

АНАЛИЗ СОЛЕНОСТИ ВОДЫ ПОД ЛЕДЯНЫМ ПОКРОВОМ В ЕНИСЕЙСКОМ ЗАЛИВЕ ПО ДАННЫМ РАДИОМЕТРА MIRAS СПУТНИКА SMOS

*Тихонов В.В.^{1,2,3}, Романов А.Н.², Хвостов И.В.², Шарков Е.А.¹,
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

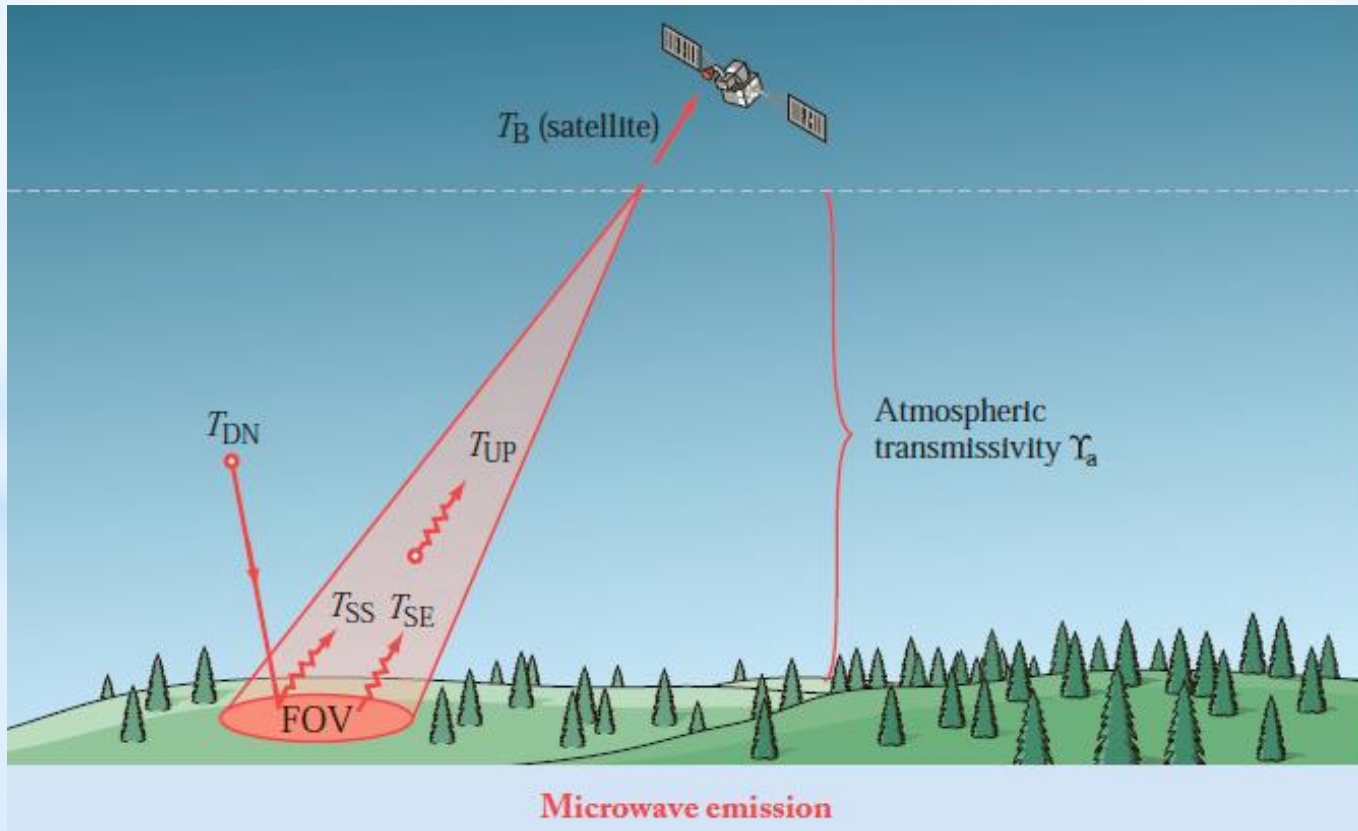


Микроволновая радиометрия

Микроволновый диапазон:

$$\lambda = 1 \text{ мм} - 1 \text{ м}; \quad \nu = 300 \text{ МГц} - 300 \text{ ГГц}$$

Радиометрия – набор методов измерения электромагнитного излучения испускаемого телами



Тепловое излучение - электромагнитные волны, испускаемые телами за счёт их внутренней энергии.

Микроволновая радиометрия

Микроволновый диапазон:

$$\lambda = 1 \text{ мм} - 1 \text{ м}; \quad \nu = 300 \text{ МГц} - 300 \text{ ГГц}$$

$$I_{\nu}^{\text{АЧТ}}(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \times \frac{1}{(e^{h\nu/kT} - 1)}; \quad I_{\lambda}^{\text{АЧТ}}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \times \frac{1}{(e^{[hc/\lambda kT]} - 1)}$$

приближение Рэллея-Джинса  $h\nu \ll kT$

$$I_{\nu}^{\text{АЧТ}}(T) = \frac{2\nu^2 kT}{c^2}; \quad I_{\lambda}^{\text{АЧТ}}(T) = \frac{2kT}{\lambda^2}$$

$$I_{\nu}(\vec{r}, p) = \chi I_{\nu}^{\text{АЧТ}}(T), \quad \chi < 1 \Rightarrow I_{\nu}(\vec{r}, p) = \frac{2\nu^2 k}{c^2} T_B(\vec{r}, p), \quad T_B(\vec{r}, p) = \chi T$$

Различие в пространственном
распределении интенсивности

$$\chi_p = f(\theta, \nu, \varepsilon) = 1 - R_p(\theta, \nu, \varepsilon), \quad p = H, V$$

коэффициент
излучения

$$\varepsilon = f(\nu, T, \text{состав, структура...})$$

Спутниковая микроволновая радиометрия

ДОСТОИНСТВА

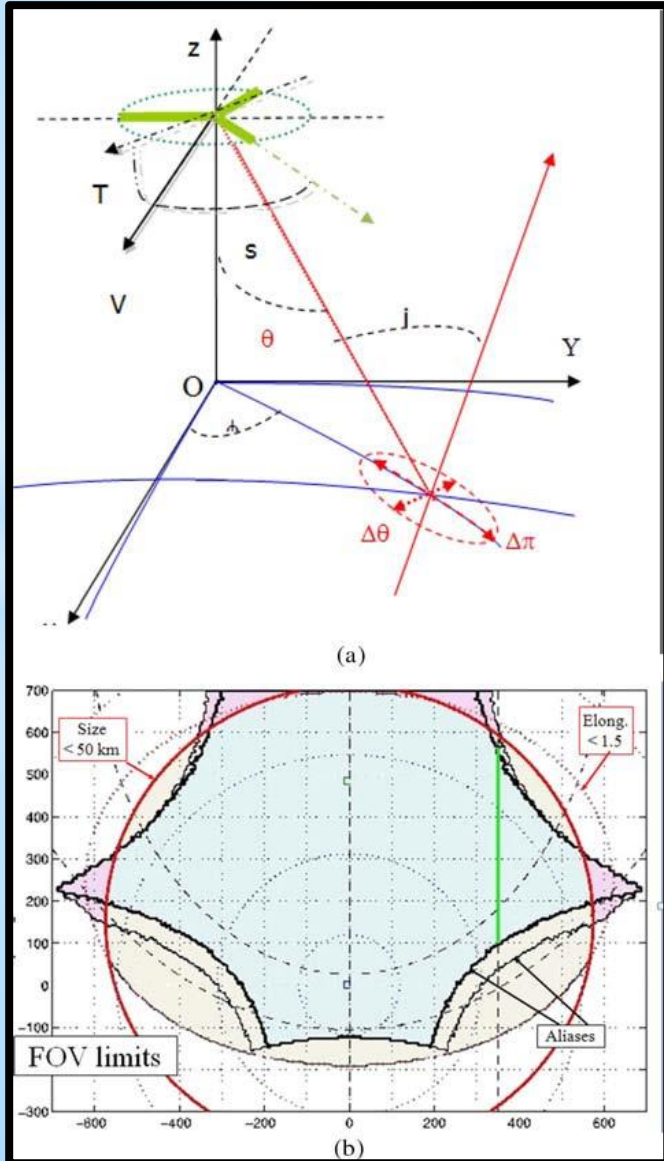
- Получение данных с обширных площадей.
- Большая частота наблюдений в высоких широтах.
- Независимость от солнечной освещённости и облачности.
- Чувствительность к подповерхностным процессам.
- Малое энергопотребление.

НЕДОСТАТКИ

- Низкое разрешение ~ 5 км (30 км).
- Сложная интерпретация данных.

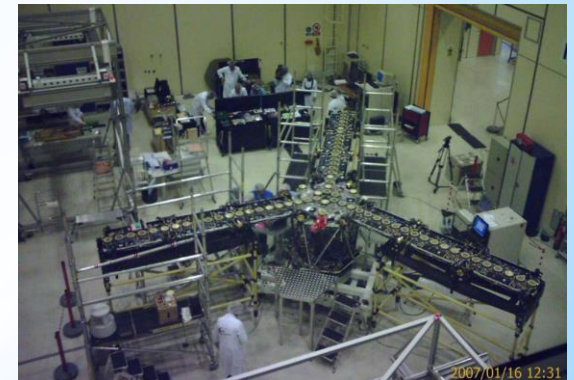
ДАНЫЕ

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



$$f = 1.4 (H, V) \text{ ГГц}$$

$$\theta = 10 \dots 60^\circ$$



ДАННЫЕ

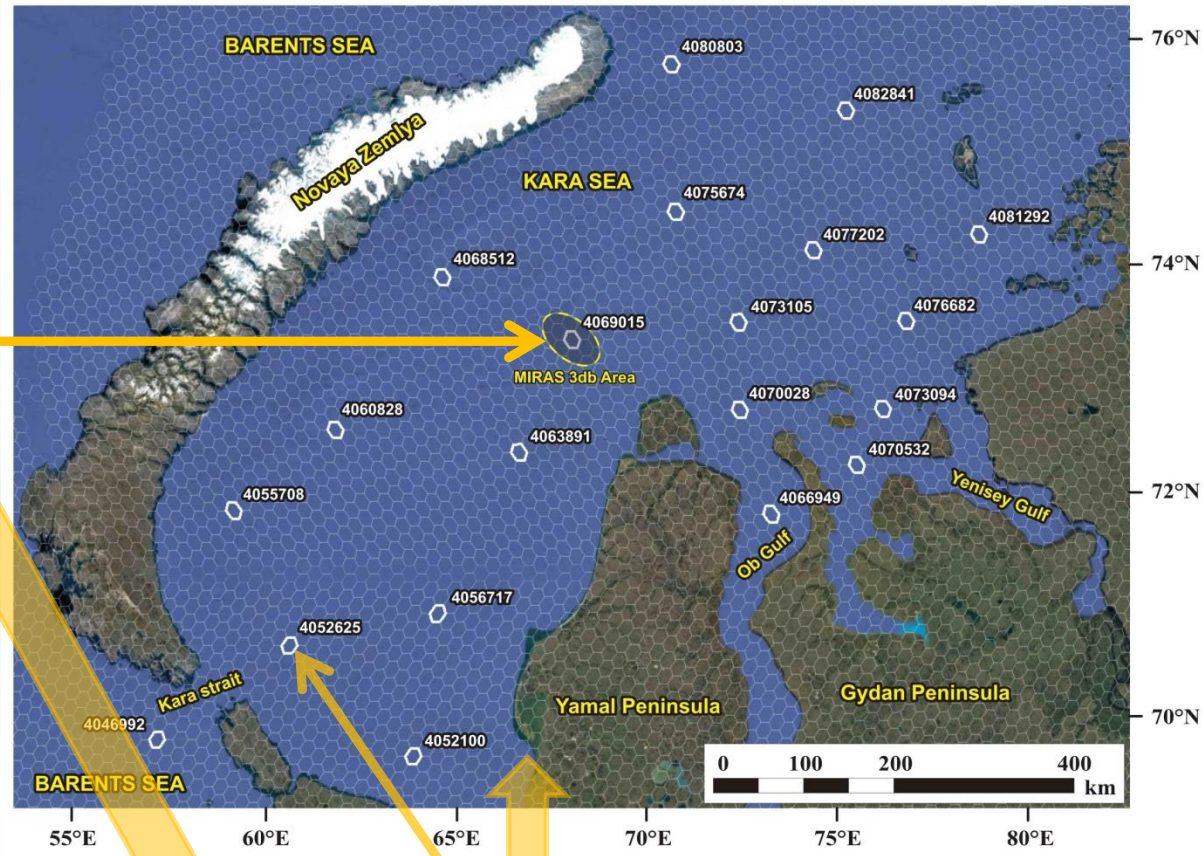
SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) – 2009 — наст. вр.
MIRAS (Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis)

Продукт SMOS L1C

$f = 1.4$ (H, V) ГГц
 $\theta = 42.5^\circ$

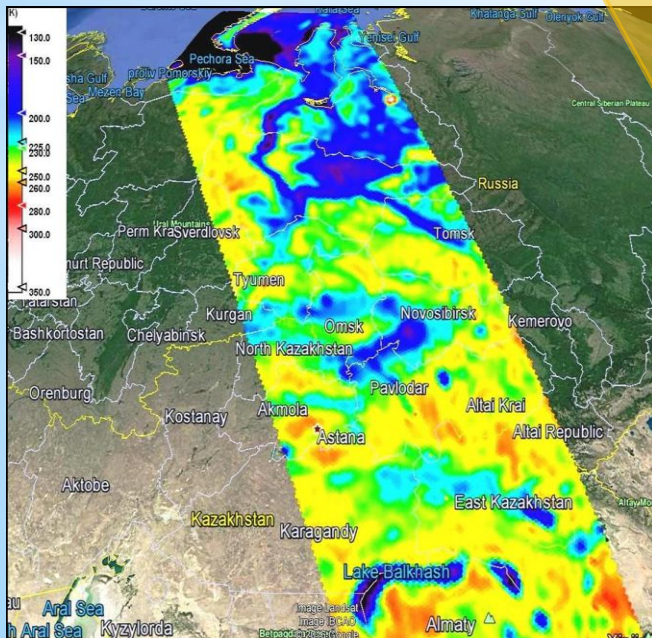
Пиксель

$S_{\Pi} = 1780 \text{ км}^2$ (3 дБ) ~ 9 яч.



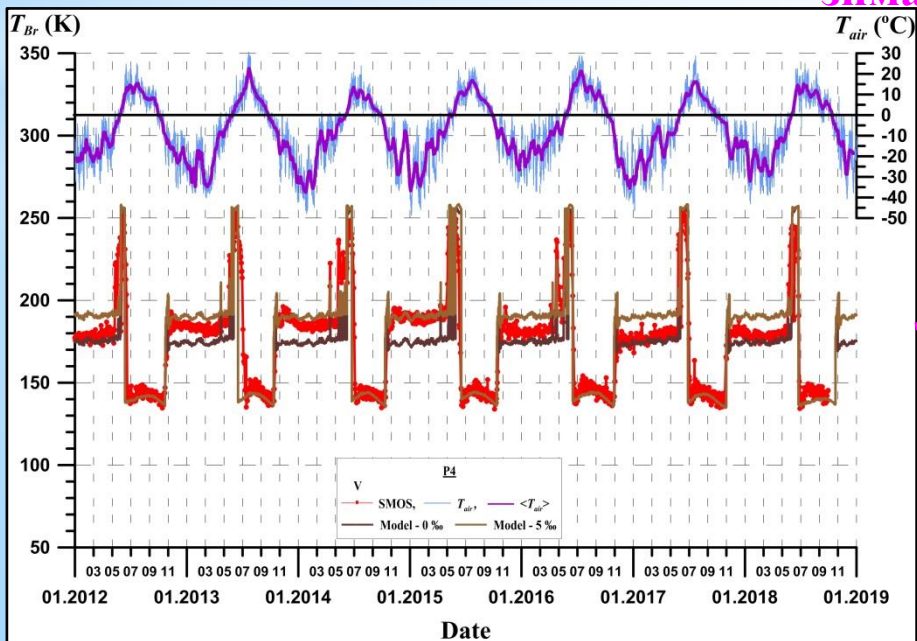
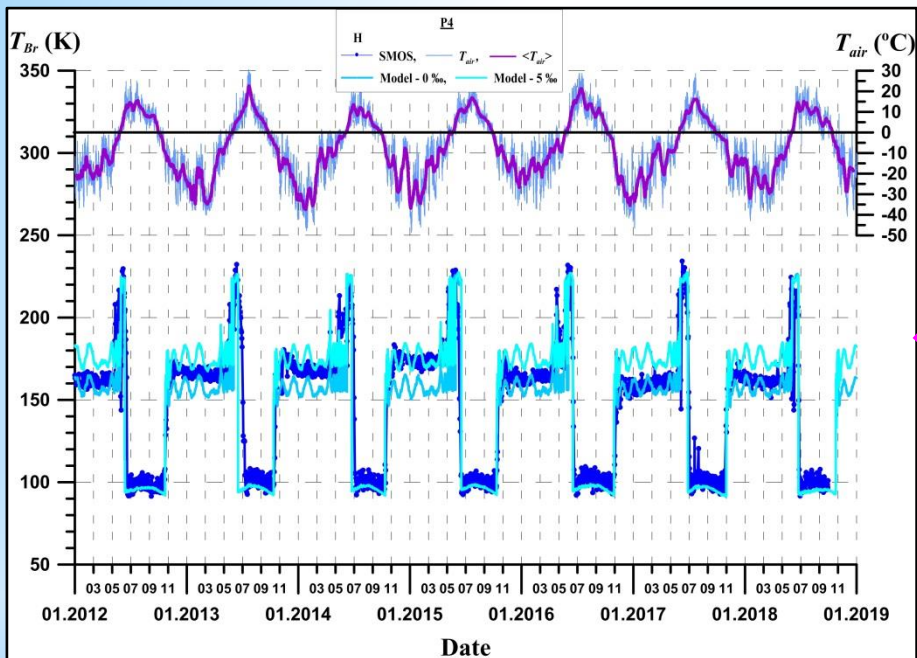
Дискретная геодезическая сетка DGG ISEA 4H9

$l_{\text{я}} = 16 \text{ км}, S_{\text{я}} = 195 \text{ км}^2$



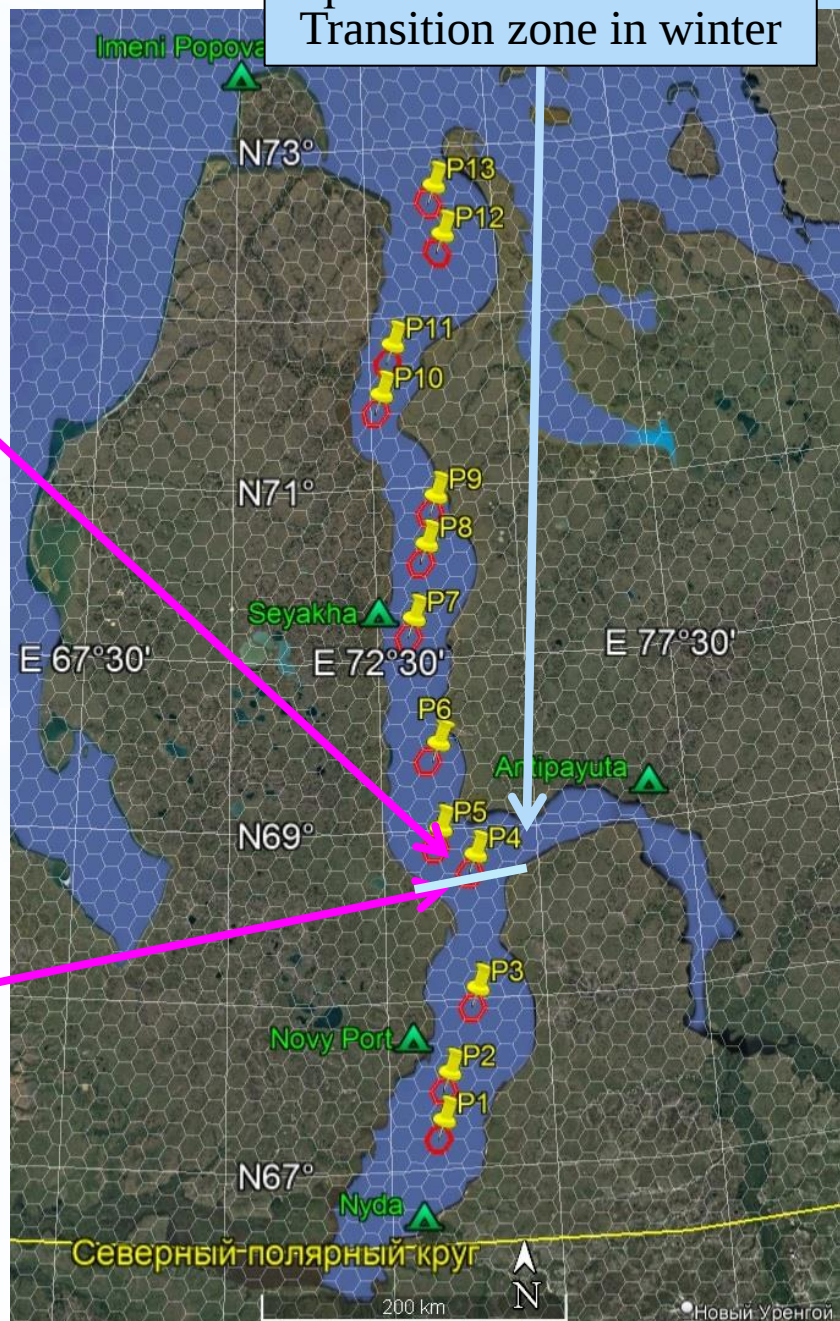
ОБСКАЯ ГУБА

Фронтальная зона зимой
Transition zone in winter

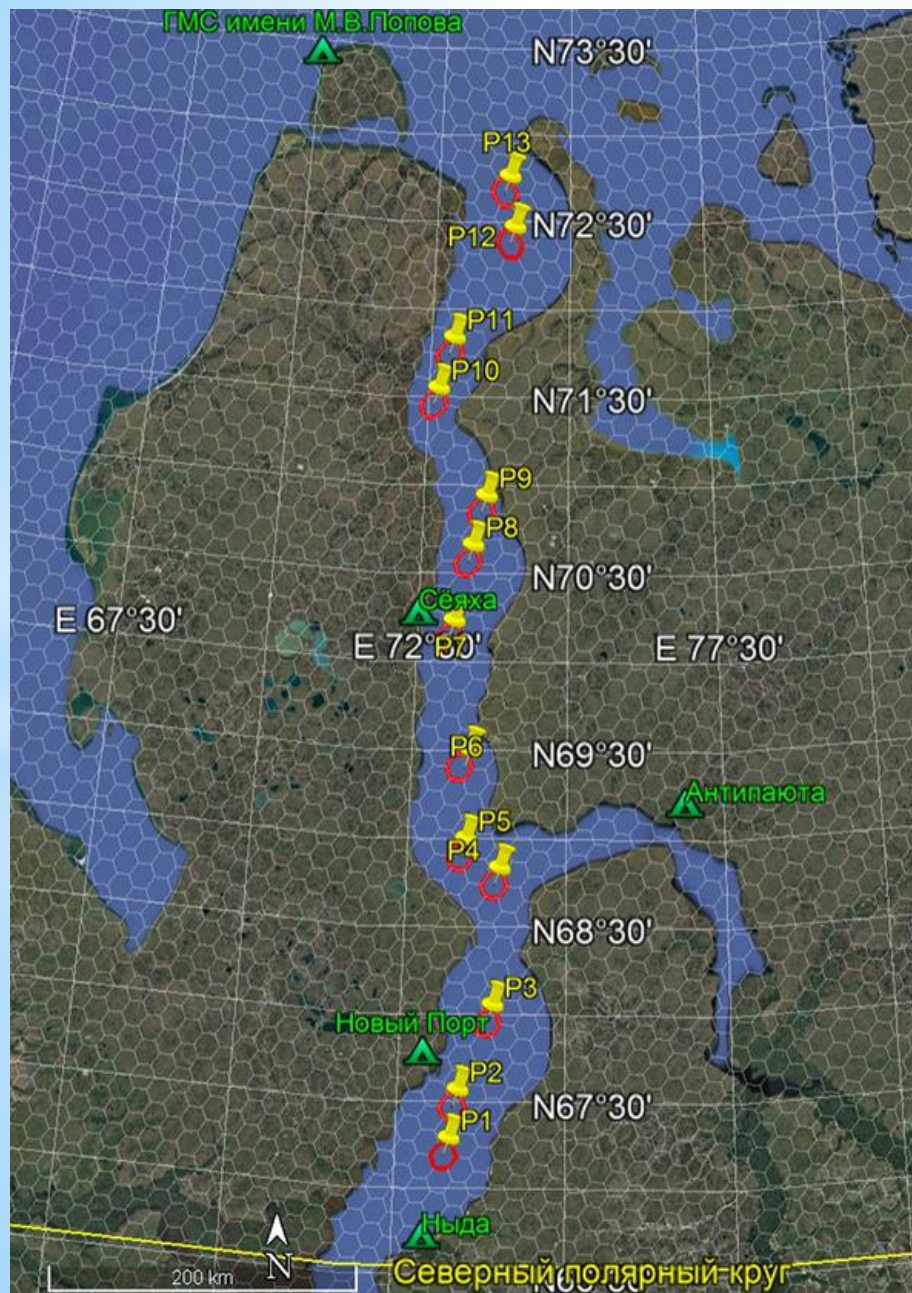


зима

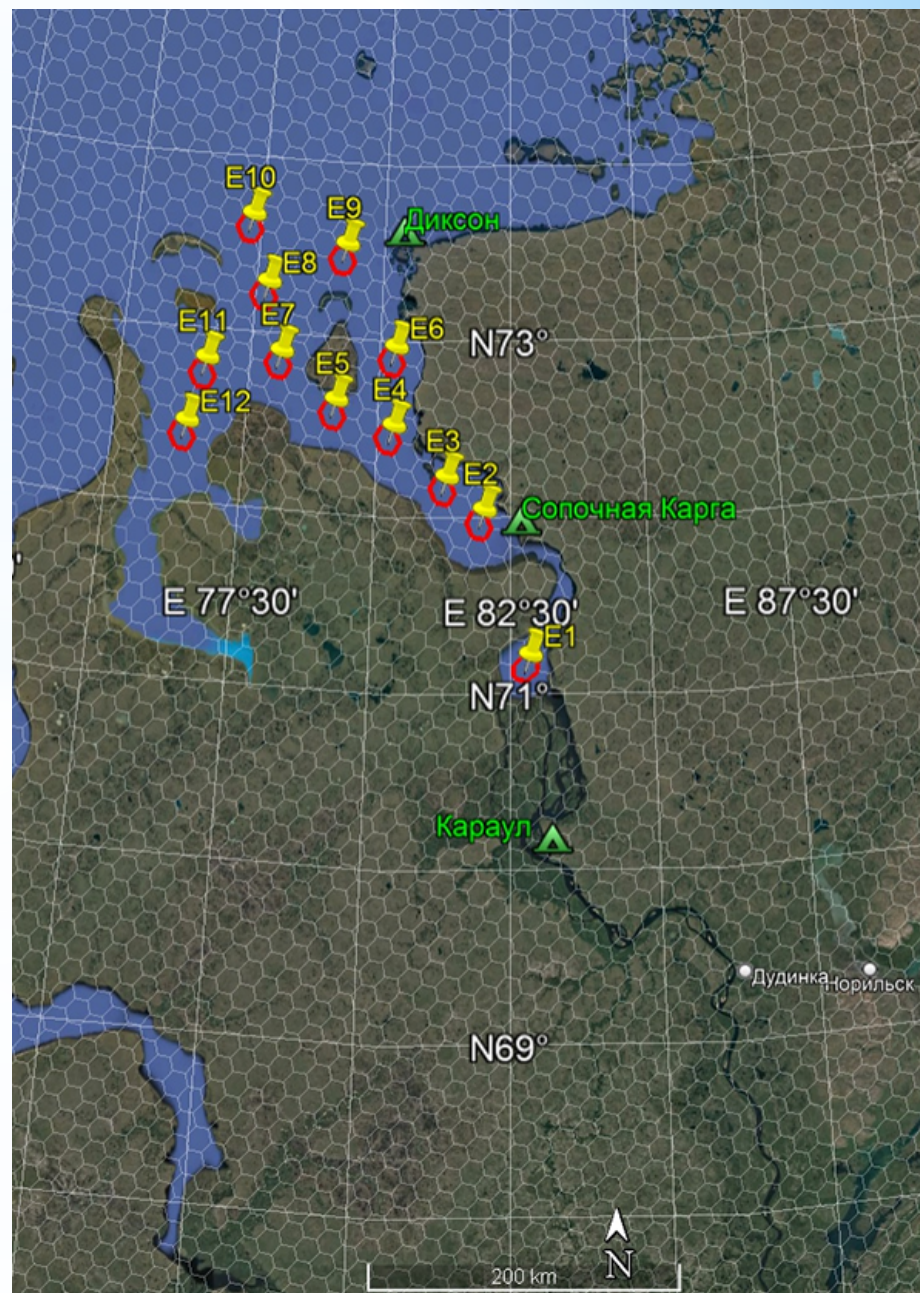
0 %
5 %



ОБСКАЯ ГУБА

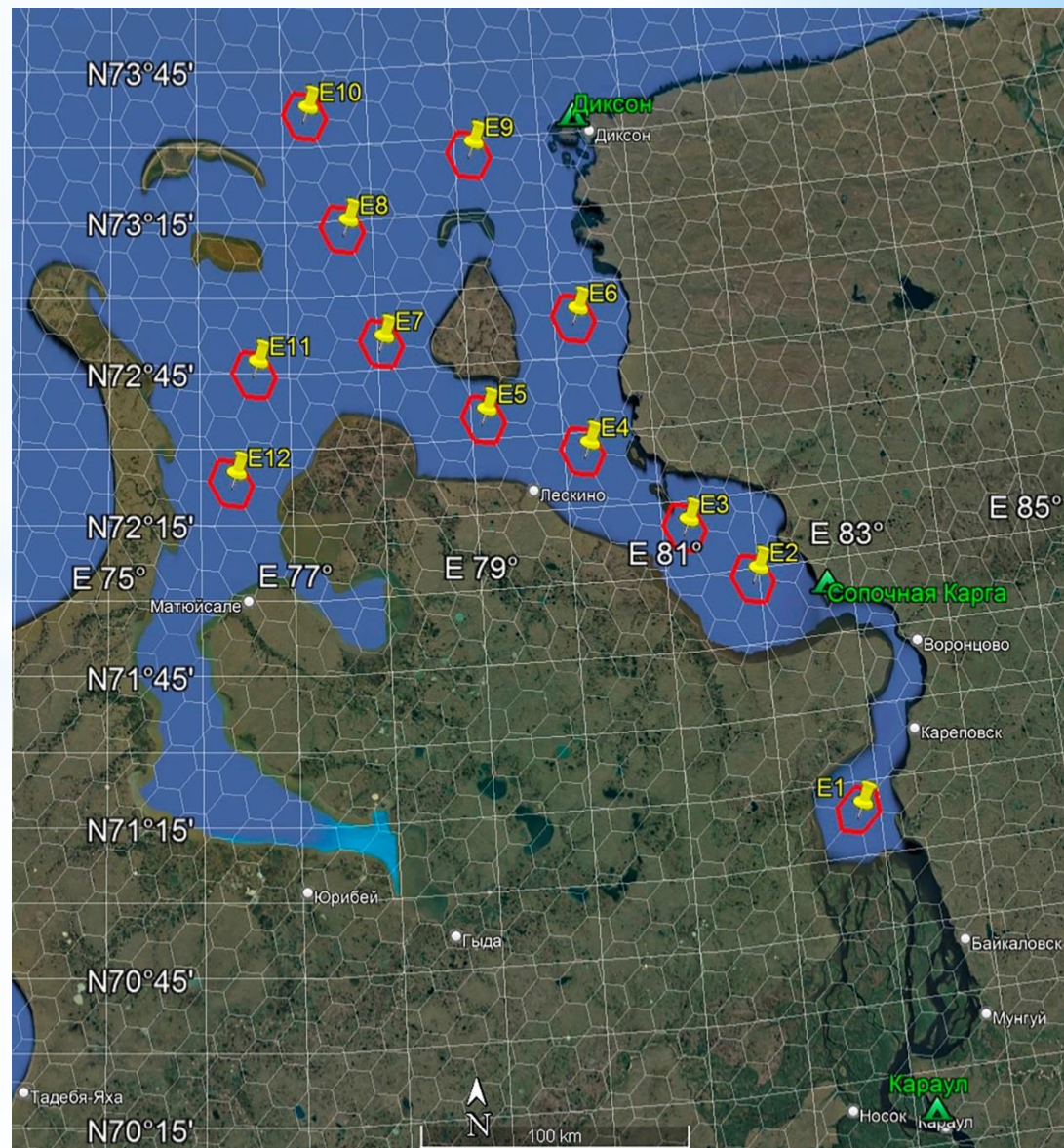


ЕНИСЕЙСКИЙ ЗАЛИВ



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

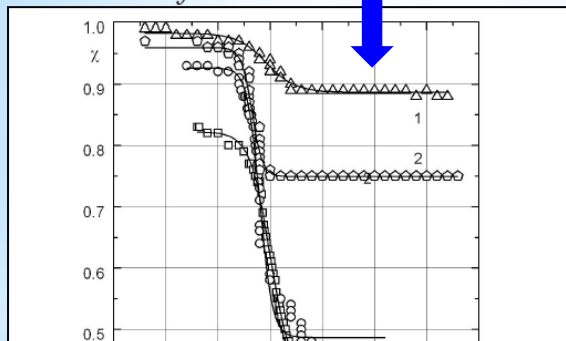


МОДЕЛЬ

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

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

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



Сезон	Излучательная способность, $\theta = 42.5^\circ$	
	v-поляризация	h-поляризация
Лето/осень	0.86	0.75
Зима	0.97	0.88
Весна	0.75	0.65
Оттепель	0.93	0.78

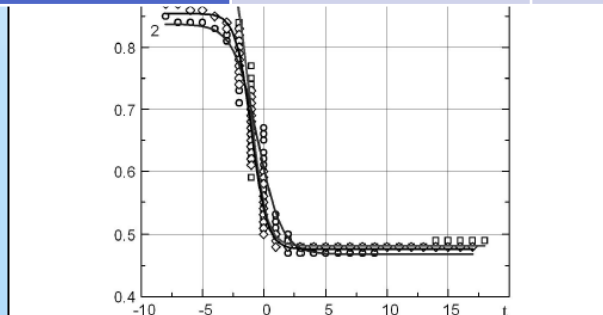
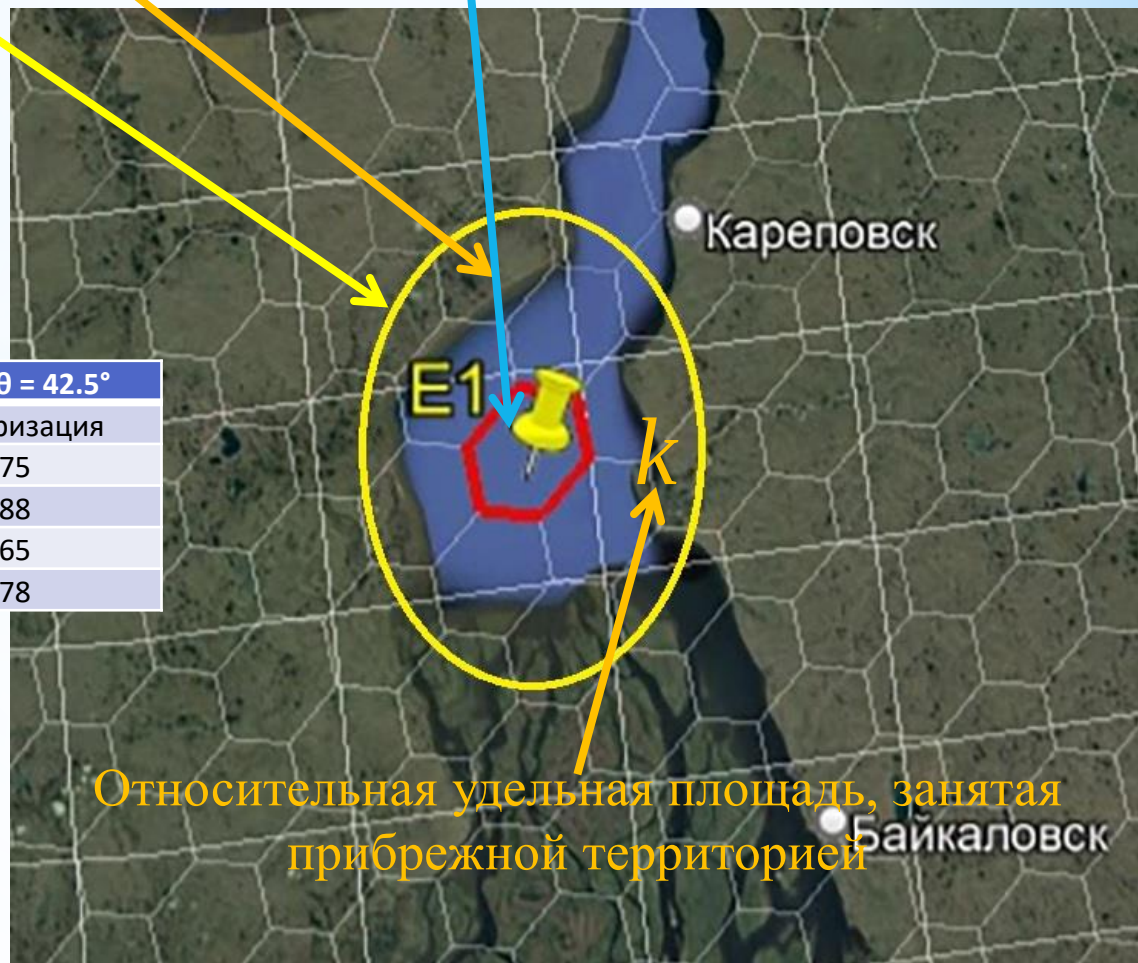


Рис. 1.6. Зависимости коэффициентов излучения мха от температуры на частотах 500 МГц (1), 1.11 ГГц (2) и 1.413 ГГц (3)



Относительная удельная площадь, занятая прибрежной территорией

МОДЕЛЬ

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

$$T_{\text{SurfCell}}^v = \sum_{j=1}^3 \frac{T_j |W_j|^2}{|1 - r_j^- r_j^+ \exp(2i\psi_j)|^2} \times [(1 - \exp(-2\text{Im}\psi_j)) (1 + |r_j^- \exp(i\psi_j)|^2) +$$

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

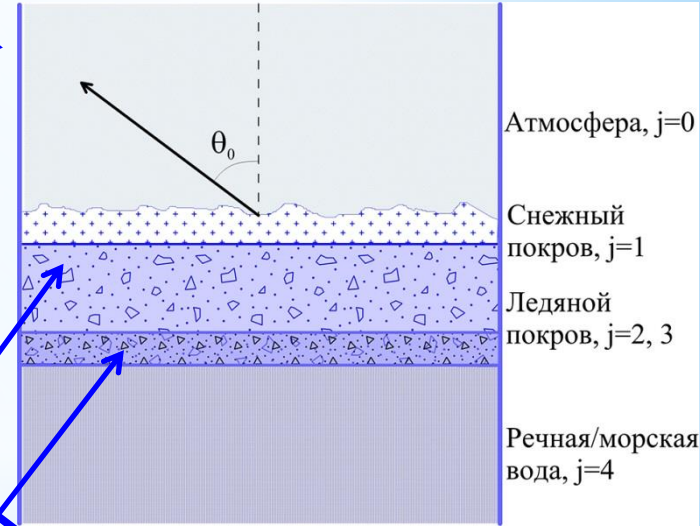
$$T_{\text{SurfCell}}^h = \sum_{j=1}^3 \frac{T_j |W_j|^2}{|1 - r_j^- r_j^+ \exp(2i\psi_j)|^2} \times [(1 - \exp(-2\text{Im}\psi_j)) (1 + |r_j^- \exp(i\psi_j)|^2) +$$

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

$$W_j = \prod_{m=1}^j \frac{Z_{m-1}^{in+} + Z_{m-1}}{Z_{m-1}^{in+} + Z_m} \exp(i\psi_{m-1}), \quad Z_j^{in+} = Z_j \frac{Z_{j-1}^{in+} - iZ_j \text{tg}\psi_j}{Z_j - iZ_{j-1}^{in+} \text{tg}\psi_j}, \quad Z_j^{in-} = Z_j \frac{Z_{j+1}^{in-} - iZ_j \text{tg}\psi_j}{Z_j - iZ_{j+1}^{in-} \text{tg}\psi_j}$$

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

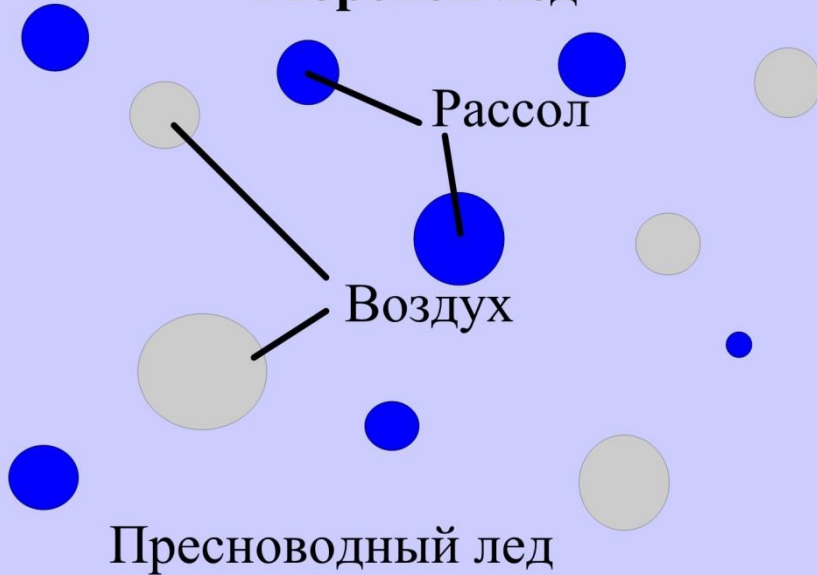
$$r_j^+ = \frac{Z_{j-1}^{in+} - Z_j}{Z_{j-1}^{in+} + Z_j}, \quad r_j^- = \frac{Z_{j+1}^{in-} - Z_j}{Z_{j+1}^{in-} + Z_j}, \quad Z_j = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_j} \cos \theta_j} & \text{— горизонтальная поляризация} \\ \frac{\cos \theta_j}{\sqrt{\varepsilon_j}} & \text{— вертикальная поляризация} \end{cases}$$



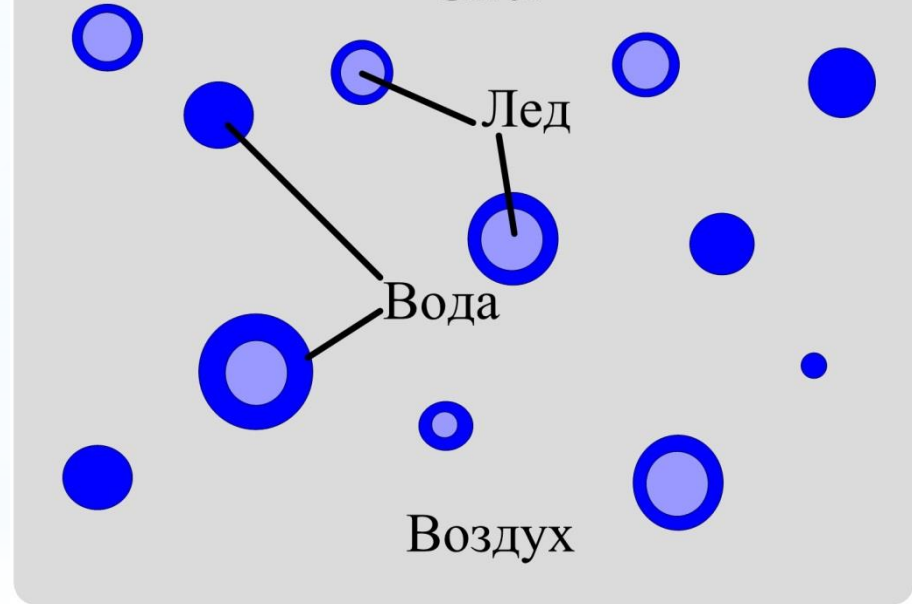
МОДЕЛЬ

ЭФФЕКТИВНАЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ

Морской лед



Снег

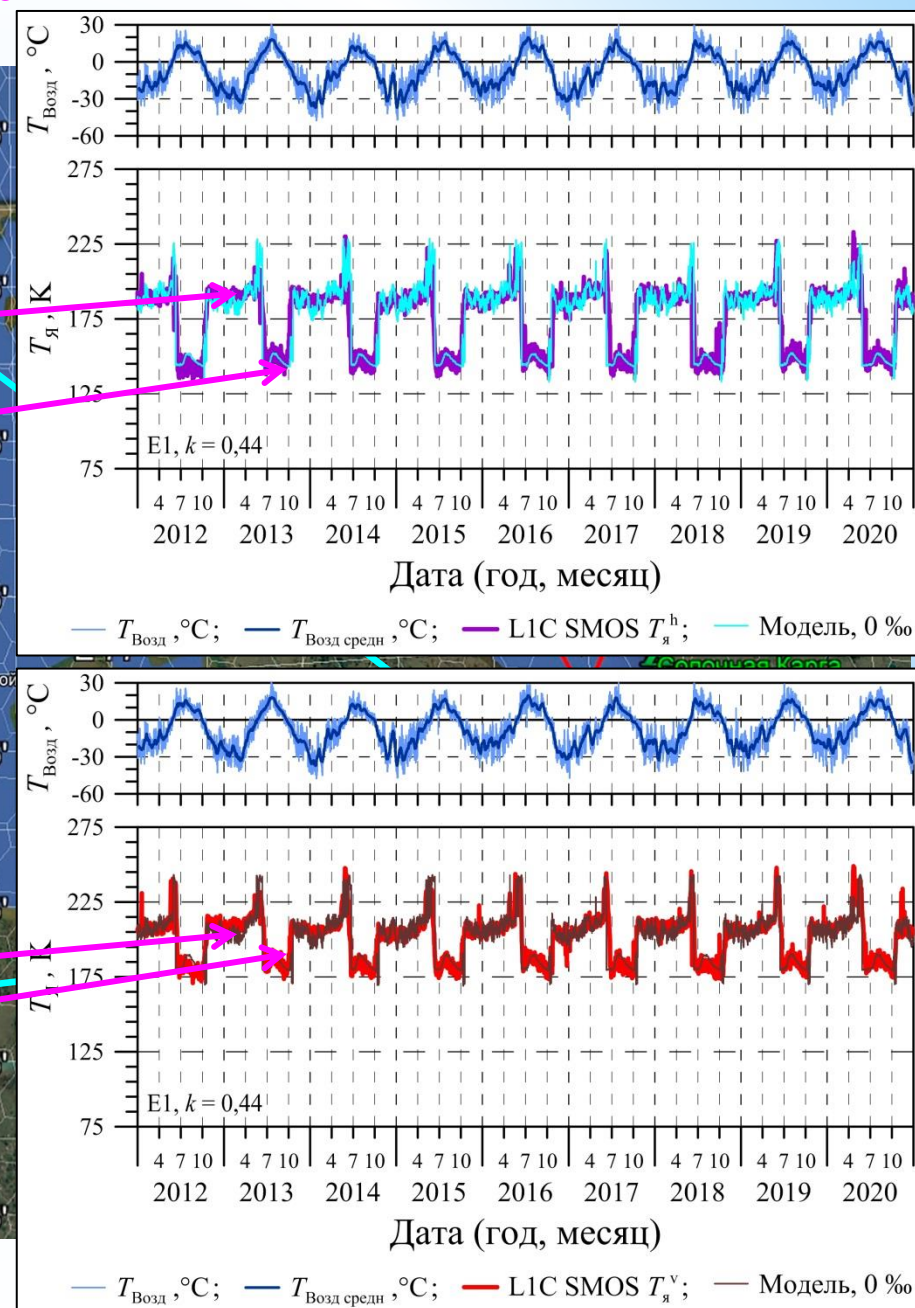


$$\varepsilon_{эфф}^{лед} = \varepsilon_{лед} \left[1 - \frac{4\pi n_{возд} (\varepsilon_{возд} + 2\varepsilon_{лед}) \frac{\langle f_{\omega} \rangle_{возд}}{k^2}}{2\varepsilon_{эфф} + \varepsilon_{возд}} - \frac{4\pi n_{жидк} (\varepsilon_{жидк} + 2\varepsilon_{лед}) \frac{\langle f_{\omega} \rangle_{жидк}}{k^2}}{2\varepsilon_{эфф}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

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

Суша – 44%

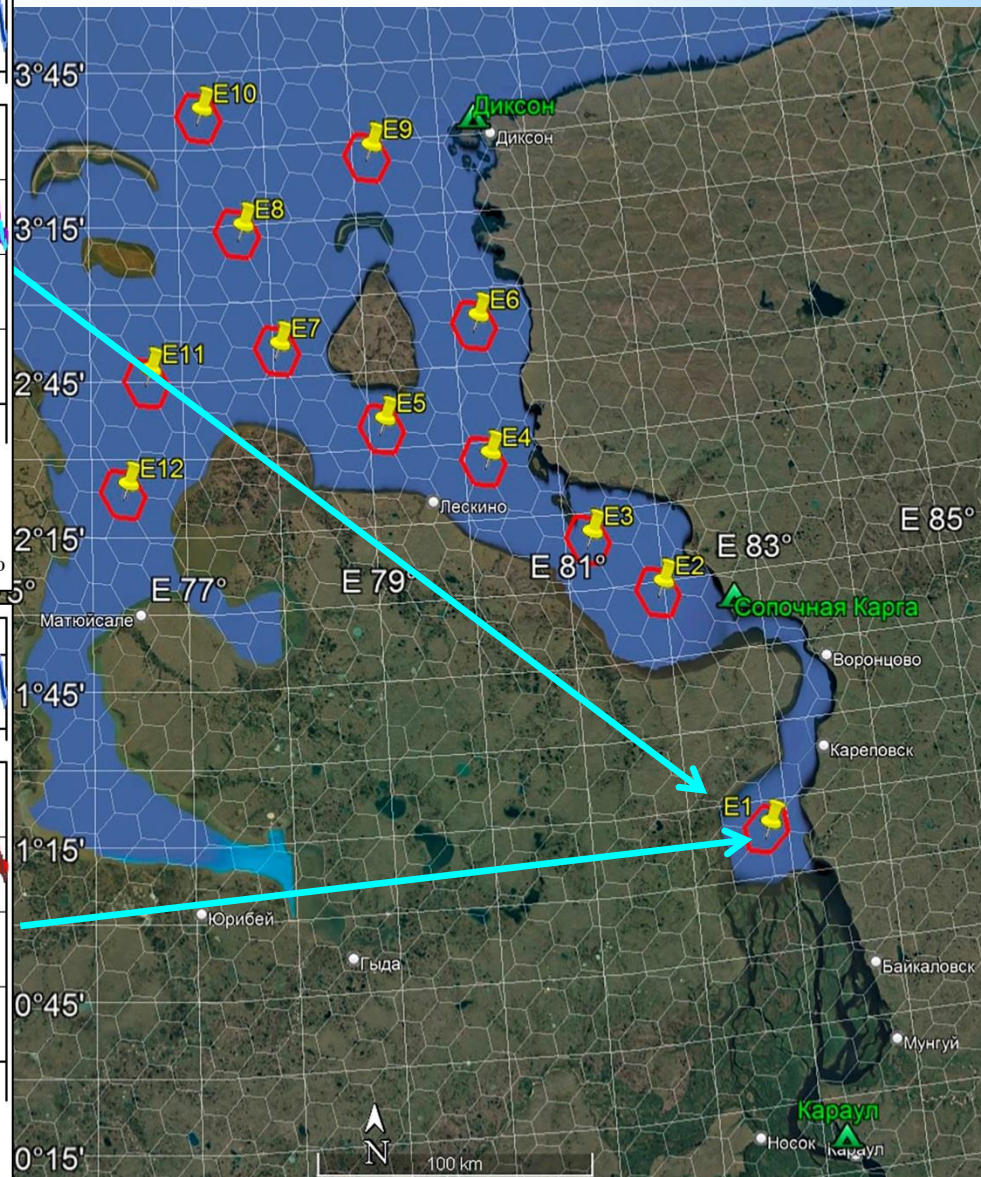
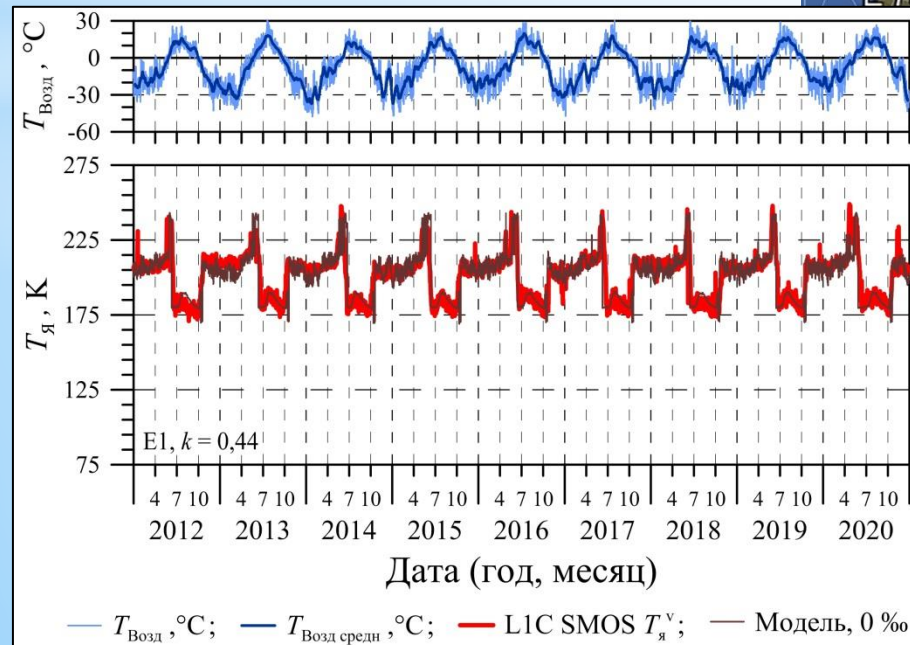
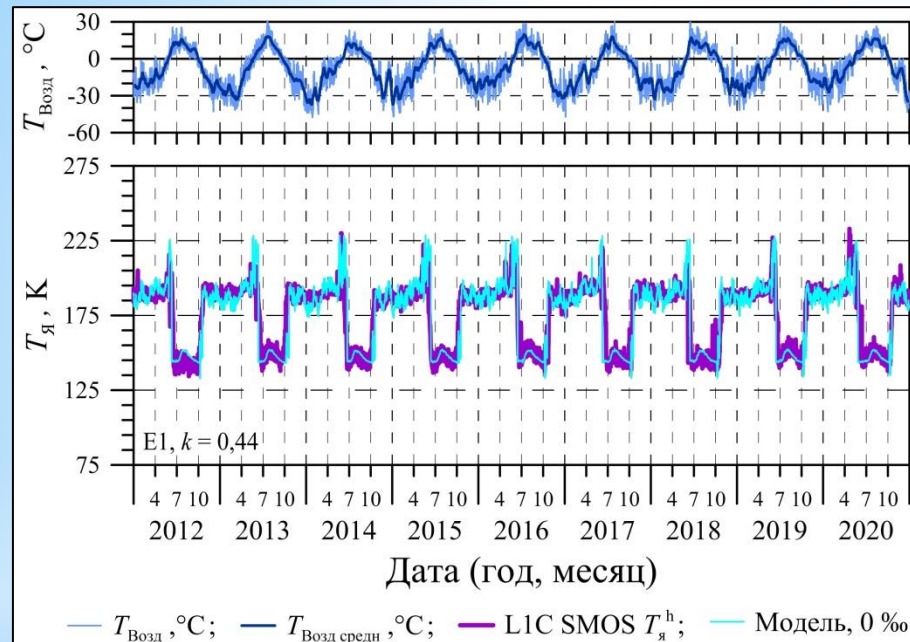
Суша – 44%



ЕНИСЕЙСКИЙ ЗАЛИВ

Суша – 44%

Зима - 0 %



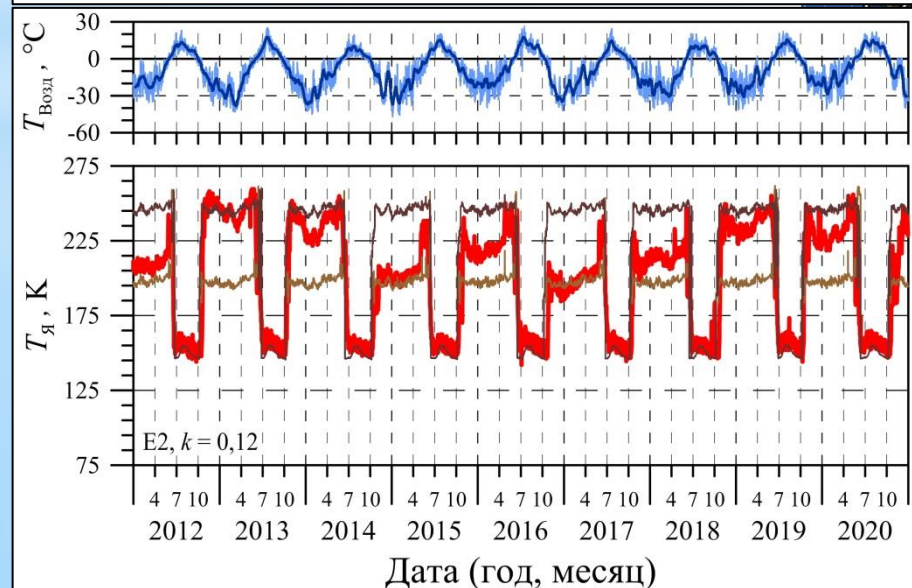
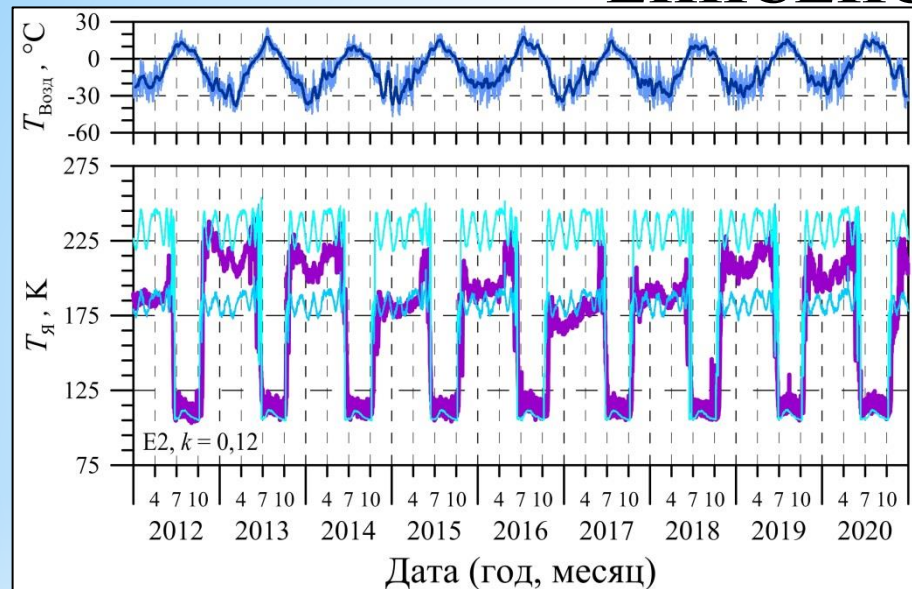
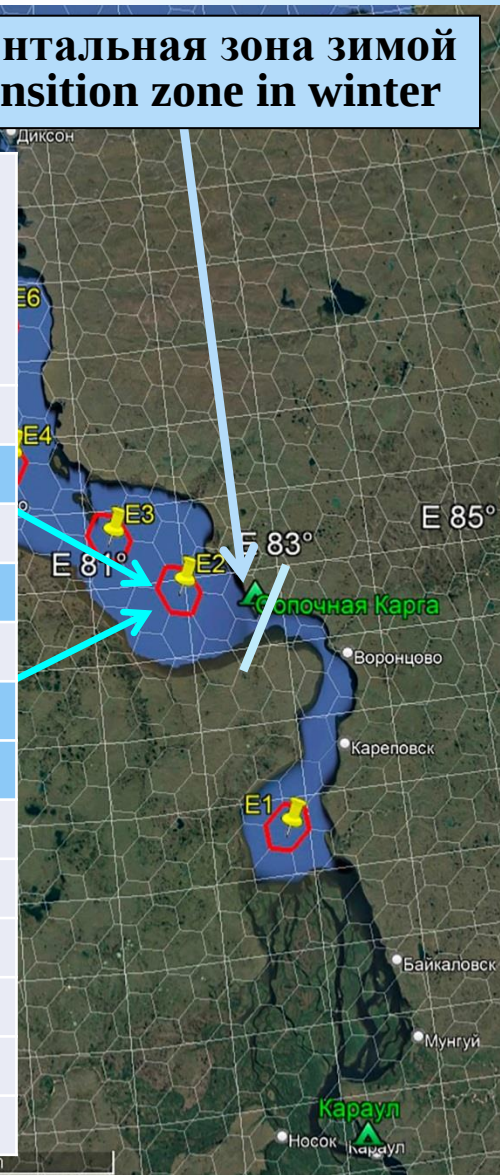
ЕНИСЕЙСКИЙ ЗАЛИВ

Суша – 10%

Зима – 5-15 %

Фронтальная зона зимой
Transition zone in winter

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

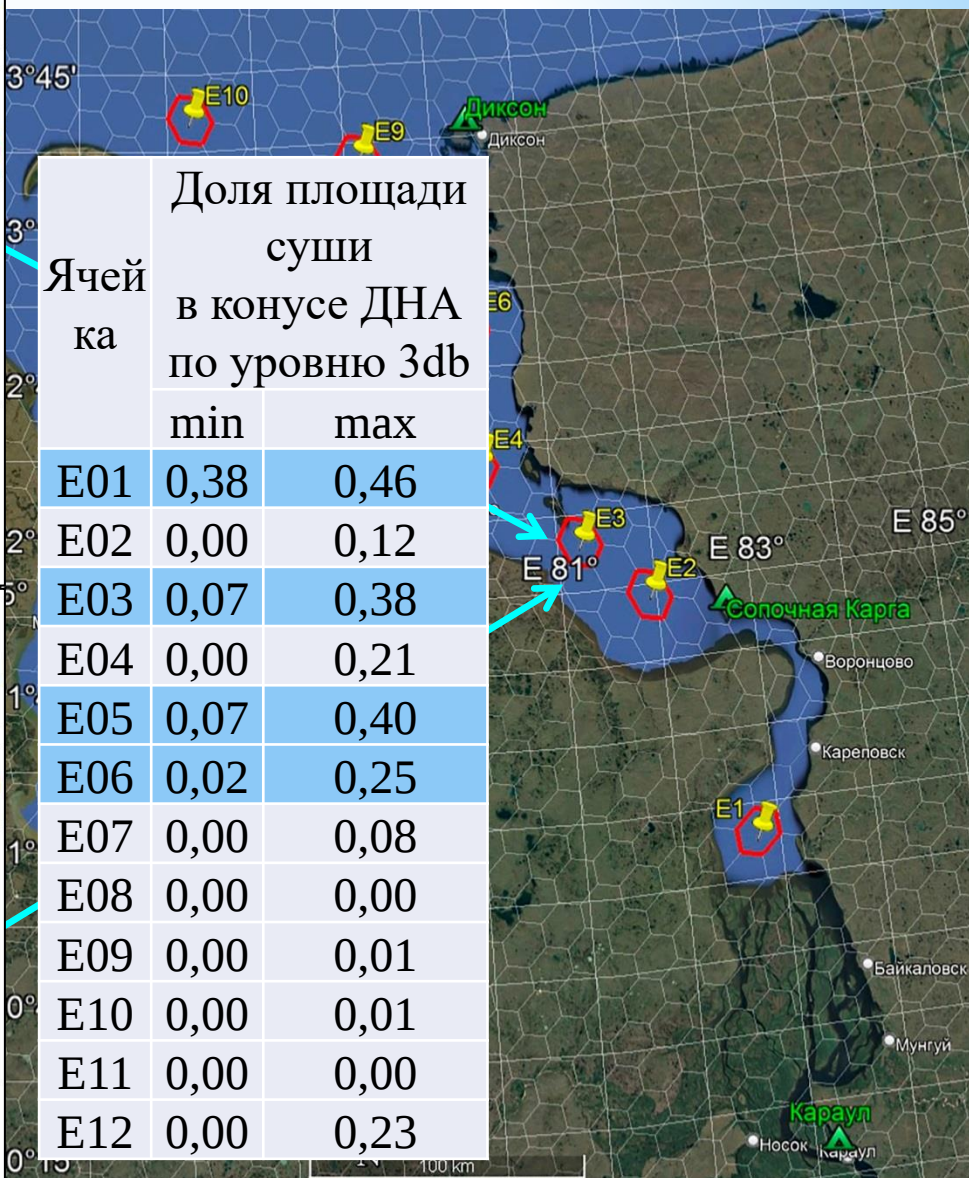
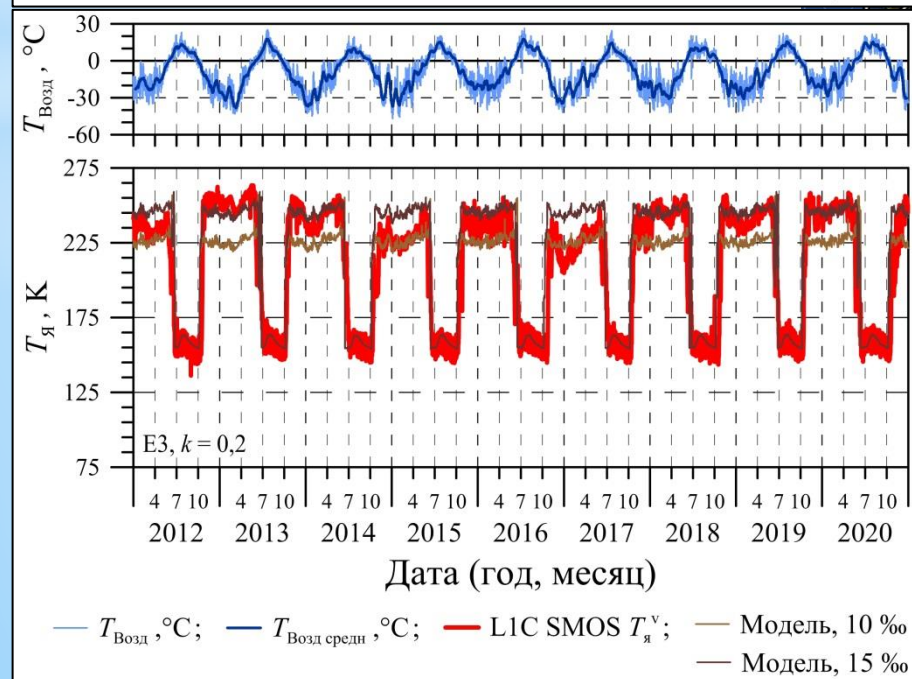
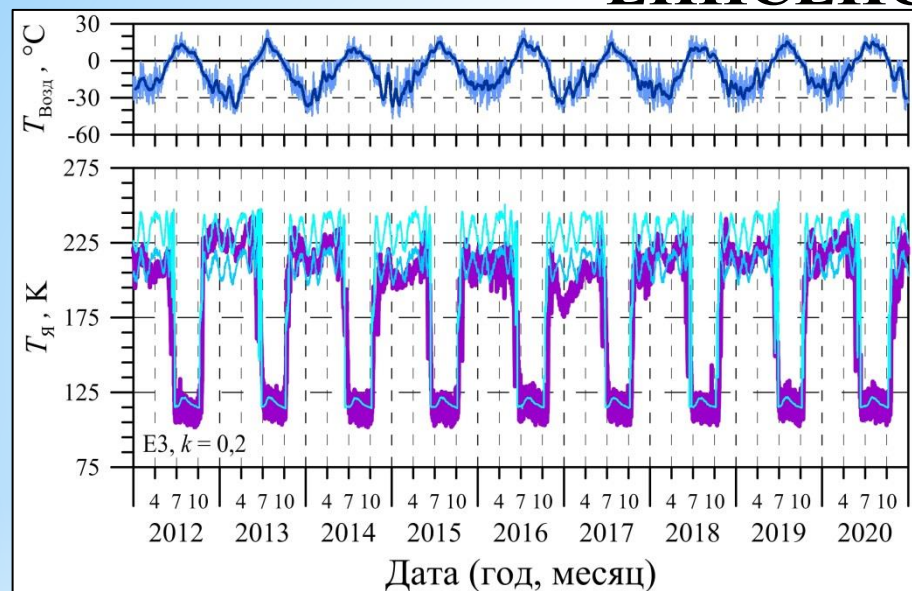


— $T_{\text{Возд}}, ^\circ\text{C}$; — $T_{\text{Возд средн}}, ^\circ\text{C}$; — LIC SMOS $T_{\text{я}}^v$; — Модель, 5 %
— Модель, 15 %

ЕНИСЕЙСКИЙ ЗАЛИВ

Суша – 20%

Зима – 10-15 %

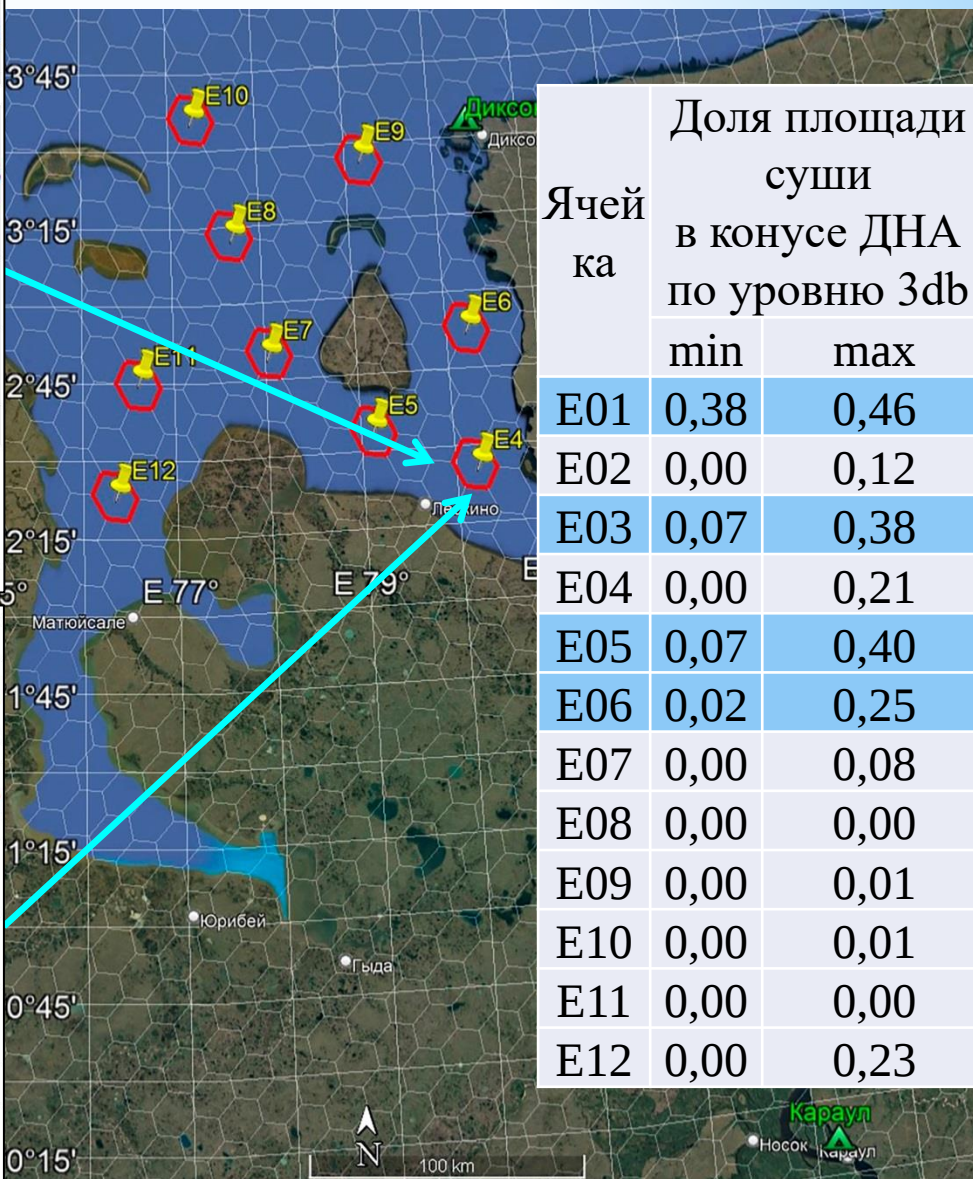
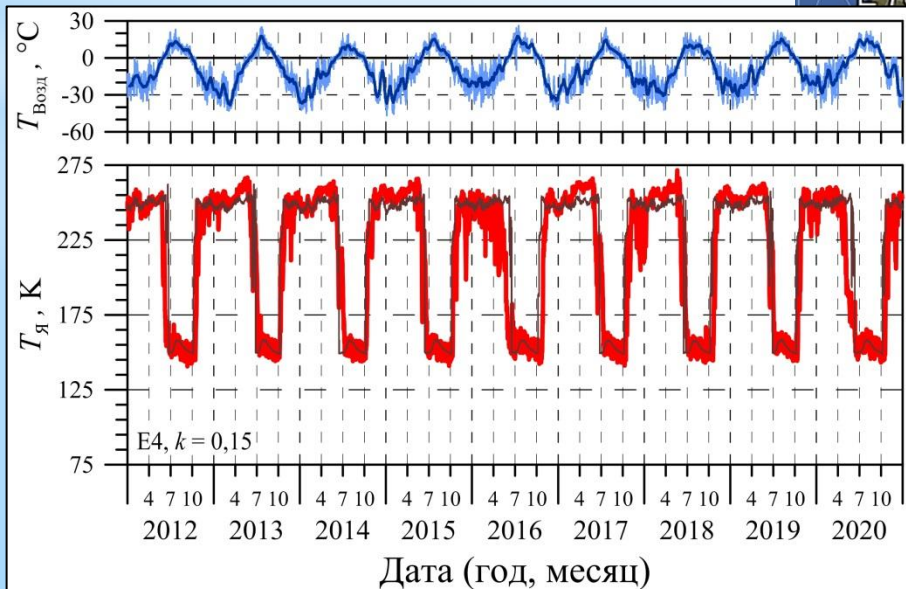
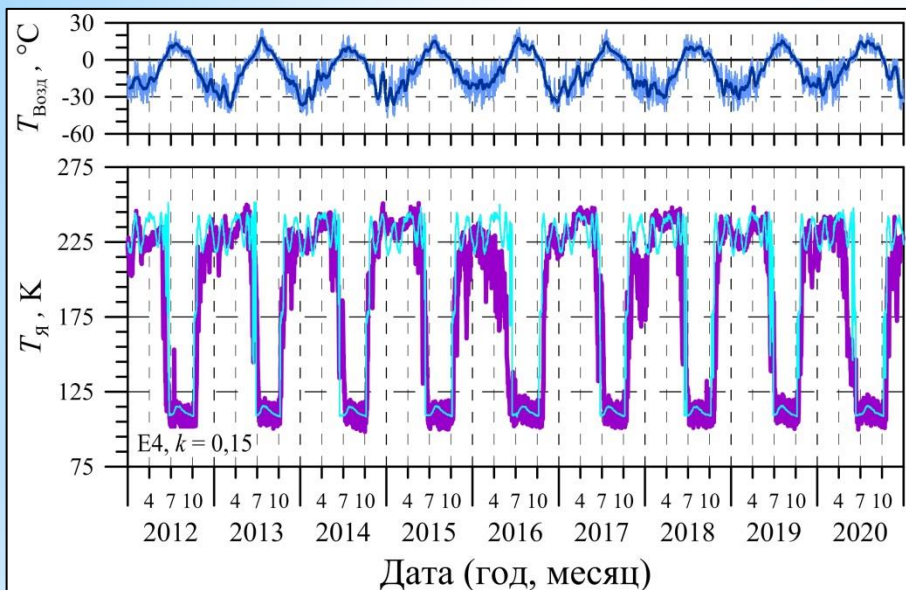


Ячейка	Доля площади суши в конусе ДНА по уровню 3db	
	min	max
E01	0,38	0,46
E02	0,00	0,12
E03	0,07	0,38
E04	0,00	0,21
E05	0,07	0,40
E06	0,02	0,25
E07	0,00	0,08
E08	0,00	0,00
E09	0,00	0,01
E10	0,00	0,01
E11	0,00	0,00
E12	0,00	0,23

ЕНИСЕЙСКИЙ ЗАЛИВ

Суша – 15%

Зима – 25%

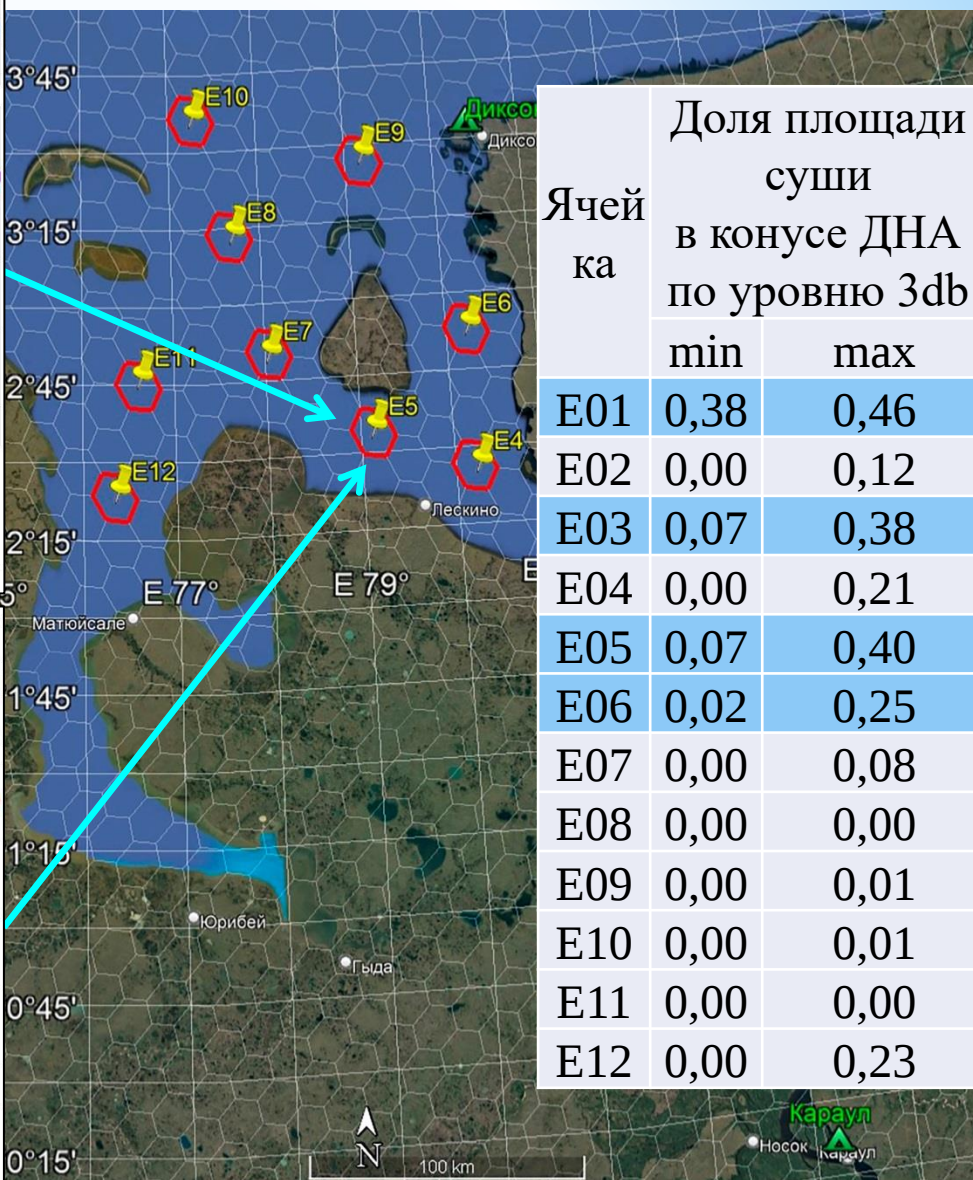
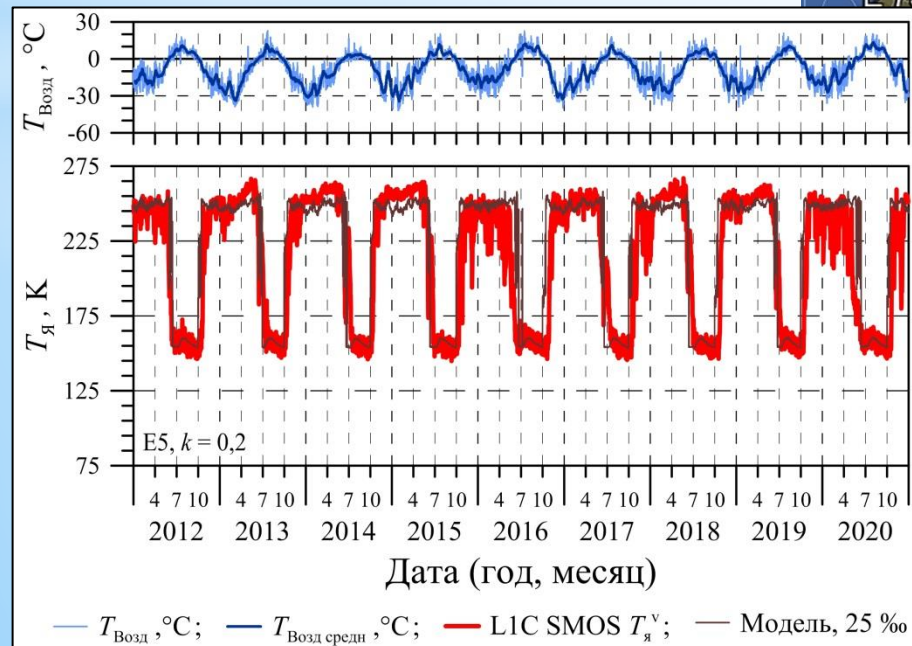
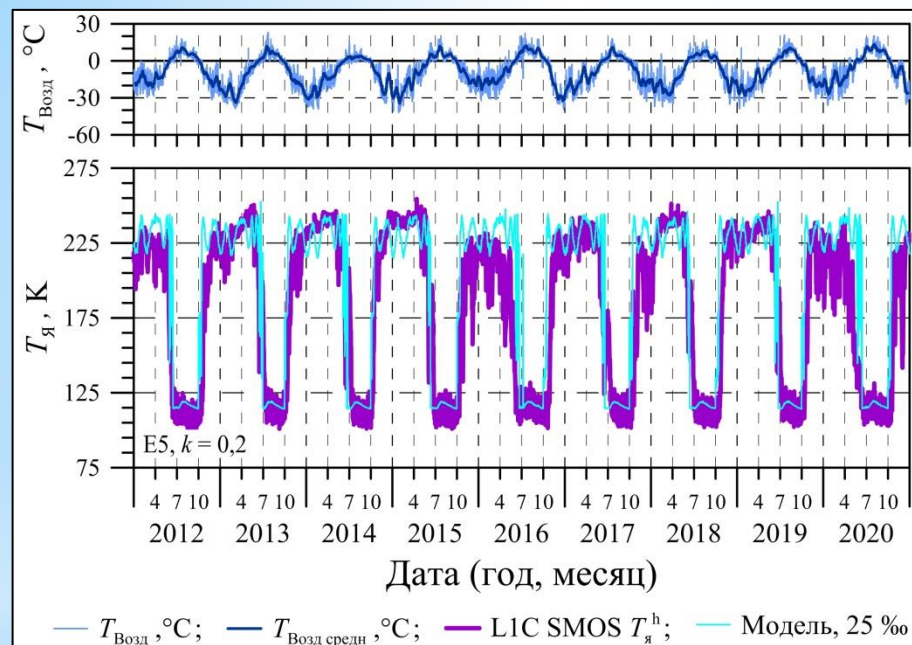


Ячейка	Доля площади суши в конусе ДНА по уровню 3db	
	min	max
E01	0,38	0,46
E02	0,00	0,12
E03	0,07	0,38
E04	0,00	0,21
E05	0,07	0,40
E06	0,02	0,25
E07	0,00	0,08
E08	0,00	0,00
E09	0,00	0,01
E10	0,00	0,01
E11	0,00	0,00
E12	0,00	0,23

ЕНИСЕЙСКИЙ ЗАЛИВ

Суша – 20%

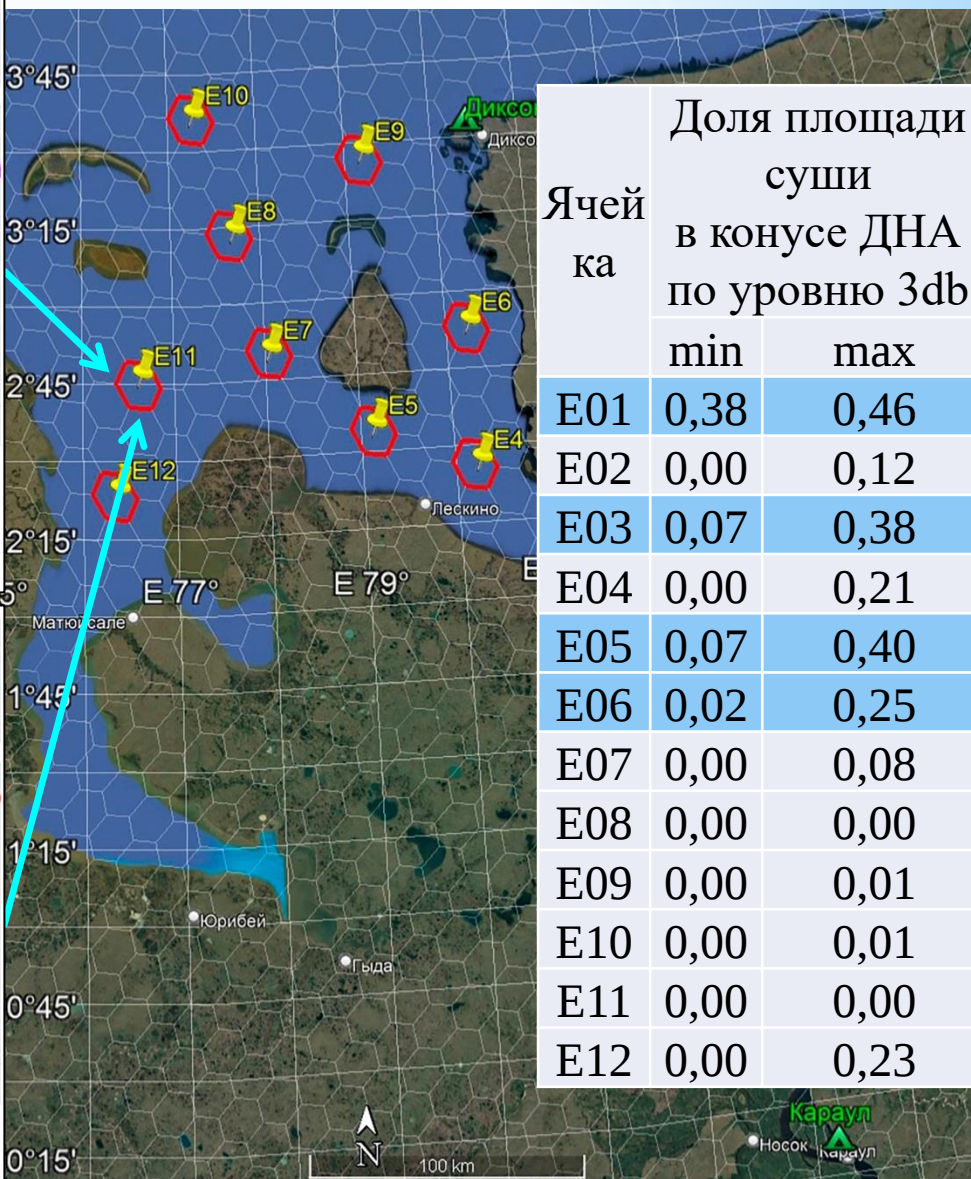
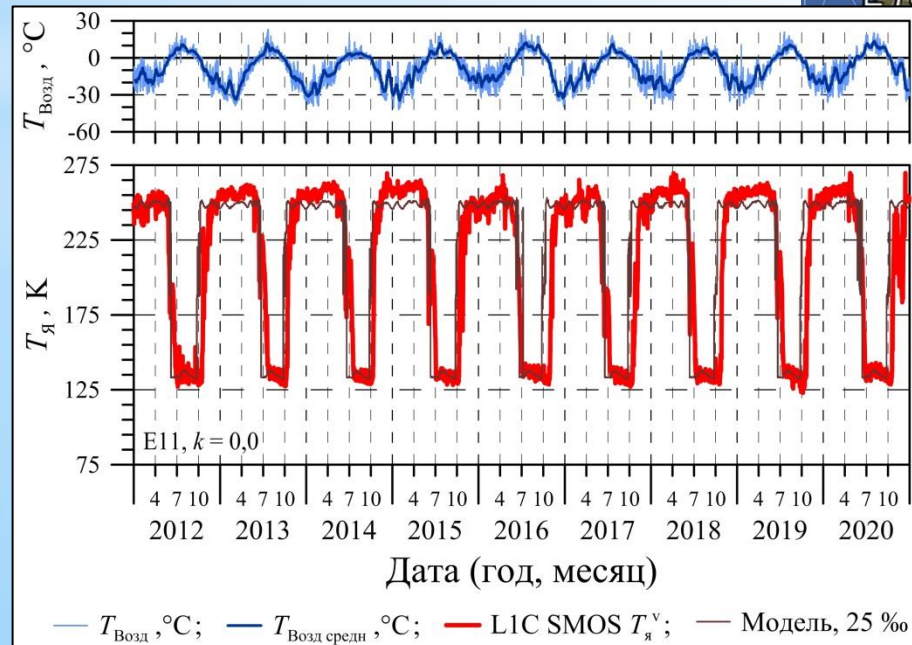
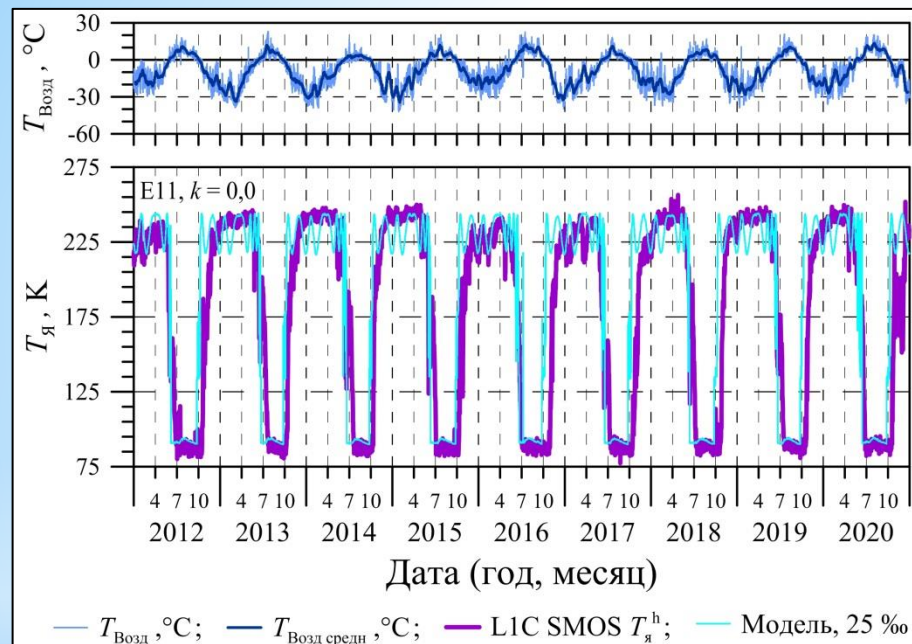
Зима – 25 %



ЕНИСЕЙСКИЙ ЗАЛИВ

Суша – 0%

Зима – 25 %



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

ВЫВОДЫ

Данные радиометра MIRAS (1.4 ГГц) спутника SMOS могут быть использованы для анализа и оценки солености воды под ледяным покровом (до 15 ‰), и движения фронтальной зоны подо льдом в крупных заливах и эстуариях.

Публикации:

1. Хвостов И.В., Романов А.Н., Тихонов В.В., Шарков Е.А. Некоторые особенности микроволнового радиотеплового излучения пресноводных водоемов с ледовым покровом // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т.14. № 4. С. 149-154.
2. Тихонов В.В., Хвостов И. В., Романов А. Н., Шарков Е. А. Анализ изменений ледяного покрова пресноводных водоемов по данным SMOS // Исследование Земли из космоса. 2017. № 6. С. 46-53.
3. Тихонов В. В., Хвостов 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 ледостава // Исследование Земли из космоса. 2020. № 3. С. 59-76.
4. Тихонов В.В., Хвостов И.В., Романов А.Н., Алексеева Т.А., Синицкий А. И., Тихонова М. В., Шарков Е. А., Комарова Н. Ю. Межгодовые вариации собственного микроволнового излучения Обской губы в период ледостава и их связь с гидрологическими и климатическими изменениями региона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. С. 185-199.
5. Романов А.Н., Хвостов И.В., Тихонов В.В., Шарков Е. А. Оценка гидрологических изменений водно-болотных угодий российской Арктики, Субарктики и северной тайги по данным микроволнового дистанционного зондирования // Исследование Земли из космоса. 2022. № 4. С. 12-24.
6. Тихонов В. В., Хвостов И. В., Алексеева Т. А., Романов А. Н., Афанасьева Е. В., Соколова Ю. В., Шарков Е. А., Боярский Д. А., Комарова Н. Ю. Анализ гидрологического режима устьевых областей Енисея, Печоры и Хатанги в зимний период по данным спутника SMOS // Исследование Земли из космоса. 2022. № 6. С 1-17.
7. Романов А. Н., Хвостов И. В., Рябинин И. В., Тихонов В. В., Шадуйко О. М. Связь сезонных вариаций радиоярких температур акватории Карского моря с гидролого-климатическими изменениями в Арктике // Известия вузов. Физика. 2023. № 4. С. 34-47.
8. 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. 17-30.

Публикации:

1. 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 // Progress In Electromagnetics Research B, 2014, Vol. 59, pp.123 –133.
2. Tikhonov V.V., Khvostov I.V., Romanov A.N., Sharkov E.A. Analysis of changes in the ice cover of freshwater lakes by SMOS data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2018, Vol. 54, No. 9, pp.1135-1140.
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, pp. 2727-2740.
4. Tikhonov V.V., Khvostov I.V., Romanov A.N., Sharkov E.A., Boyarskii D.A., Komarova N.Yu., Sinitskiy A.I. Features of the Intrinsic L-Band Radiation of the Gulf of Ob during the Freeze-Up Period // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2020, Vol. 56, No. 9, pp. 936-949.
5. Tikhonov V. V., Romanov A. N., Khvostov I. V., Alekseeva T. A., Sinitskiy A. I., Tikhonova M. V., Sharkov E. A., Komarova N. Yu. Analysis of the hydrological regime of the Gulf of Ob in the freezing period using SMOS data // Российская Арктика (Russian Arctic). 2022. № 2 (17). P. 44-71.
6. Romanov A.N., Khvostov I.V., Tikhonov V.V., Sharkov E.A. Assessing Hydrological Changes in Wetland Areas of the Russian Arctic, Subarctic, and Northern Taiga Based on Microwave Remote Sensing Data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2022. Vol. 58. No. 9. P. 1100–1110.
7. Tikhonov V. V., Khvostov I.V., Alekseeva T. A., Romanov A.N., Afanasyeva E. V., Sokolova J. V., Sharkov E.A., Boyarskii D. A., Komarova N. Yu. Analysis of the Winter Hydrological Regime of the Yenisei, Pechora, and Khatanga Estuaries Using SMOS Data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2022. Vol. 58. No. 12. P. 1519–1531.

Спасибо!

Thanks!

