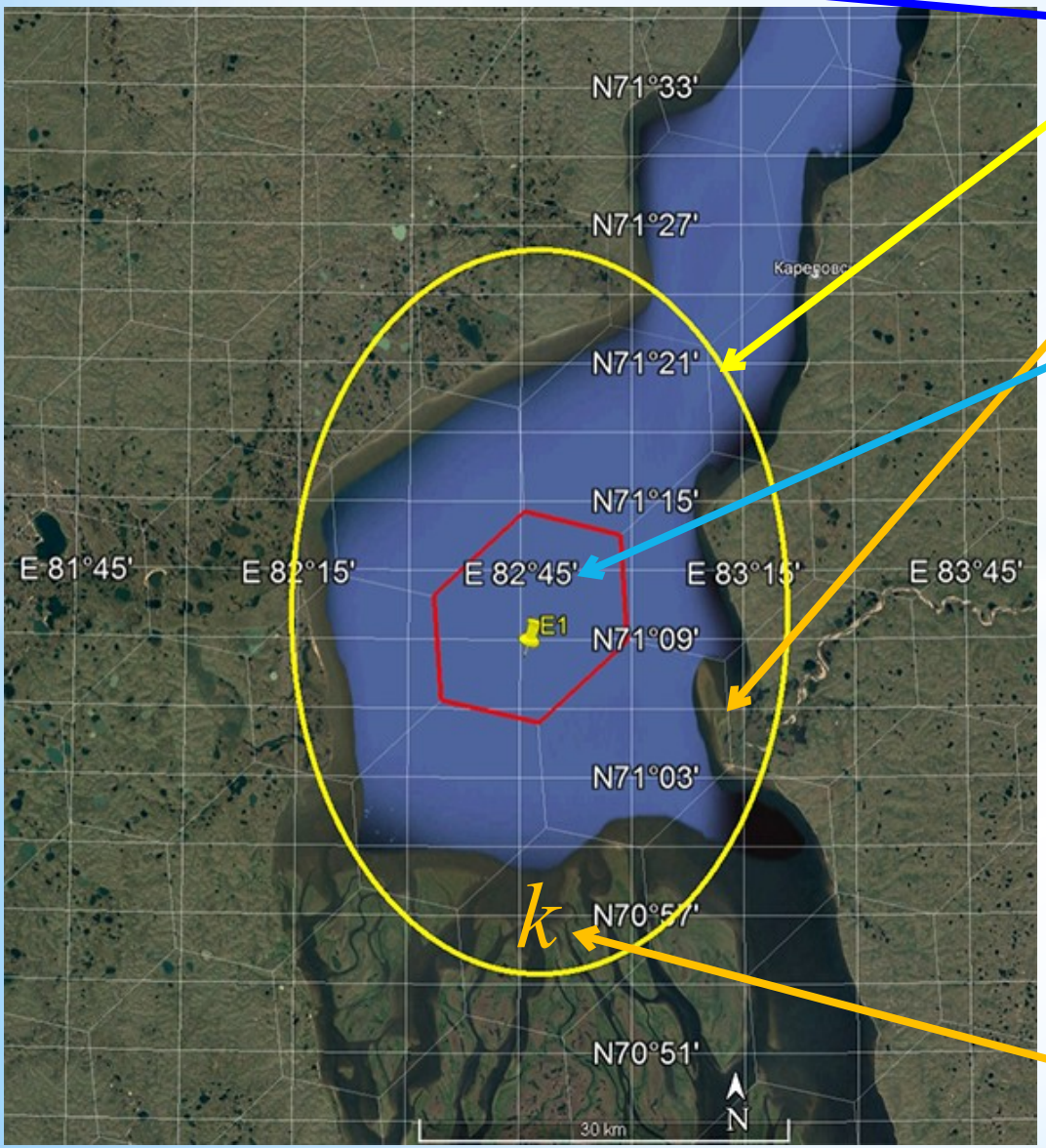
Ячейка	Доля площади суши в конусе ДНА по уровню 3db	
	min	max
E01	0,38	0,46
E02	0,00	0,12
E03	0,07	0,38
E04	0,00	0,21
E05	0,07	0,40
E06	0,02	0,25
E07	0,00	0,08
E08	0,00	0,00
E09	0,00	0,01
E10	0,00	0,01
E11	0,00	0,00
E12	0,00	0,23



МОДЕЛЬ

$$T_{\text{MIRAS}}^{h,v} = T_{Surf}^{h,v}\exp\left(-\xi_\theta\right) + T_a + R_{Surf}^{h,v} T_a \exp\left(-\xi_\theta\right) + R_{Surf}^{h,v} T_{\cos}\exp\left(-2\xi_\theta\right),$$

$$T_{Br}^{h,v} = k T_{\text{MIRAS Coast}}^{h,v} + (1-k) T_{\text{MIRAS Cell}}^{h,v}$$



Ячейка	Доля площади суши в конусе ДНА по уровню 3db	
	min	max
E01	0,38	0,46
E02	0,00	0,12
E03	0,07	0,38
E04	0,00	0,21
E05	0,07	0,40
E06	0,02	0,25
E07	0,00	0,08
E08	0,00	0,00
E09	0,00	0,01
E10	0,00	0,01
E11	0,00	0,00
E12	0,00	0,23

Относительная удельная площадь, занятая прибрежной территорией

МОДЕЛЬ ЯРКОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ АКВАТОРИИ

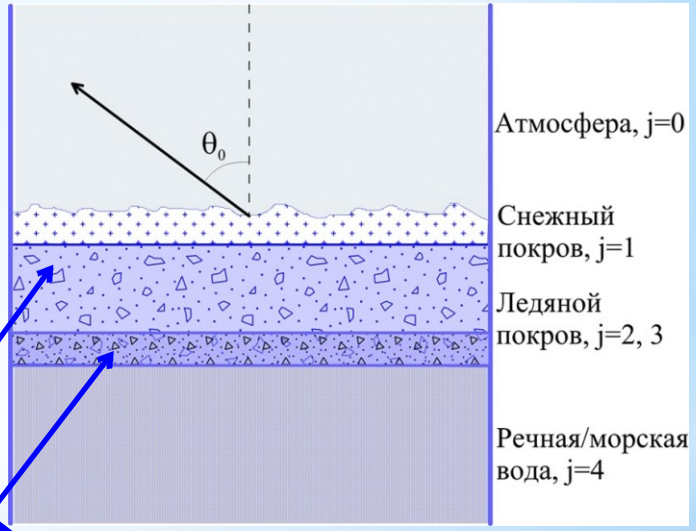
$$T^{h,v}_{\mathrm{MIRAS}} = T^{h,v}_{Surf}\exp\left(-\xi_\theta\right) + T_a + R^{h,v}_{Surf}T_a\exp\left(-\xi_\theta\right) + R^{h,v}_{Surf}T_{\cos}\exp\left(-2\xi_\theta\right),$$

$$T^{v}_{Surf\,Cell} = \sum_{j=1}^{3}\frac{T_j\left|W_j\right|^2}{\left|1-r_j^- r_j^+\exp\left(2i\psi_j\right)\right|^2}\times\left[\left(1-\exp\left(-2\,\mathrm{Im}\,\psi_j\right)\right)\left(1+\left|r_j^-\exp\left(i\psi_j\right)\right|^2\right)+\right.$$

$$\left.+\,4\frac{\mathrm{Im}\,\psi_j}{\mathrm{Re}\,\psi_j}\mathrm{Re}\left(r_j^-\exp\left(i\psi_j\right)\right)\mathrm{Im}\left(\exp\left(i\psi_j\right)\right)\times\left(\frac{\left|k_{z_j}\right|^2-k_x^2}{\left|k_j\right|^2}\right)\right]\frac{\mathrm{Re}\,Z_j}{\mathrm{Re}\,Z_0}+T_4\left|W_4\right|^2\frac{\mathrm{Re}\,Z_4}{\mathrm{Re}\,Z_0}$$

$$T^{h}_{Surf\,Cell} = \sum_{j=1}^{3}\frac{T_j\left|W_j\right|^2}{\left|1-r_j^- r_j^+\exp\left(2i\psi_j\right)\right|^2}\times\left[\left(1-\exp\left(-2\,\mathrm{Im}\,\psi_j\right)\right)\left(1+\left|r_j^-\exp\left(i\psi_j\right)\right|^2\right)+\right.$$

$$\left.+\,4\frac{\mathrm{Im}\,\psi_j}{\mathrm{Re}\,\psi_j}\mathrm{Re}\left(r_j^-\exp\left(i\psi_j\right)\right)\mathrm{Im}\left(\exp\left(i\psi_j\right)\right)\right]\frac{\mathrm{Re}\,Z_j}{\mathrm{Re}\,Z_0}+T_4\left|W_4\right|^2\frac{\mathrm{Re}\,Z_4}{\mathrm{Re}\,Z_0}$$

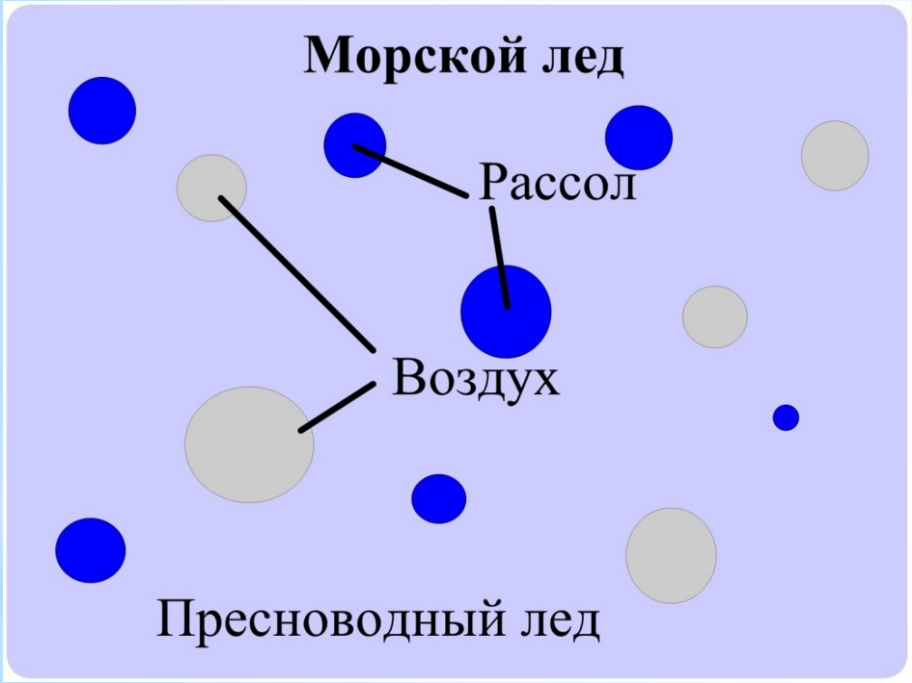


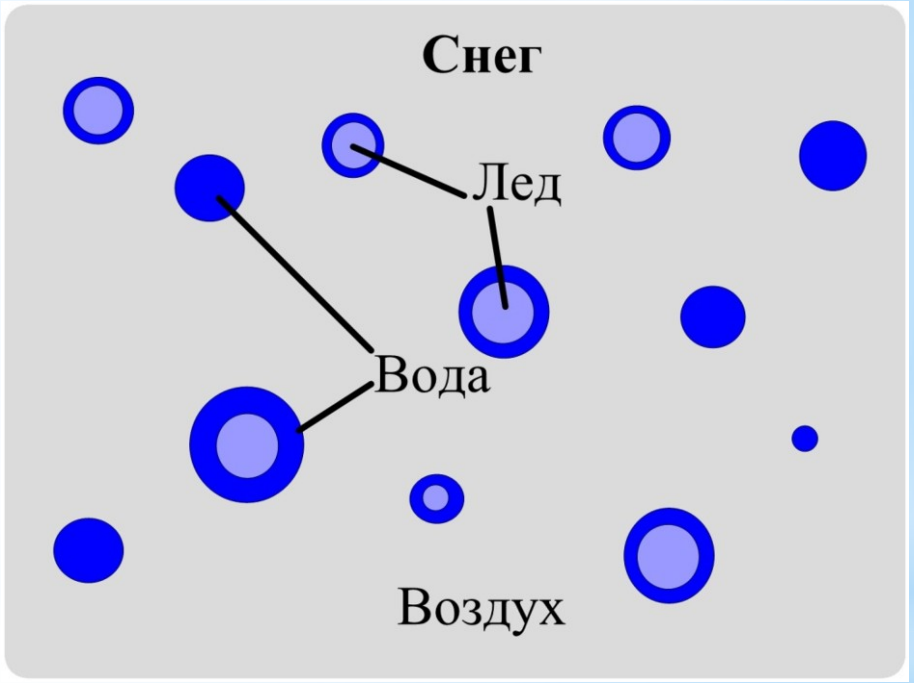
$$W_j = \prod_{m=1}^{j}\frac{Z^{in+}_{m-1}+Z_{m-1}}{Z^{in+}_{m-1}+Z_m}\exp\left(i\psi_{m-1}\right),\quad Z^{in+}_j = Z_j\frac{Z^{in+}_{j-1}-iZ_j\,\mathrm{tg}\,\psi_j}{Z_j-iZ^{in+}_{j-1}\,\mathrm{tg}\,\psi_j},\quad Z^{in-}_j = Z_j\frac{Z^{in-}_{j+1}-iZ_j\,\mathrm{tg}\,\psi_j}{Z_j-iZ^{in-}_{j+1}\,\mathrm{tg}\,\psi_j}$$

$$\psi_j = k_{z_j}h_j,\quad k_{z_j} = k_j\cos\theta_j,\quad k_x = k_0\sin\theta_0,\quad k_j = \frac{2\pi\sqrt{\varepsilon_j}}{\lambda},\quad \cos\theta_j = \sqrt{\frac{\varepsilon_j-\varepsilon_0\sin^2\theta_0}{\varepsilon_j}}$$

$$r_j^+ = \frac{Z^{in+}_{j-1}-Z_j}{Z^{in+}_{j-1}+Z_j},\quad r_j^- = \frac{Z^{in-}_{j+1}-Z_j}{Z^{in-}_{j+1}+Z_j},\quad Z_j = \begin{cases}\dfrac{1}{\sqrt{\varepsilon_j}\cos\theta_j} & \text{– горизонтальная поляризация}\\[2ex] \dfrac{\cos\theta_j}{\sqrt{\varepsilon_j}} & \text{– вертикальная поляризация}\end{cases}$$

МОДЕЛЬ
ЭФФЕКТИВНАЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ





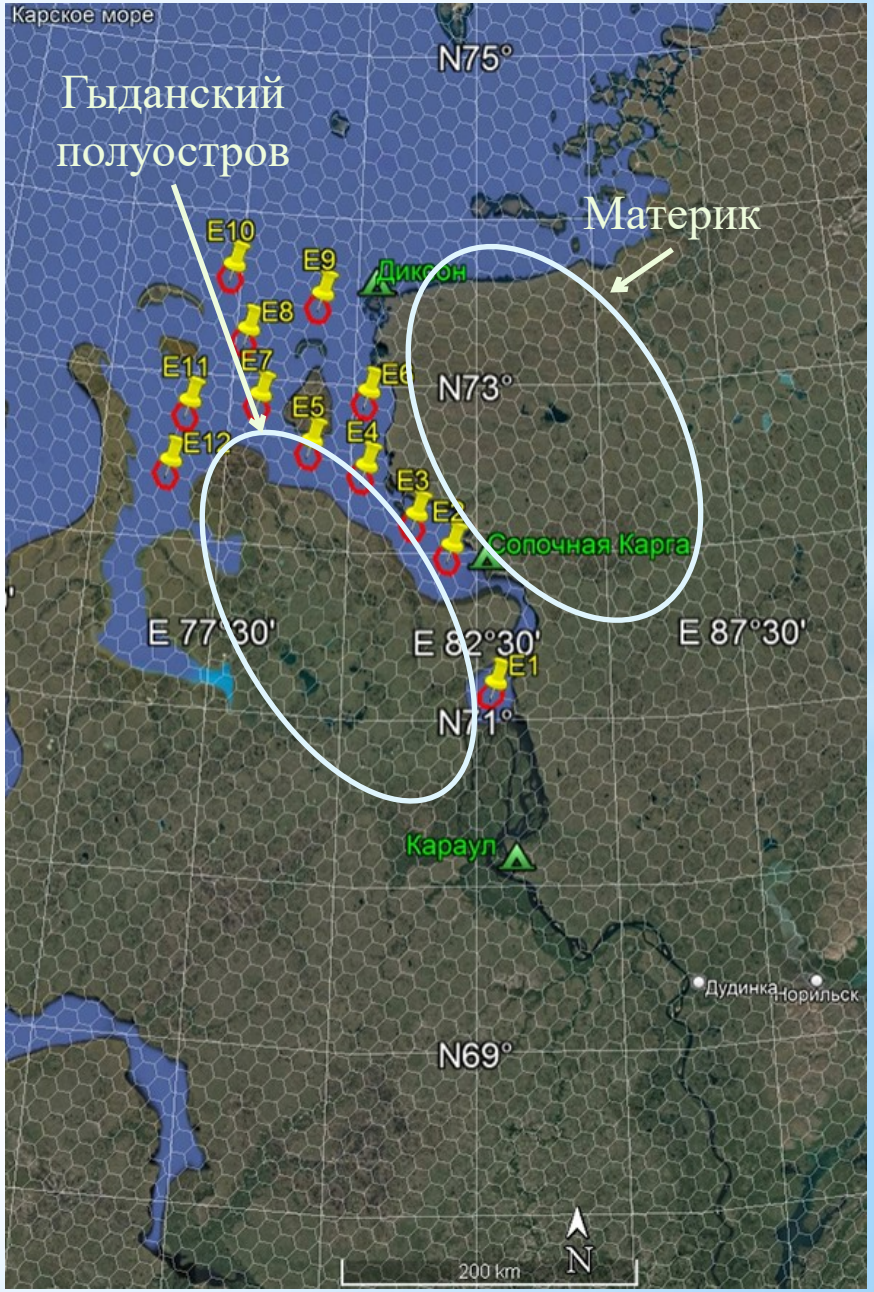
$$\varepsilon_{эфф}^{лед} = \varepsilon_{лед}\left[1 - \frac{4\pi n_{возд}\left(\varepsilon_{возд} + 2\varepsilon_{лед}\right)\frac{\langle f_\omega \rangle_{возд}}{k^2}}{2\varepsilon_{эфф} + \varepsilon_{возд}} - \right.$$

$$\left. - \frac{4\pi n_{жидк}\left(\varepsilon_{жидк} + 2\varepsilon_{лед}\right)\frac{\langle f_\omega \rangle_{жидк}}{k^2}}{2\varepsilon_{эфф} + \varepsilon_{жидк}}\right]^{-1}$$

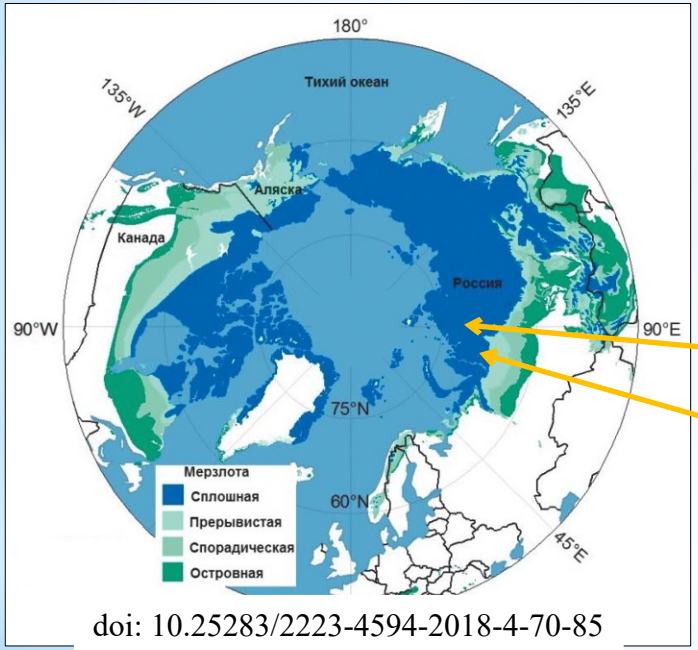
$$\varepsilon_{эфф}^{снег} = \varepsilon_{возд}\left[1 - \frac{4\pi n_{лед}\left(\varepsilon_{лед}^{вода} + 2\varepsilon_{возд}\right)\frac{\langle f_\omega \rangle_{лед}}{k^2}}{2\varepsilon_{эфф} + \varepsilon_{лед}^{вода}} - \right.$$

$$\left. - \frac{4\pi n_{вода}\left(\varepsilon_{вода} + 2\varepsilon_{лед}\right)\frac{\langle f_\omega \rangle_{вода}}{k^2}}{2\varepsilon_{эфф} + \varepsilon_{вода}}\right]^{-1}$$

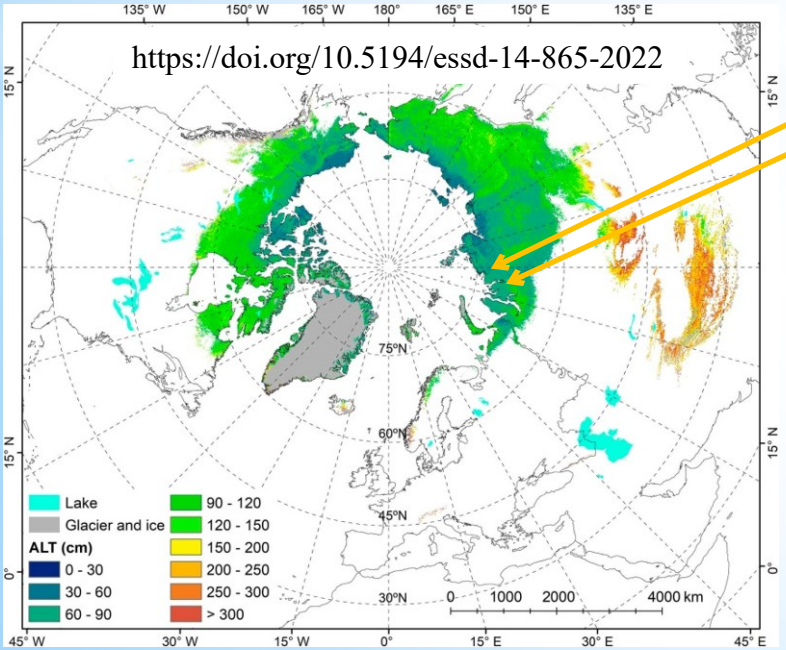
МОДЕЛЬ ЯРКОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ БЕРЕГА

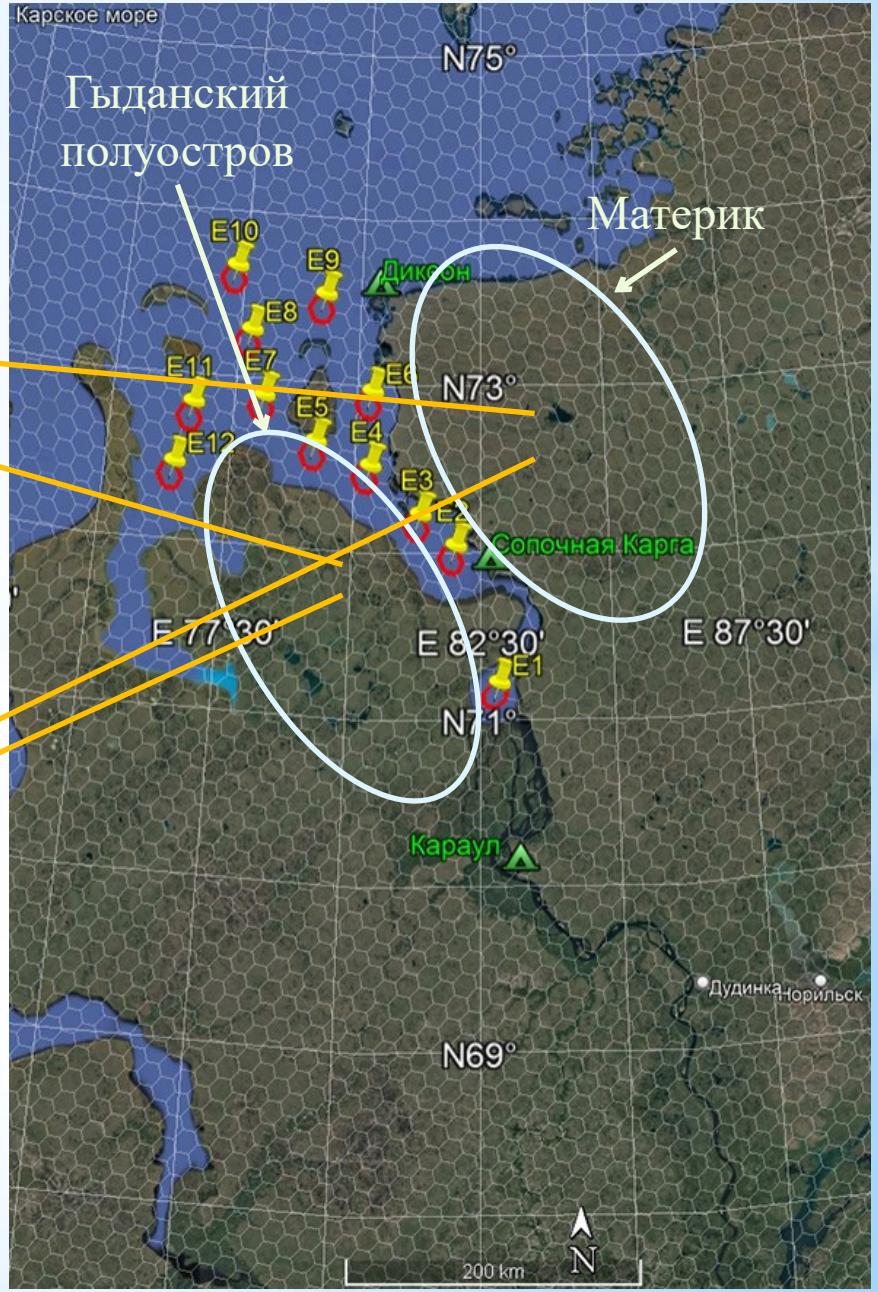


МОДЕЛЬ ЯРКОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ БЕРЕГА



doi: 10.25283/2223-4594-2018-4-70-85





МОДЕЛЬ ЯРКОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ БЕРЕГА

$$T^{h,v}_{\text{MIRAS}} = T^{h,v}_{Surf}\exp\left(-\xi_\theta\right) + T_a + R^{h,v}_{Surf}T_a\exp\left(-\xi_\theta\right) + R^{h,v}_{Surf}T_{\cos}\exp\left(-2\xi_\theta\right),$$

$$T^{h,v}_{Surf\ \text{Coast}} = x^{h,v}T$$

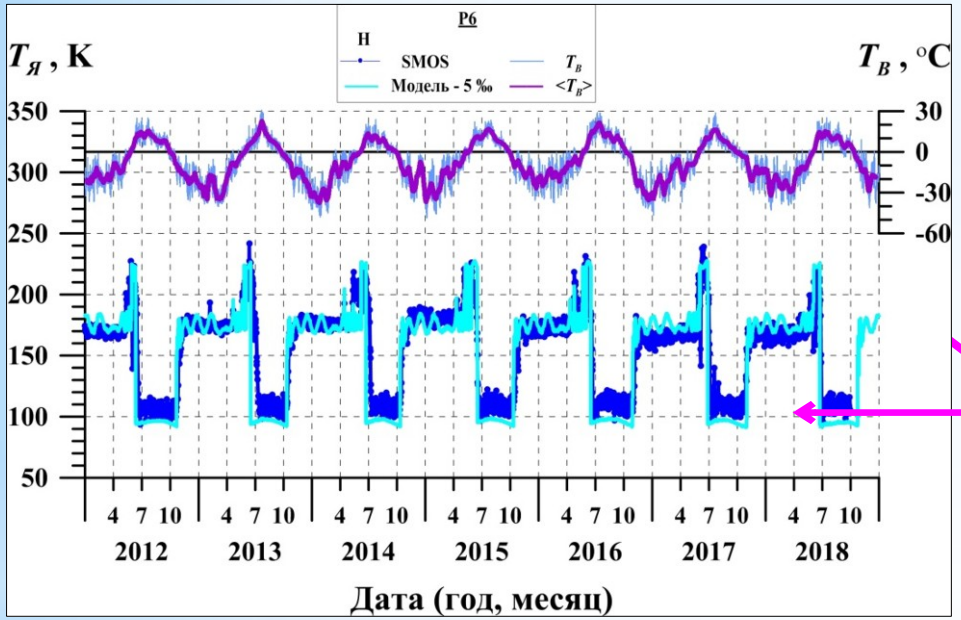
Сезон	Коэффициент излучения 42,5°	
	v	h
Лето/Осень	0,86	0,75
Зима	0,97	0,88
Весна	0,75	0,65
Оттепель	0,93	0,78

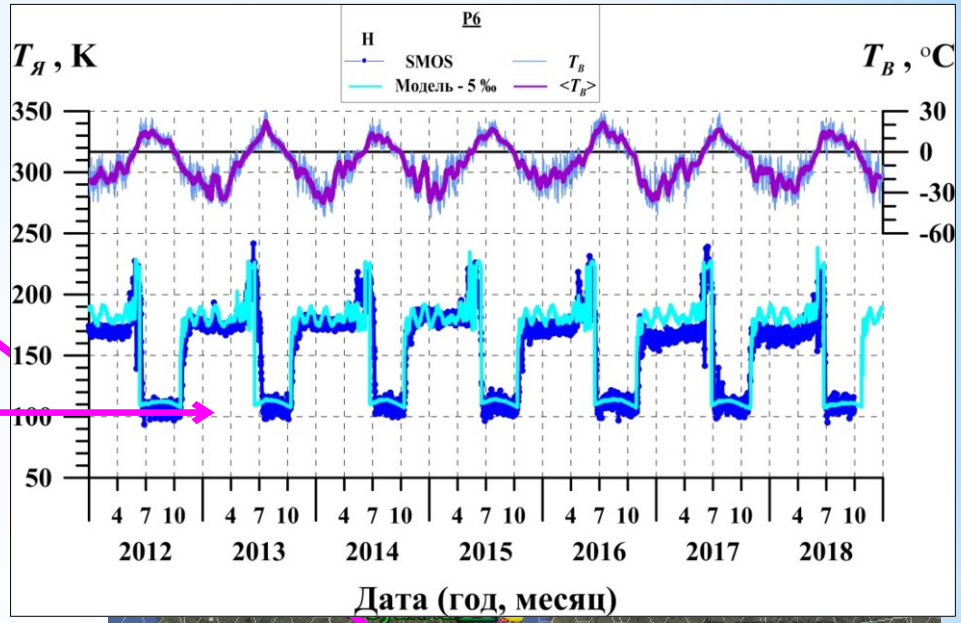
Matzler C. Passive Microwave Signatures of Landscapes in Winter // Meteorology and Atmospheric Physics. 1994. V.54. P.241-260

ОБСКАЯ ГУБА

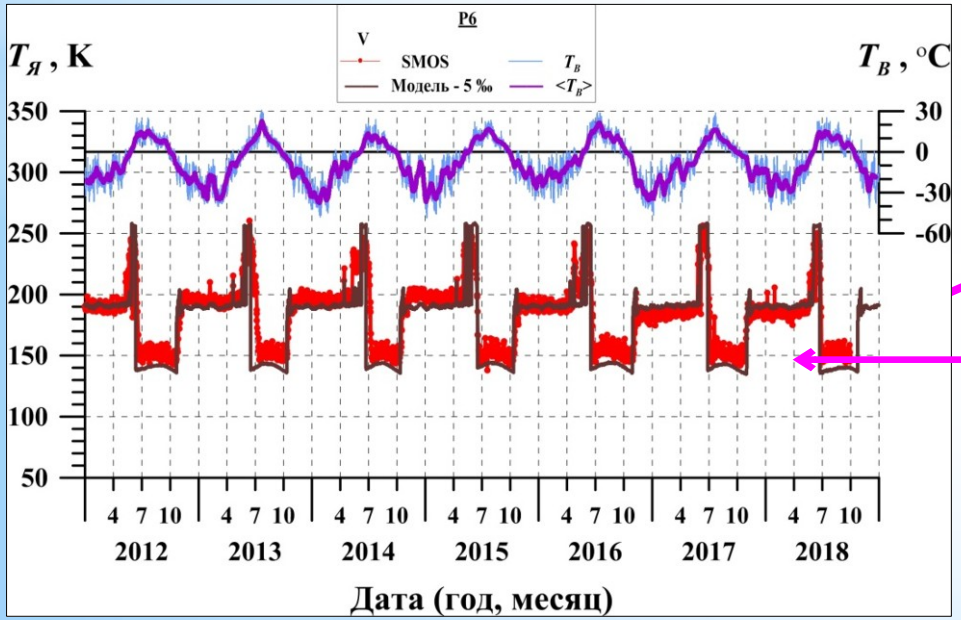
Суша – 0%

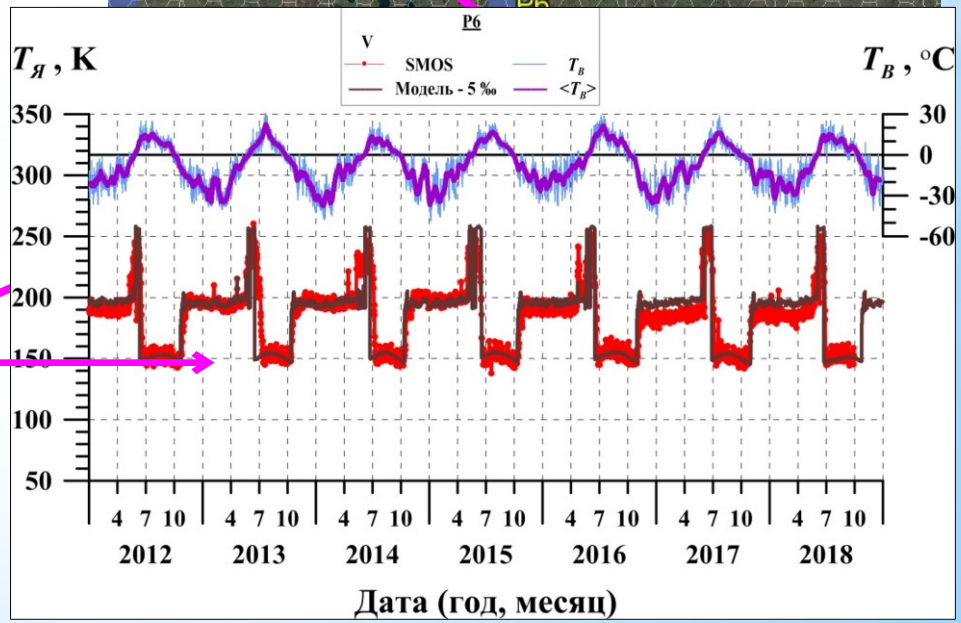
Суша – 10%



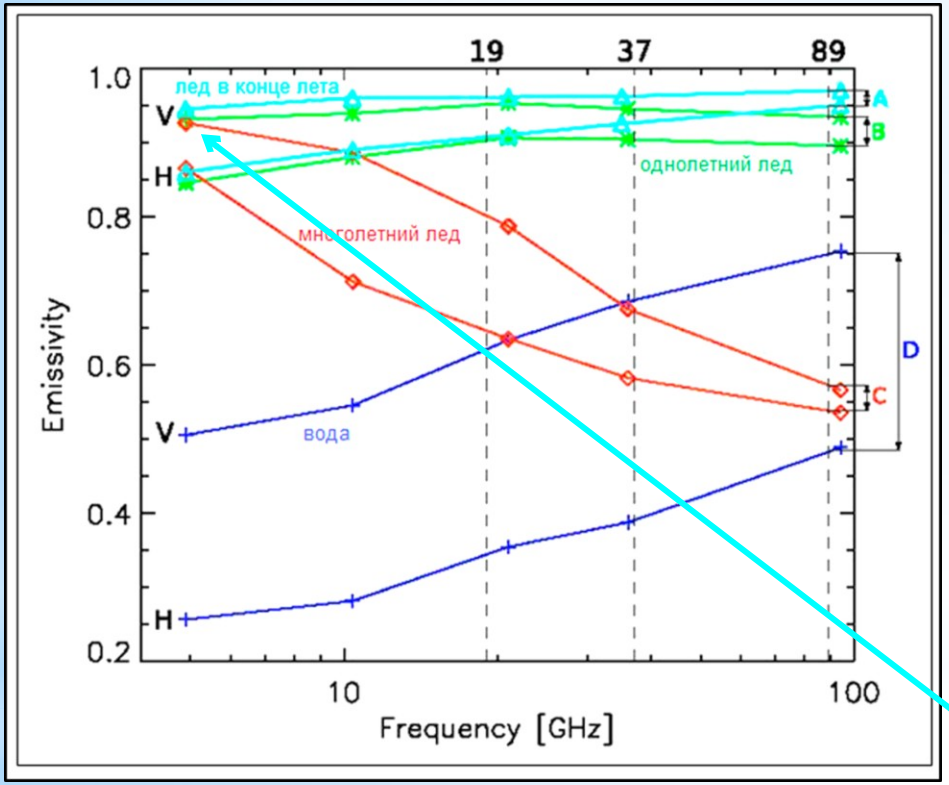


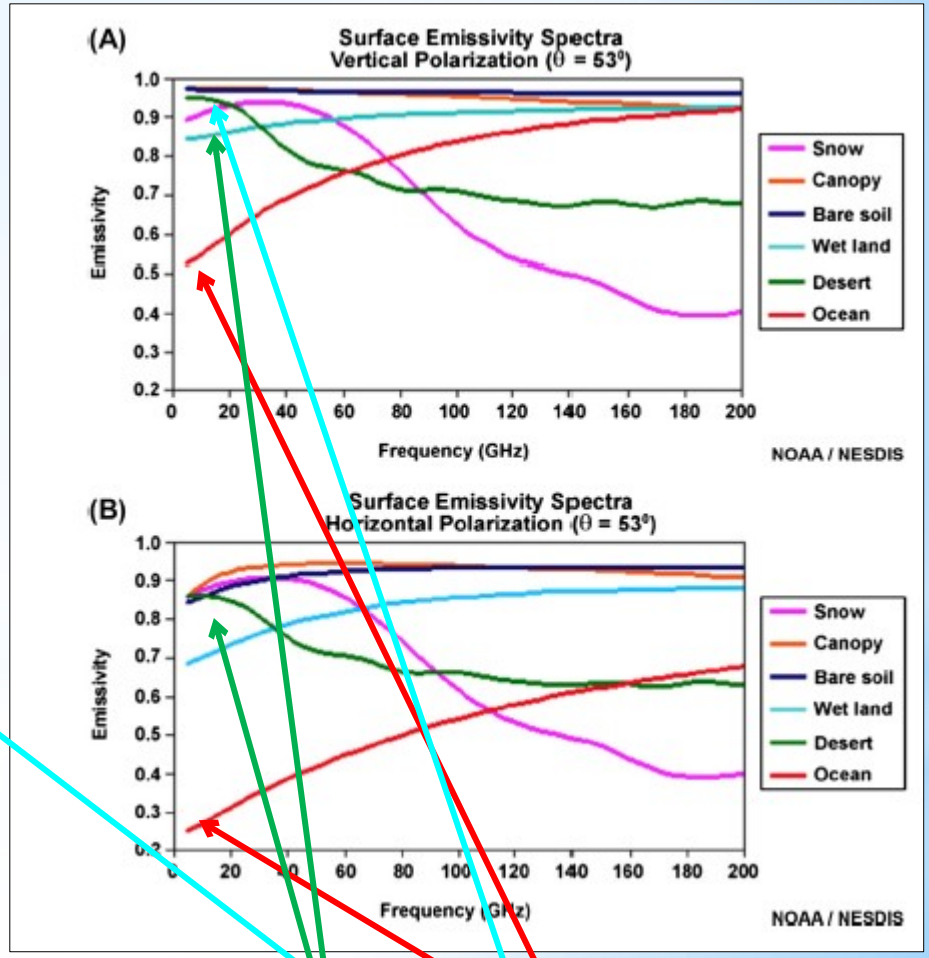
зима 5 ‰

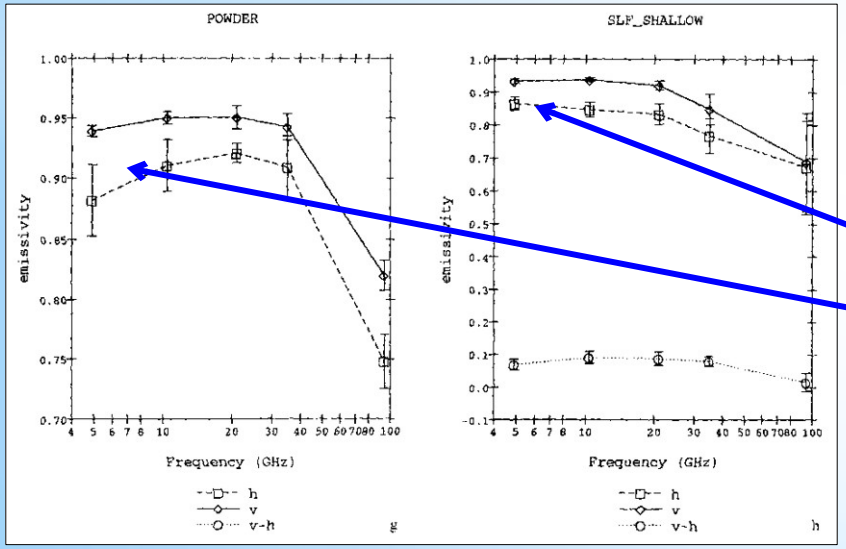




МОДЕЛЬ (зима-лето)





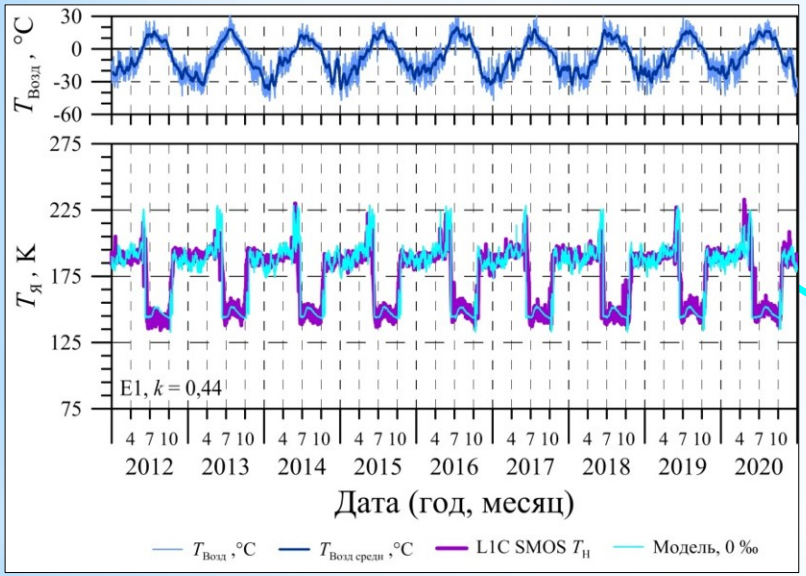


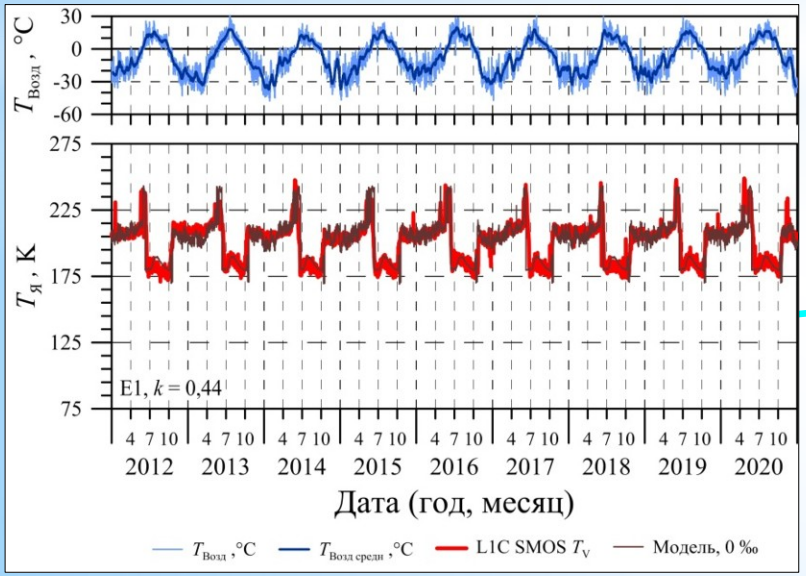
$$\chi^{лето}_{берег} > \chi^{лето}_{акватория}$$

$$\chi^{зима}_{берег} \sim \chi^{зима}_{акватория}$$

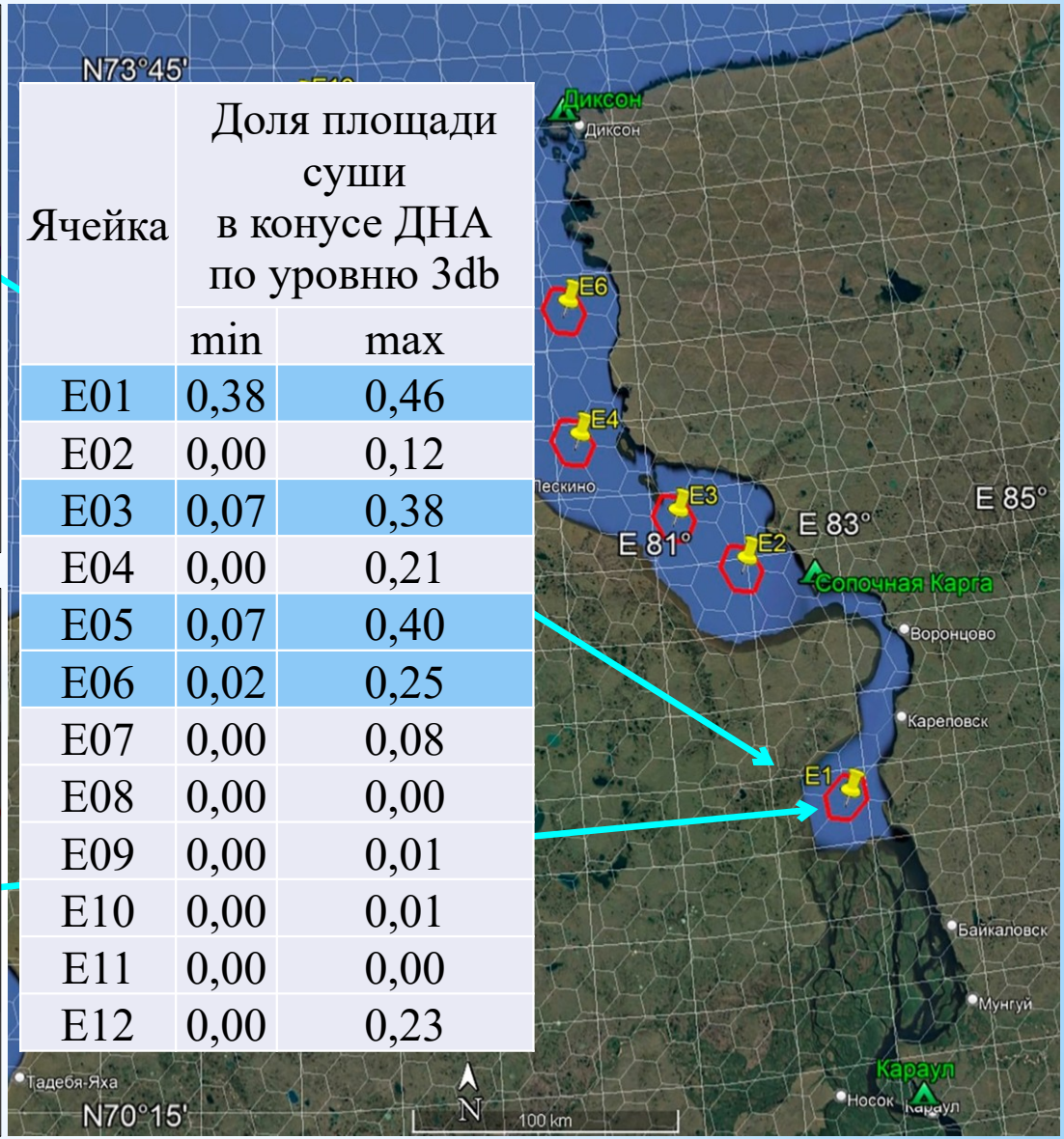
ЕНИСЕЙСКИЙ ЗАЛИВ

Зима - 0 ‰ **Суша – 44%**



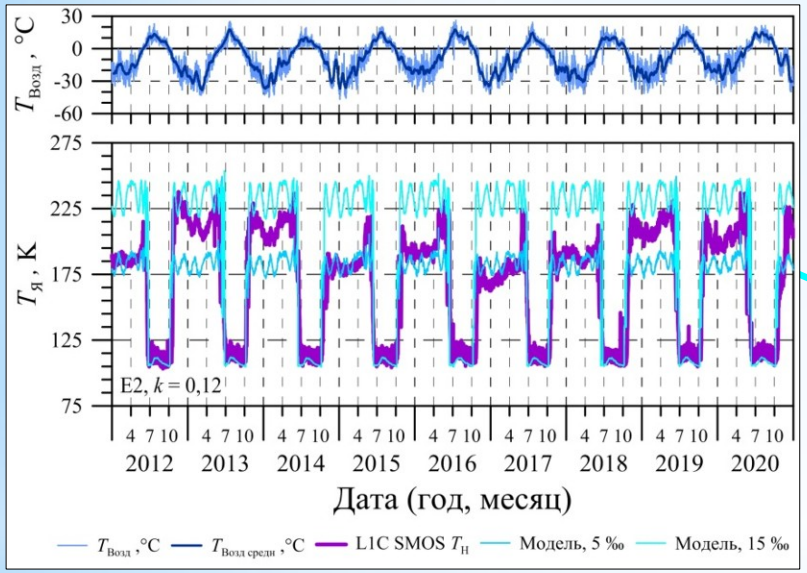


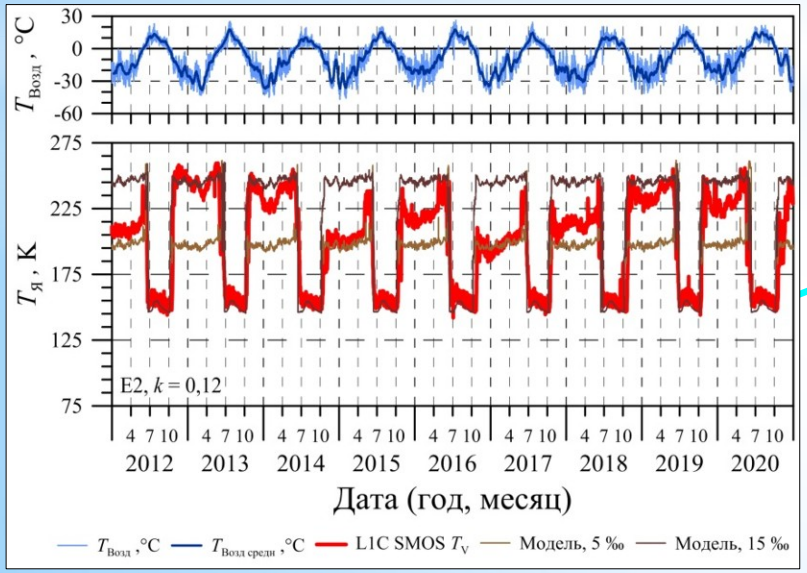
Ячейка	Доля площади суши в конусе ДНА по уровню 3db	
	min	max
E01	0,38	0,46
E02	0,00	0,12
E03	0,07	0,38
E04	0,00	0,21
E05	0,07	0,40
E06	0,02	0,25
E07	0,00	0,08
E08	0,00	0,00
E09	0,00	0,01
E10	0,00	0,01
E11	0,00	0,00
E12	0,00	0,23



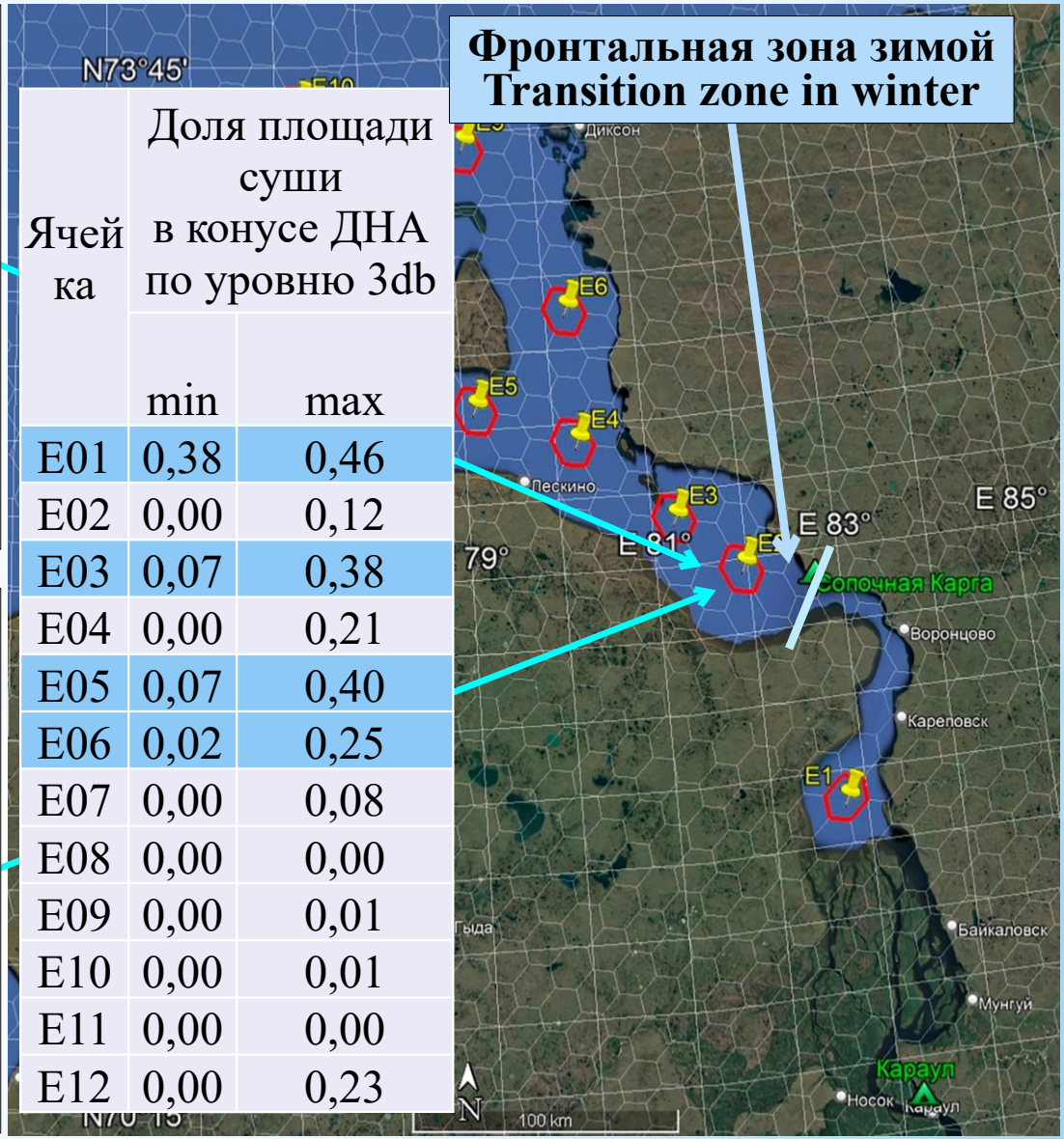
ЕНИСЕЙСКИЙ ЗАЛИВ

Зима – 5-15 ‰ **Суша – 12%**



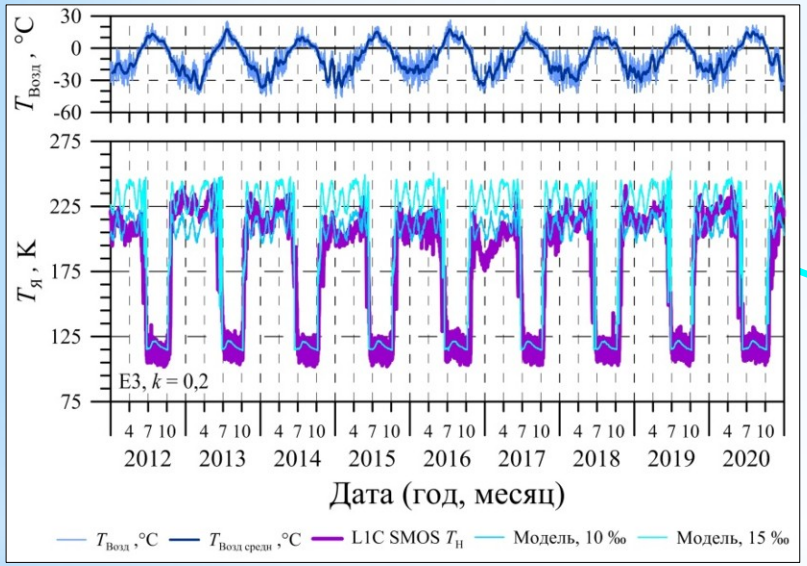


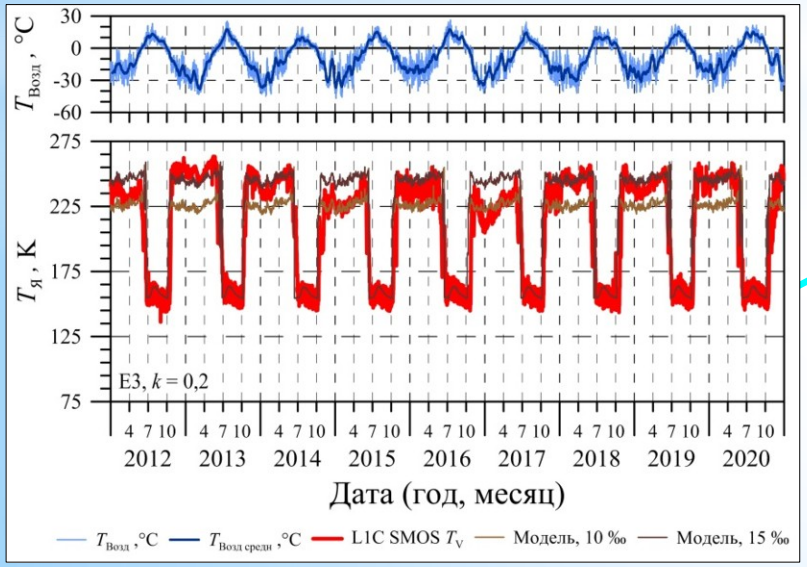
Ячейка	Доля площади суши в конусе ДНА по уровню 3db	
	min	max
E01	0,38	0,46
E02	0,00	0,12
E03	0,07	0,38
E04	0,00	0,21
E05	0,07	0,40
E06	0,02	0,25
E07	0,00	0,08
E08	0,00	0,00
E09	0,00	0,01
E10	0,00	0,01
E11	0,00	0,00
E12	0,00	0,23



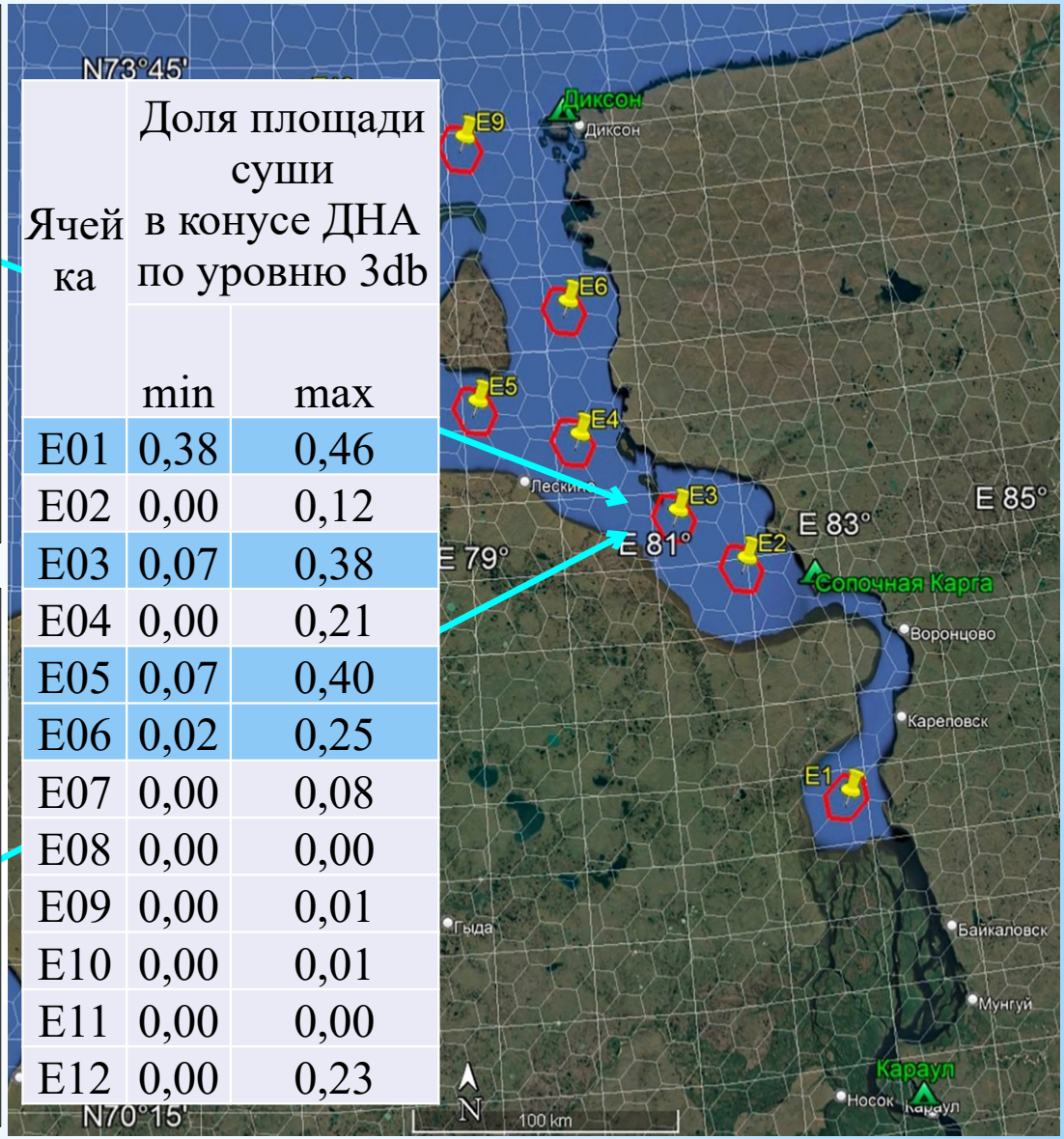
ЕНИСЕЙСКИЙ ЗАЛИВ

Зима – 10-15 ‰ **Суша – 20%**



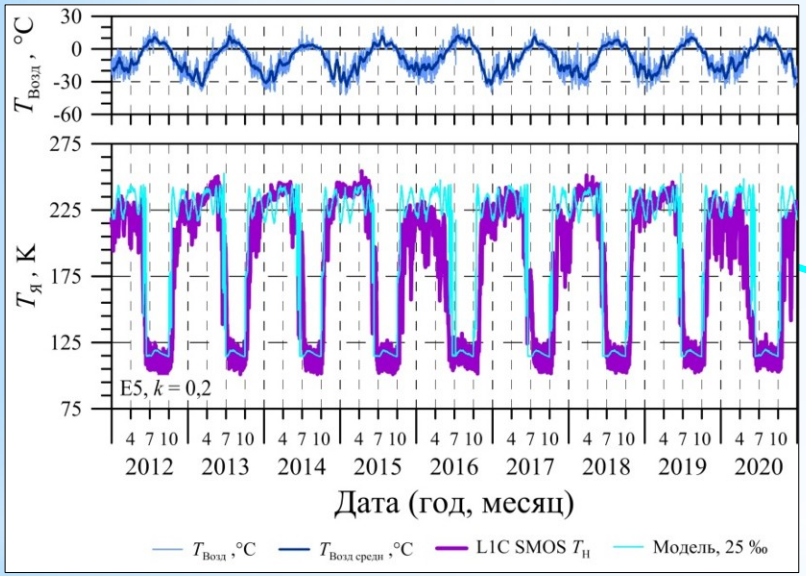


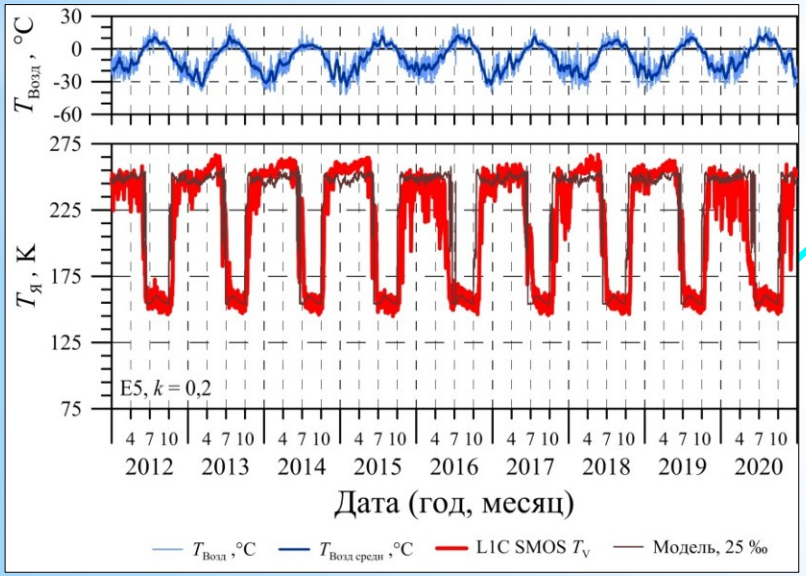
Ячейка	Доля площади суши в конусе ДНА по уровню 3db	
	min	max
E01	0,38	0,46
E02	0,00	0,12
E03	0,07	0,38
E04	0,00	0,21
E05	0,07	0,40
E06	0,02	0,25
E07	0,00	0,08
E08	0,00	0,00
E09	0,00	0,01
E10	0,00	0,01
E11	0,00	0,00
E12	0,00	0,23

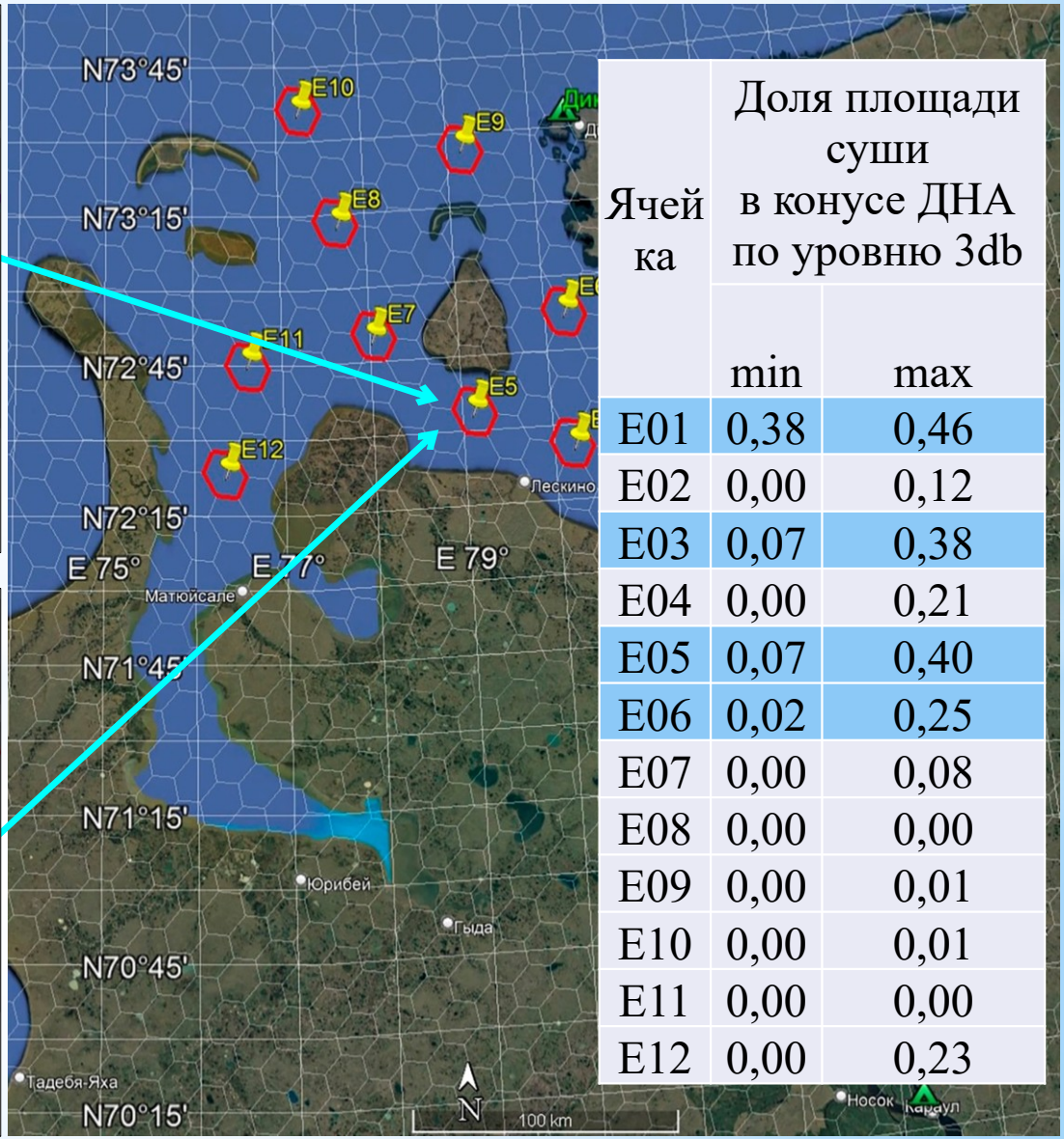


ЕНИСЕЙСКИЙ ЗАЛИВ

Зима – 25 ‰ **Суша – 20%**



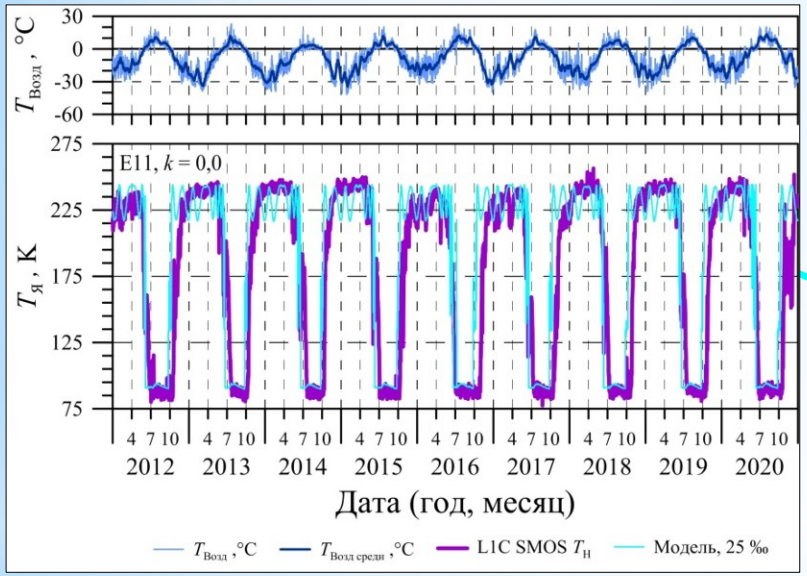


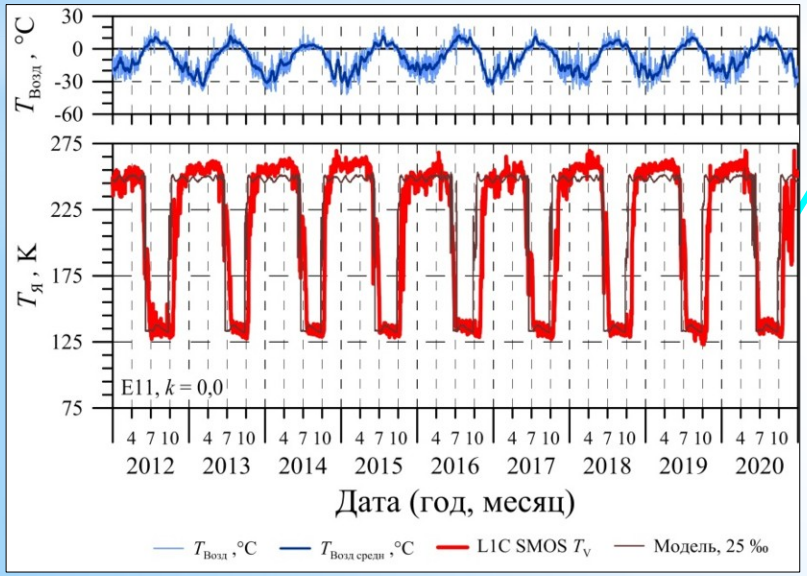


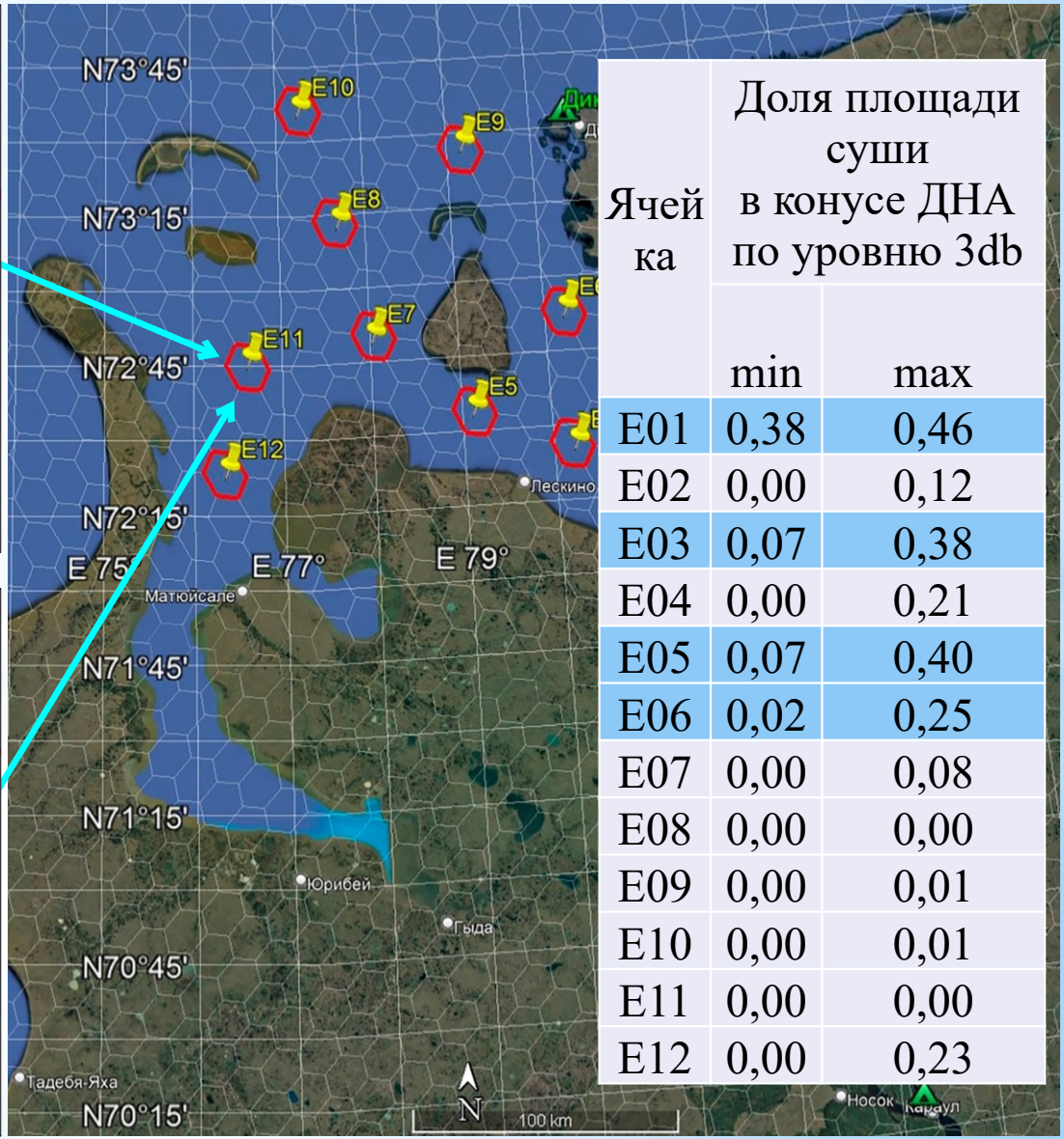
Ячейка	Доля площади суши в конусе ДНА по уровню 3db	
	min	max
E01	0,38	0,46
E02	0,00	0,12
E03	0,07	0,38
E04	0,00	0,21
E05	0,07	0,40
E06	0,02	0,25
E07	0,00	0,08
E08	0,00	0,00
E09	0,00	0,01
E10	0,00	0,01
E11	0,00	0,00
E12	0,00	0,23

ЕНИСЕЙСКИЙ ЗАЛИВ

Зима – 25 ‰ **Суша – 0%**







Ячейка	Доля площади суши в конусе ДНА по уровню 3db	
	min	max
E01	0,38	0,46
E02	0,00	0,12
E03	0,07	0,38
E04	0,00	0,21
E05	0,07	0,40
E06	0,02	0,25
E07	0,00	0,08
E08	0,00	0,00
E09	0,00	0,01
E10	0,00	0,01
E11	0,00	0,00
E12	0,00	0,23

АНАЛИЗ СПЛОЧЕННОСТИ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА В КАРСКОМ МОРЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА SMOS

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

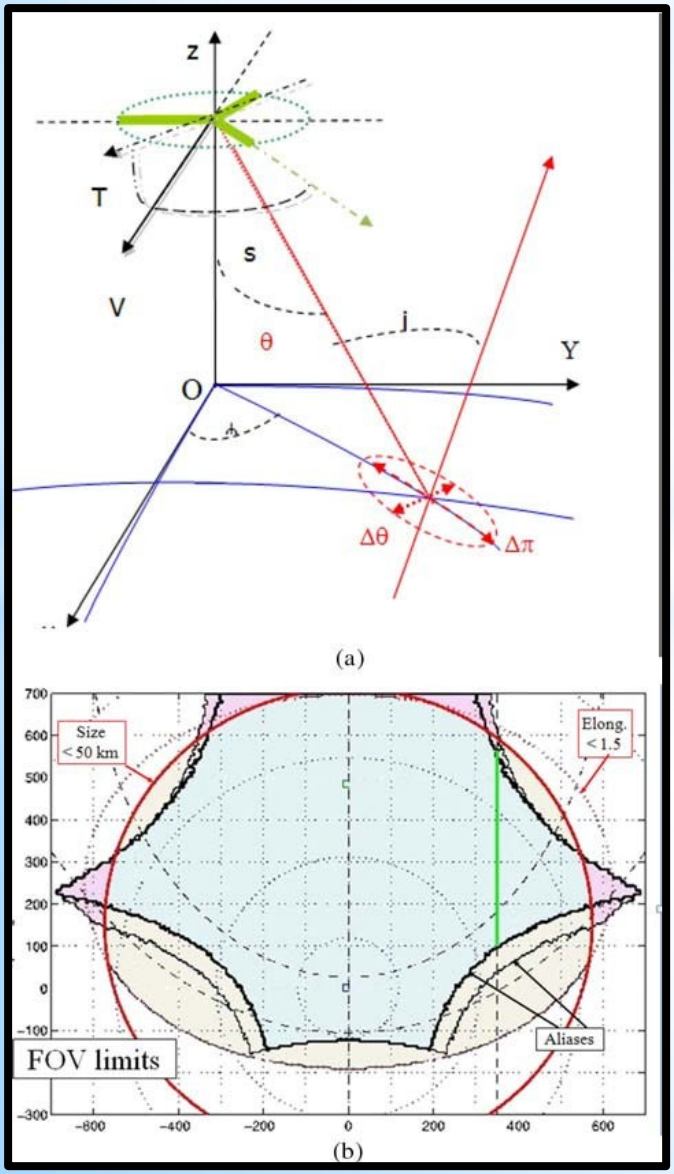
Тихонов В.В.[1,2,3], Алексеева Т.А. [3,1], Афанасьева Е.В.[3,1], Соколова Ю.В. [3,1], Хвостов И.В.[2], Романов А.Н.[2]

[1]Институт космических исследований РАН, г. Москва
[2]Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул
[3]Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург

vtikhonov@asp.iki.rssi.ru , vasvlatikh@yandex.ru

ДАННЫЕ

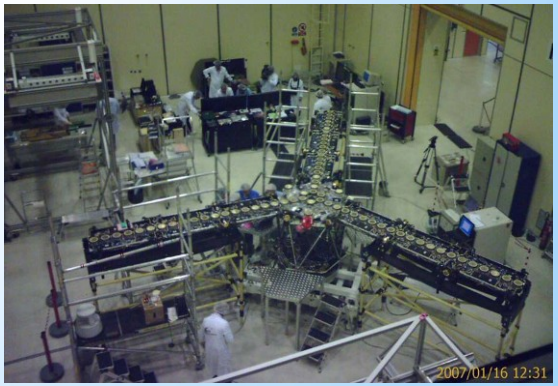
SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) – 2009 — наст. вр.
MIRAS (Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis)



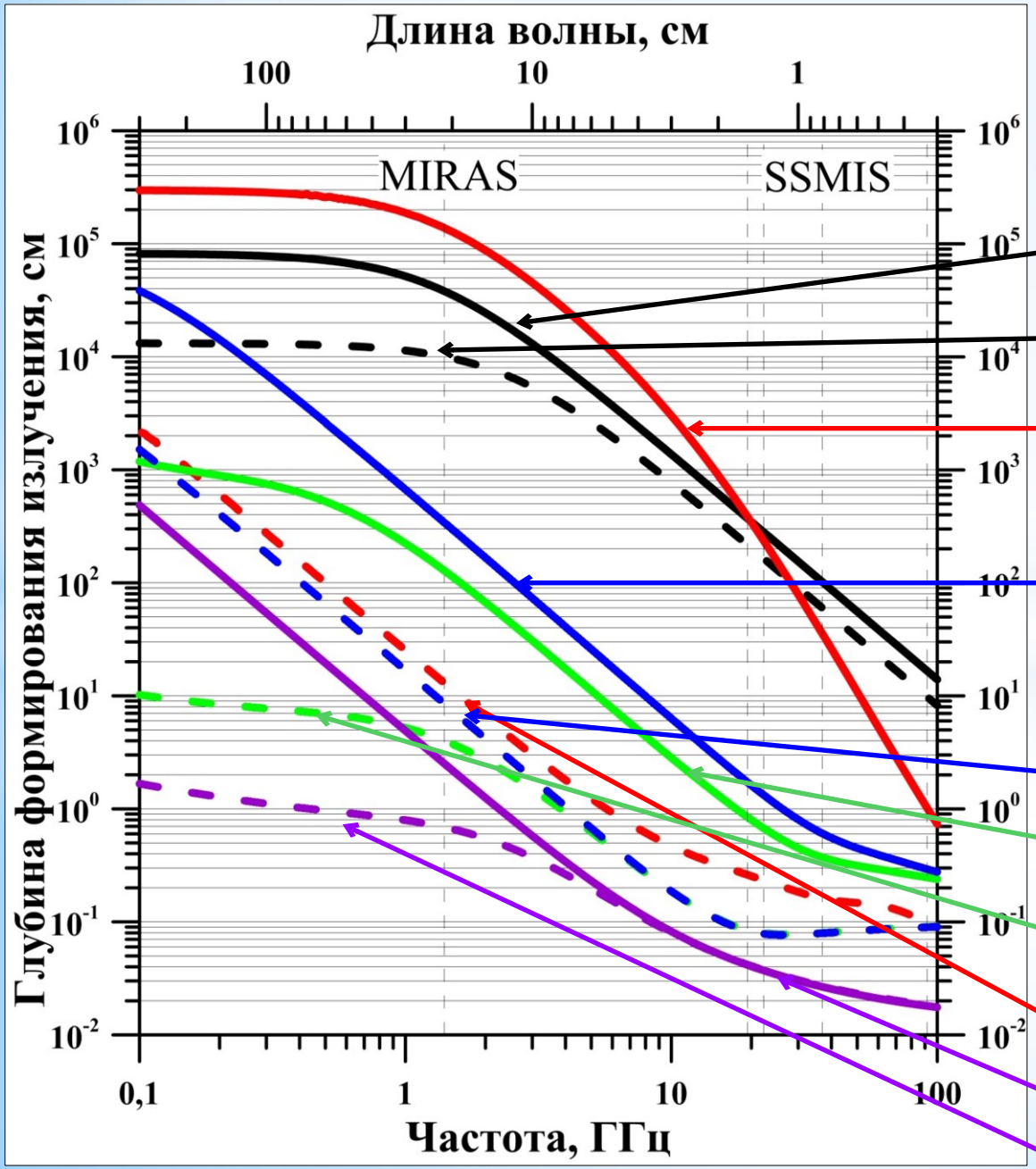
Продукт SMOS L1C

f = 1.4 (H, V) ГГц

θ = 42.5°



ГЛУБИНА ФОРМИРОВАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ



$$h_{PD} = \frac{\lambda}{4\pi \,\mathrm{Im}\left(\sqrt{\varepsilon}\right)}$$

Пресноводный лёд, t = –20 °C

Пресноводный лёд, t = 0 °C

Сухой снег, t = –20 °C

Озёрный лёд, t = –20 °C

Озёрный лёд, t = 0 °C

Морской лёд, t = –20 °C

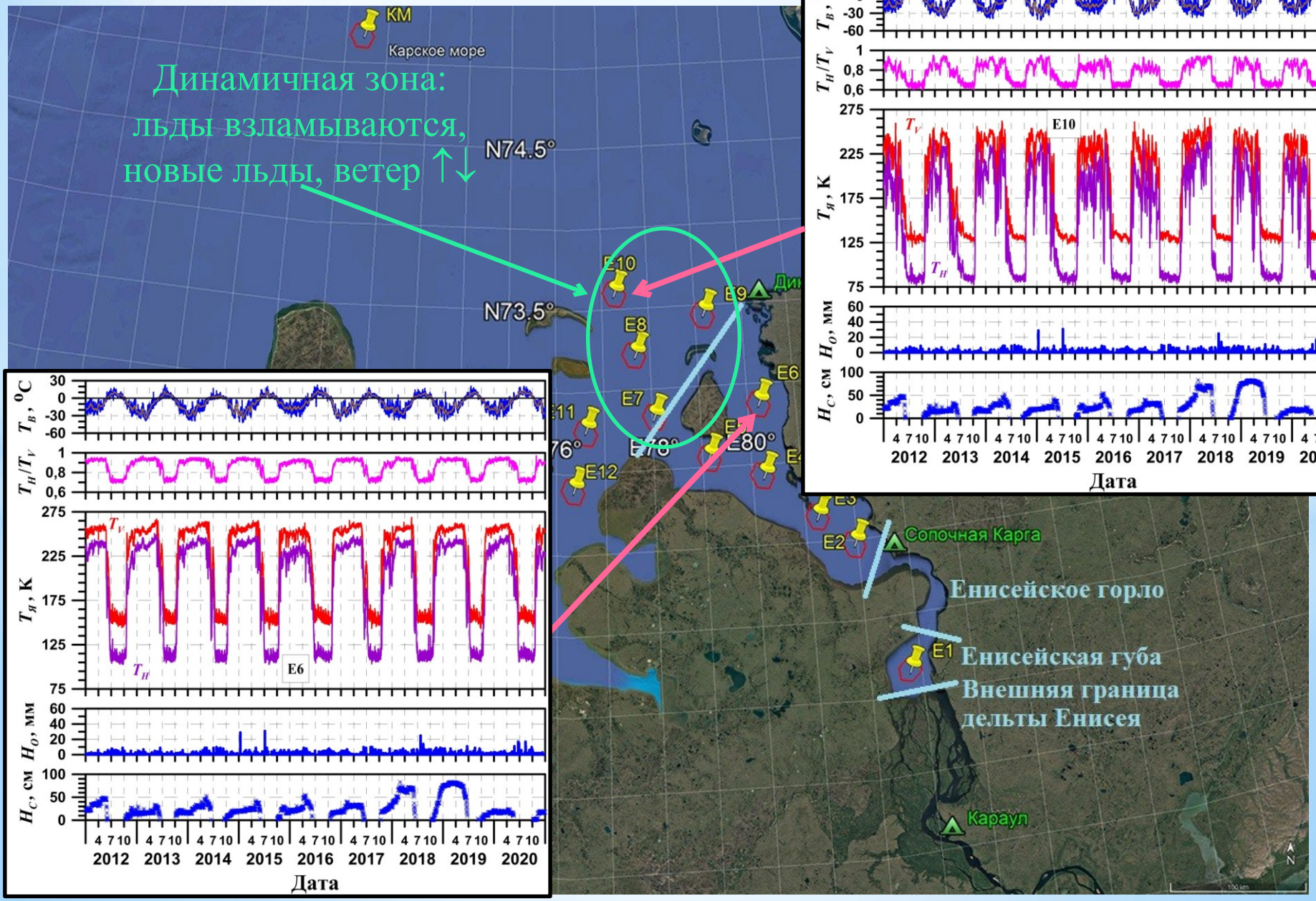
Морской лёд, t = 0 °C

Влажный снег, t = 0 °C

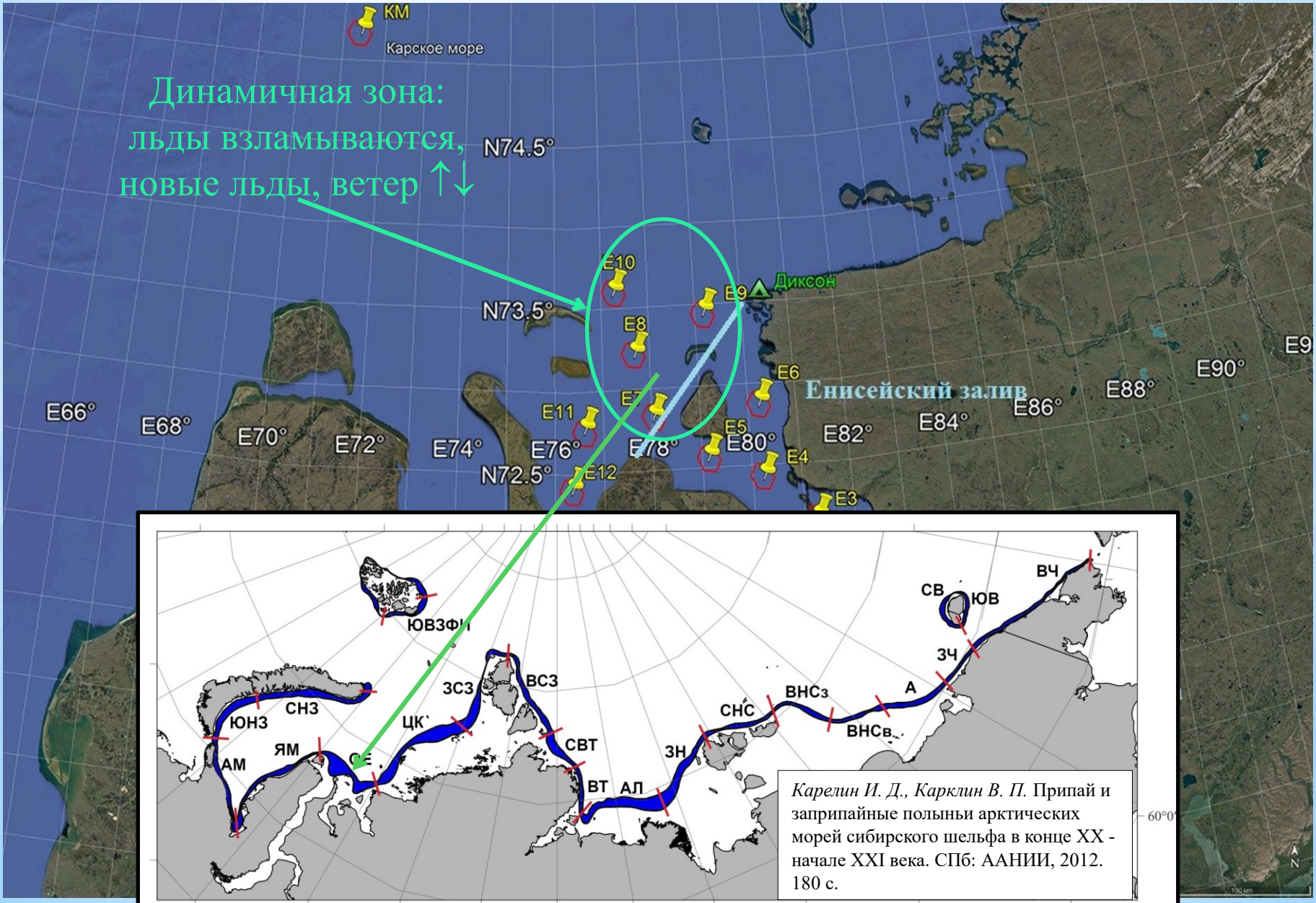
Пресная вода, t = 0 °C

Морская вода, t = 0 °C

ЭСТУАРИИ АРКТИКИ. ЕНИСЕЙСКИЙ ЗАЛИВ

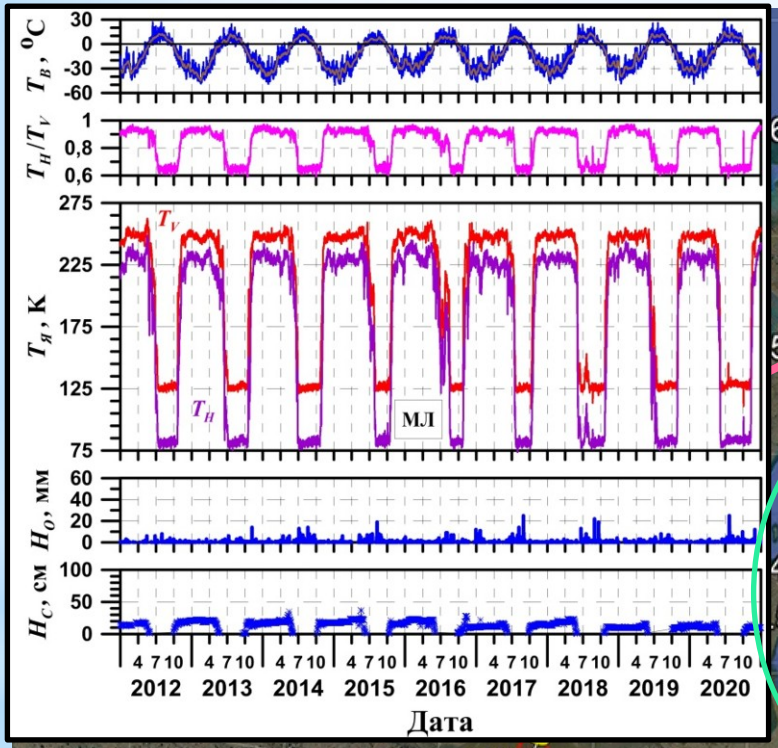


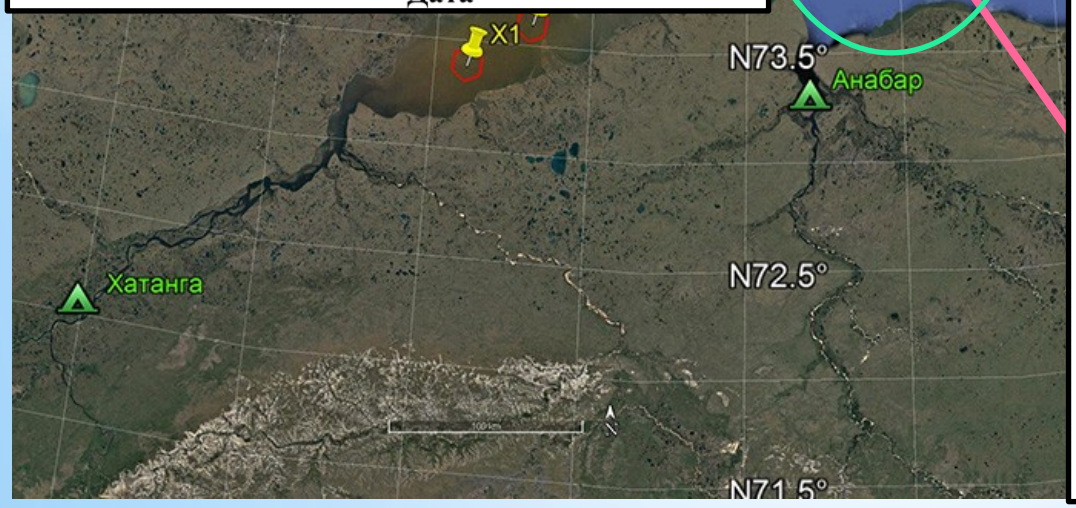
ЭСТУАРИИ АРКТИКИ. ЕНИСЕЙСКИЙ ЗАЛИВ

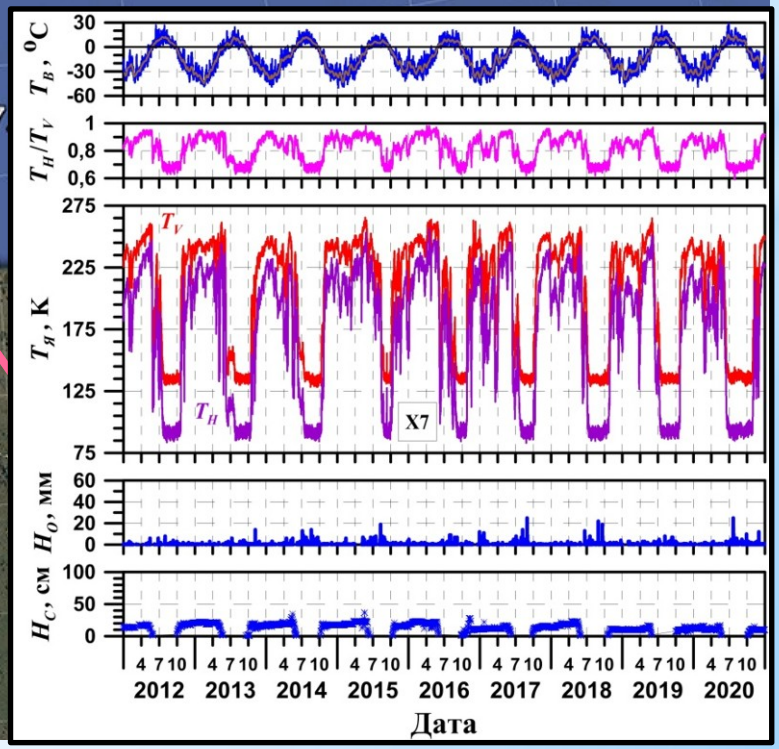


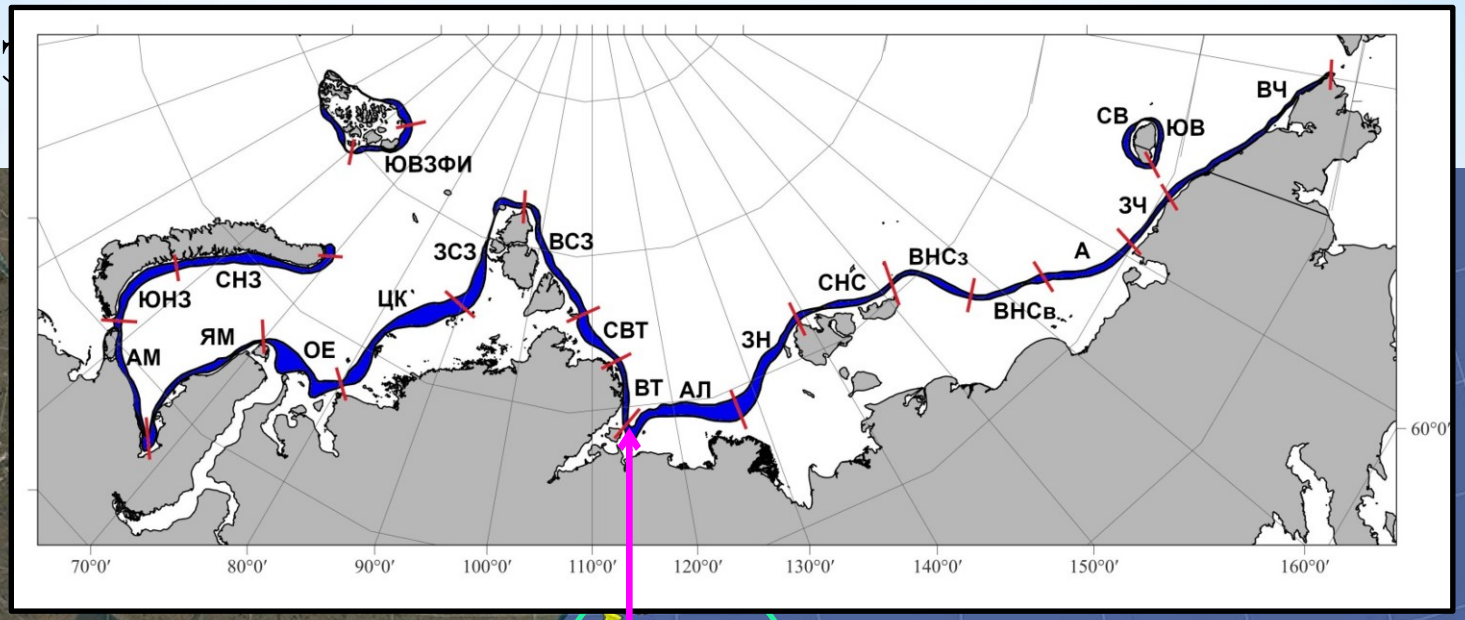
Карелин И. Д., Карклин В. П. Припай и заприпайные полыньи арктических морей сибирского шельфа в конце XX - начале XXI века. СПб: ААНИИ, 2012. 180 с.

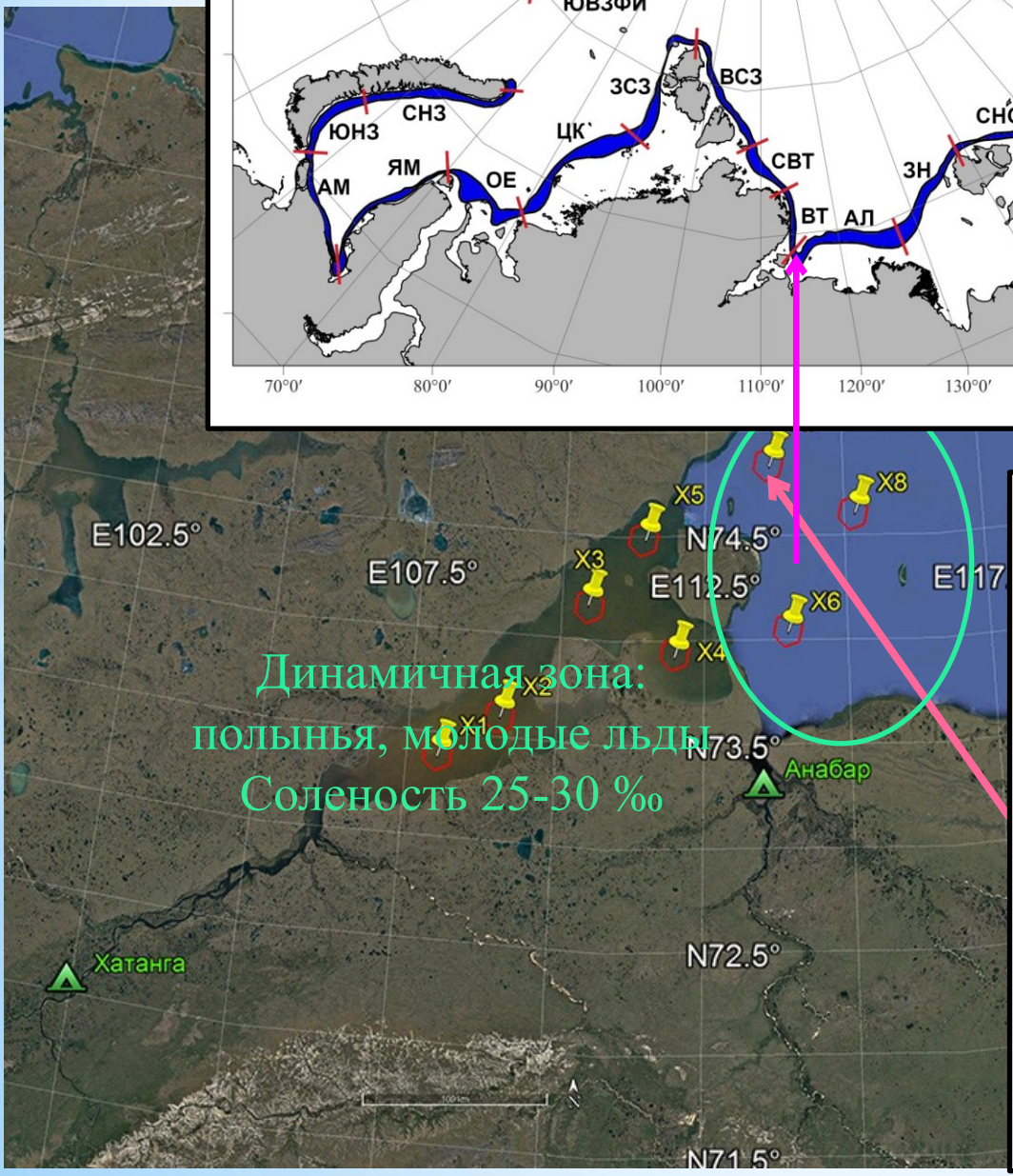
ЭСТУАРИИ АРКТИКИ. ХАТАНГСКИЙ ЗАЛИВ

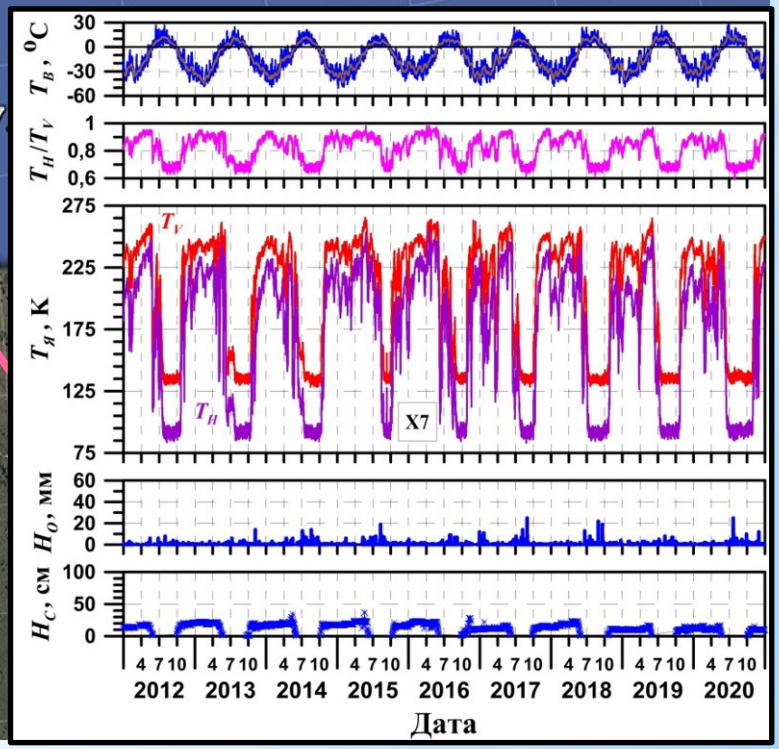







ЮВЗФИ
ЮНЗ
СНЗ
ЯМ
АМ
ОЕ
ЦК
ЗСЗ
ВСЗ
СВТ
ВТ
АЛ
ЗН
СНС
ВНСз
ВНСв
А
ЗЧ
СВ
ЮВ
ВЧ
70°0′
80°0′
90°0′
100°0′
110°0′
120°0′
130°0′
140°0′
150°0′
160°0′
60°0′


E102.5°
E107.5°
E112.5°
E117
N74.5°
N73.5°
N72.5°
N71.5°
X1
X2
X3
X4
X5
X6
X8
Анабар
Хатанга
Динамичная зона:
полынья, молодые льды
Соленость 25-30 ‰


T_B, °C
T_H/T_V
T_H, K
T_V
T_H
X7
H_O, мм
H_C, см
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018
2019
2020
Дата

ДАННЫЕ ПО СПЛОЧЕННОСТИ ЛЬДА

MODIS Terra **ААНИИ** Sentinel-1

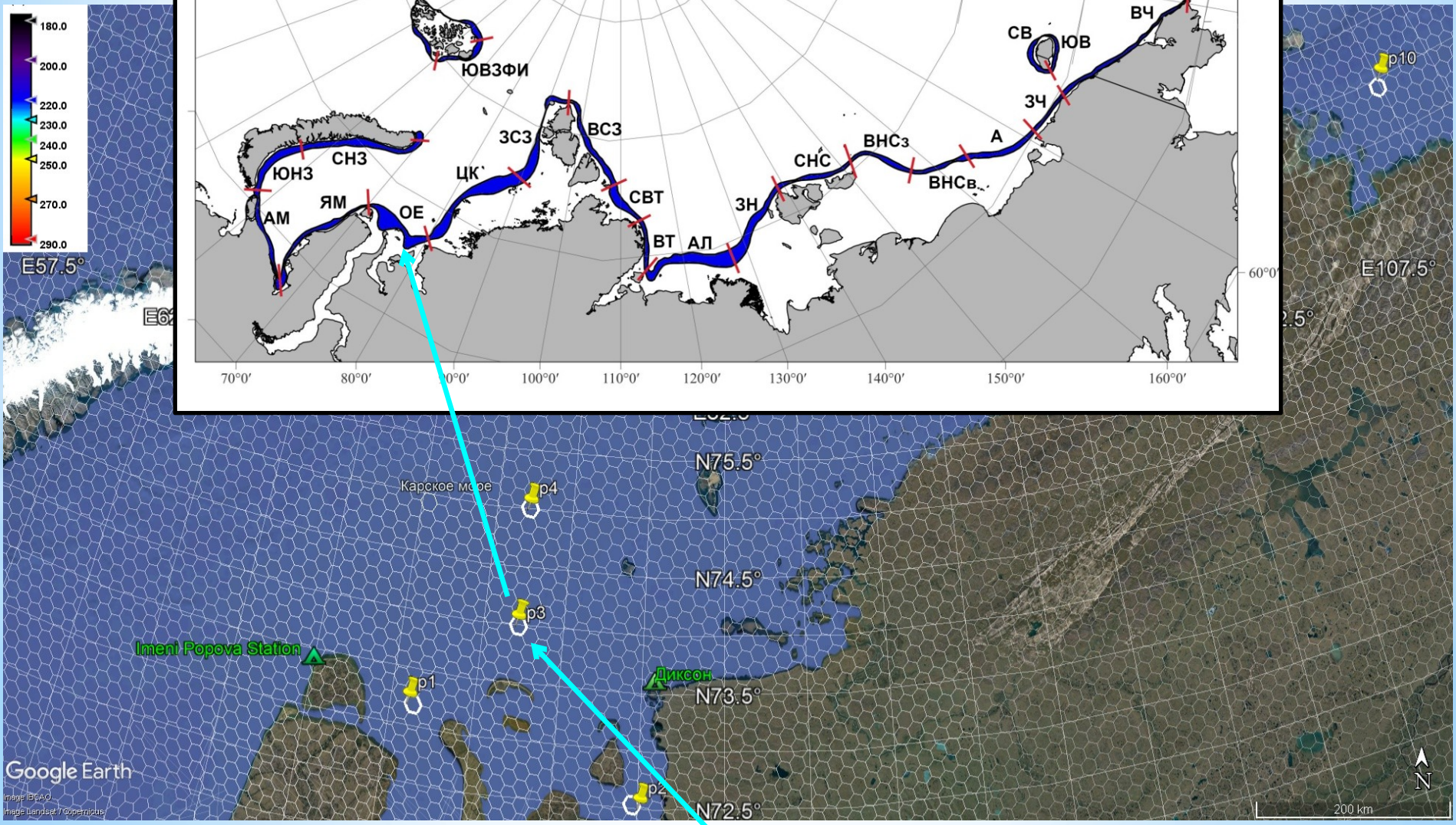
MODIS

Разрешение – 250 м
Band 1: 0,62 – 0,67 мкм
Band 4: 0,545 – 0,565 мкм
Band 3: 0,459 – 0,479 мкм

Sentinel-1

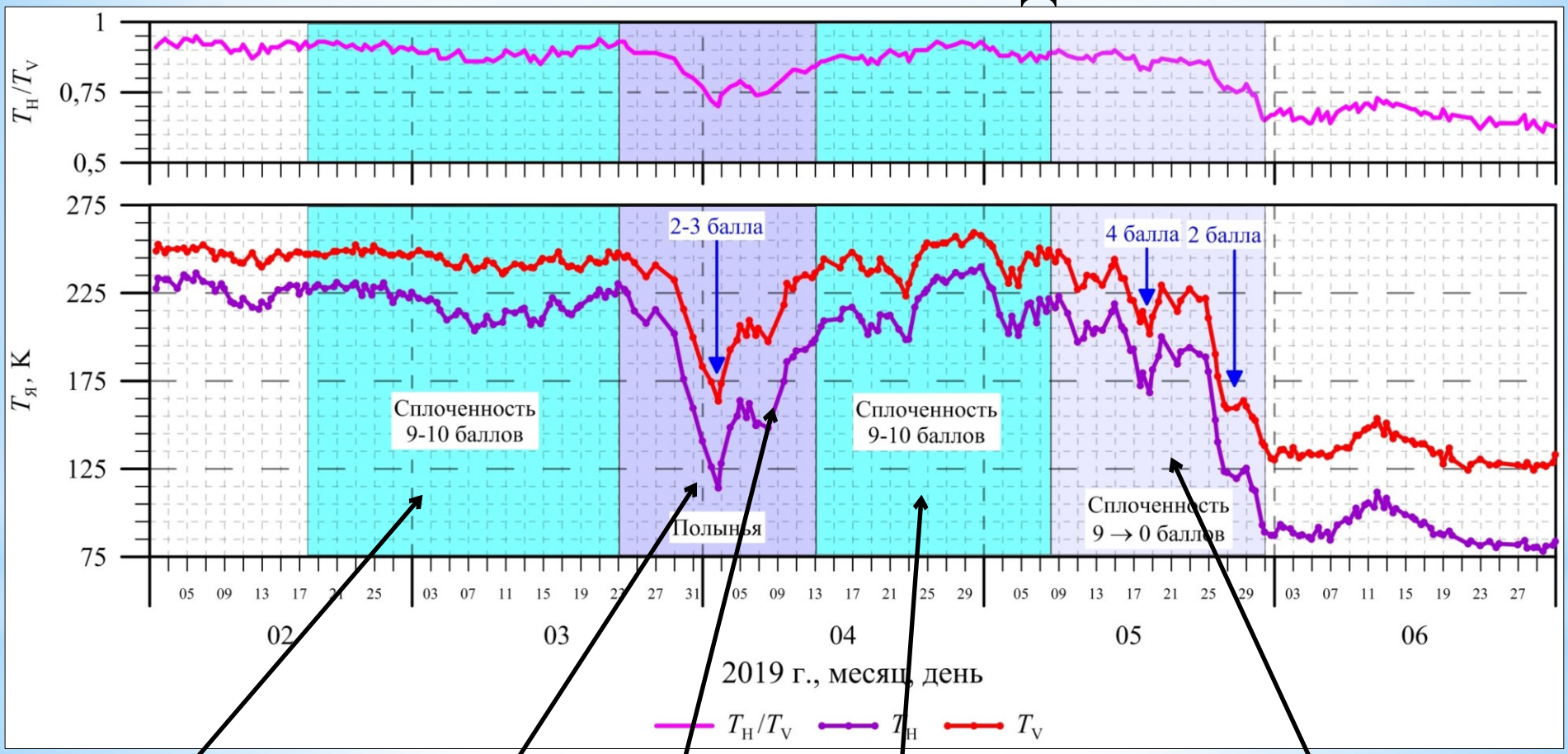
Разрешение – 300 м
C-band (5,405 ГГц)

ДАННЫЕ О СПЛОЧЕННОСТИ ЛЬДА



74° с.ш., 76° в.д.

СПЛОЧЕННОСТЬ ЛЬДА



однолетние льды
T_H: 204 K – 233 K
T_V: 235 K – 254 K
T_H/T_V: 0,85 – 0,95

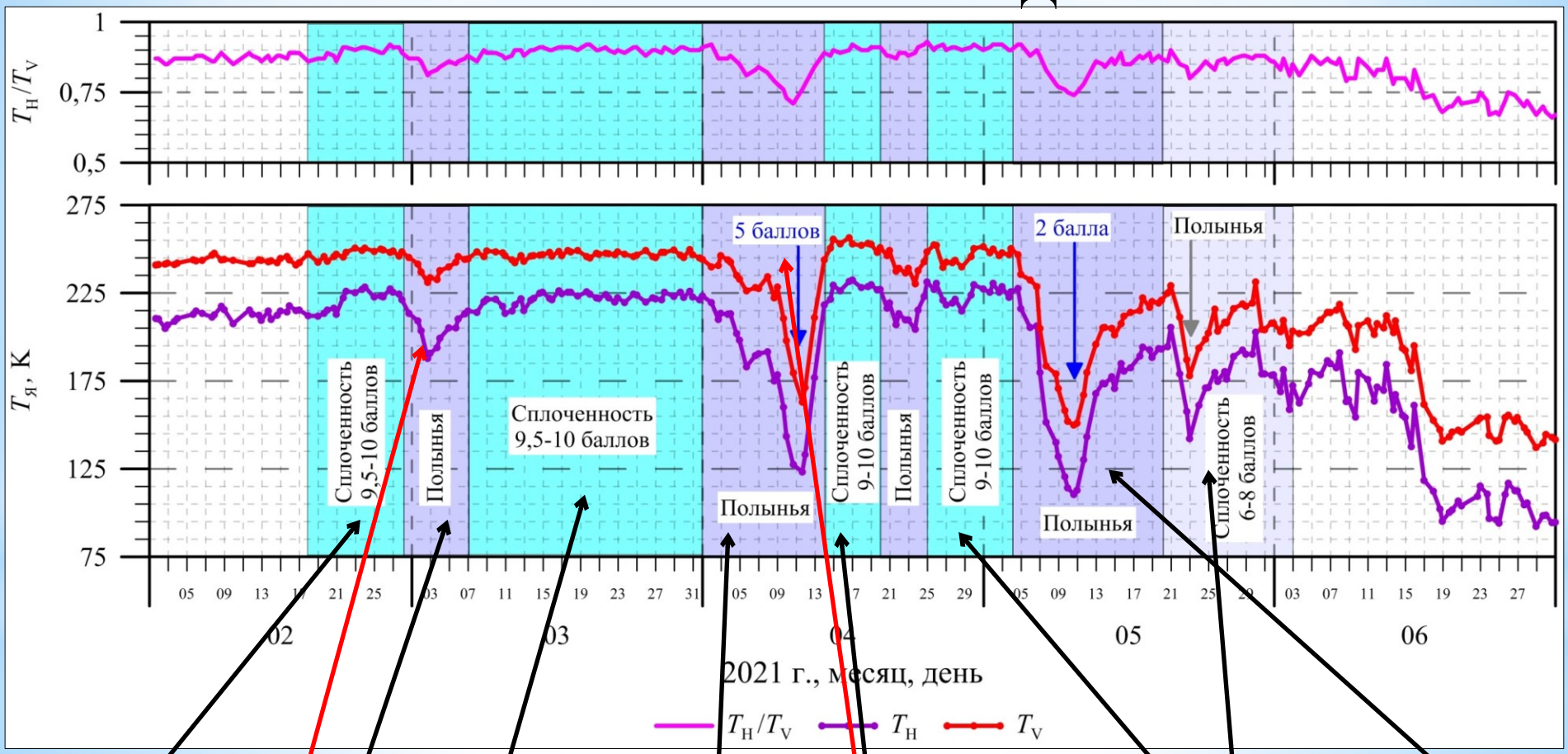
полынья
$T_H \rightarrow 115$ K
$T_V \rightarrow 164$ K
$T_H/T_V \rightarrow 0,7$

однолетние льды, нилас
T_H: 196 K – 240 K
T_V: 224 K – 260 K
T_H/T_V: 0,85 – 0,94

процесс таяния
T_H: 225 K → 90 K
T_V: 250 K → 135 K
T_H/T_V: 0,9 → 0,65

закрытие полыньи
начальные формы льда
однолетние льды с севера

СПЛОЧЕННОСТЬ ЛЬДА



однолетний лед
$T_Н$: 212 K – 230 K
T_V: 243 K – 252 K
$T_Н/T_V$: 0,85 – 0,92

с→однолетний лед
$T_Н$: 214 K – 227 K
T_V: 243 K – 250 K
$T_Н/T_V$: 0,85 – 0,92

однолетний лед
$T_Н$: 219 K – 234 K
T_V: 245 K – 257 K
$T_Н/T_V$: 0,87 – 0,93

однолетний лед
$T_Н$: 215 K – 233 K $T_Н \rightarrow 110$ K
T_V: 240 K – 254 K $T_V \rightarrow 150$ K
$T_Н/T_V$: 0,89 – 0,93 $T_Н/T_V \rightarrow 0,74$

юз→полынья

полынья→нилас→серый лед
св→ол 9-10 баллов, $T_Н \rightarrow 186$ K
$T_V \rightarrow 230$ K, $T_Н/T_V \rightarrow 0,81$

однолетний лед→нилас
$T_Н \rightarrow 123$ K, $T_V \rightarrow 163$ K,
$T_Н/T_V \rightarrow 0,71$

однолетний лед
$T_Н$: 155 K – 205 K,
T_V: 195 K – 233 K, $T_Н/T_V$: 0,81 – 0,9

ВЫВОДЫ

Данные радиометра MIRAS спутника SMOS:

1. $T_{Я}$ – очень чувствительна к изменениям состояния морского льда (таяние, замерзание, начальные формы льда, однолетний лед).
2. $T_{Я}$ – хорошо коррелирует со сплоченностью ледяного покрова.
3. T_{H}/T_{V} – хорошо коррелирует со сплоченностью ледяного покрова.
4. $T_{Я}$ и T_{H}/T_{V} – «видят» начальные формы льда.
5. MIRAS $\rightarrow$ AMSR2, SSMIS, МТВЗА-ГЯ $\rightarrow$ Алгоритм

Спасибо!
Thanks!