

# 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.<sup>1,2</sup>, Хвостов И.В.<sup>2</sup>, Романов А.Н.<sup>2</sup>, Шарков Е.А.<sup>1</sup>*

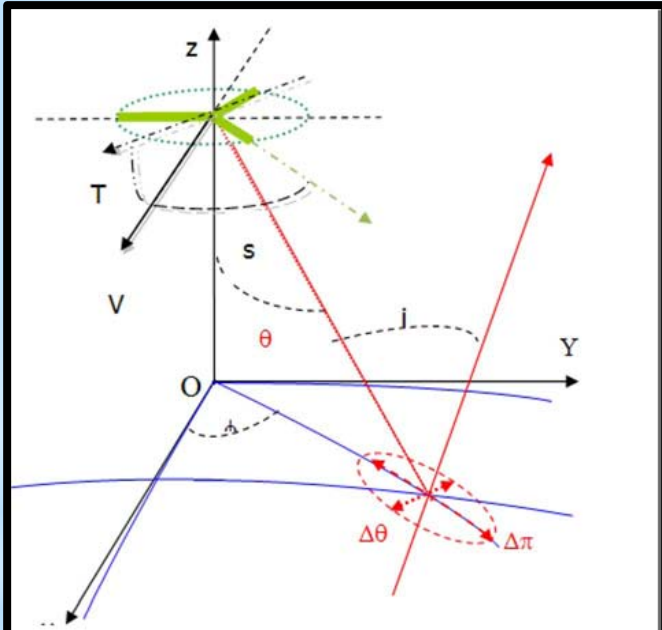
<sup>1</sup>Институт космических исследований РАН, г. Москва

<sup>2</sup>Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул

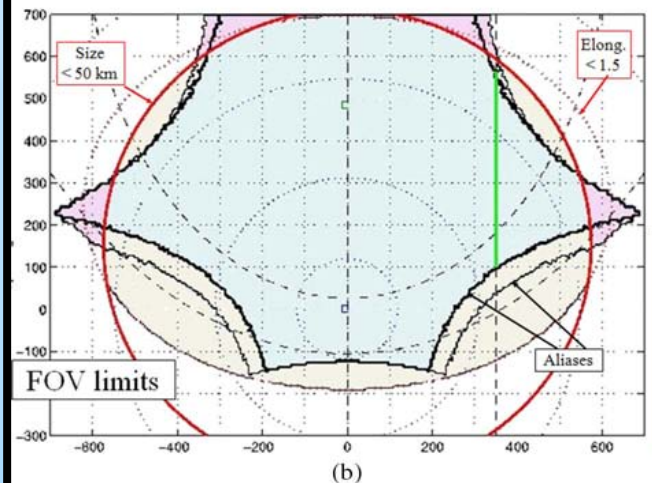


# ДАНИЕ

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

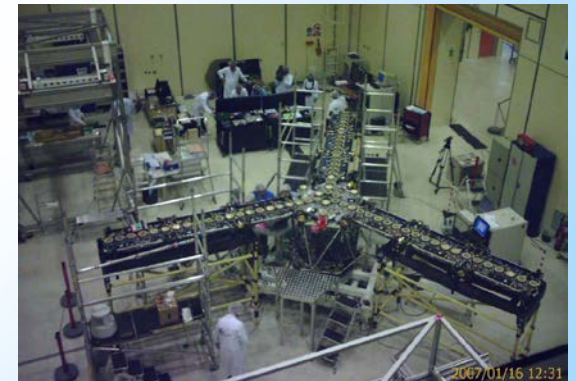


(a)



(b)

$$f = 1.4 (H, V) \text{ ГГц}$$
$$\theta = 10 \dots 60^\circ$$





# ДАННЫЕ

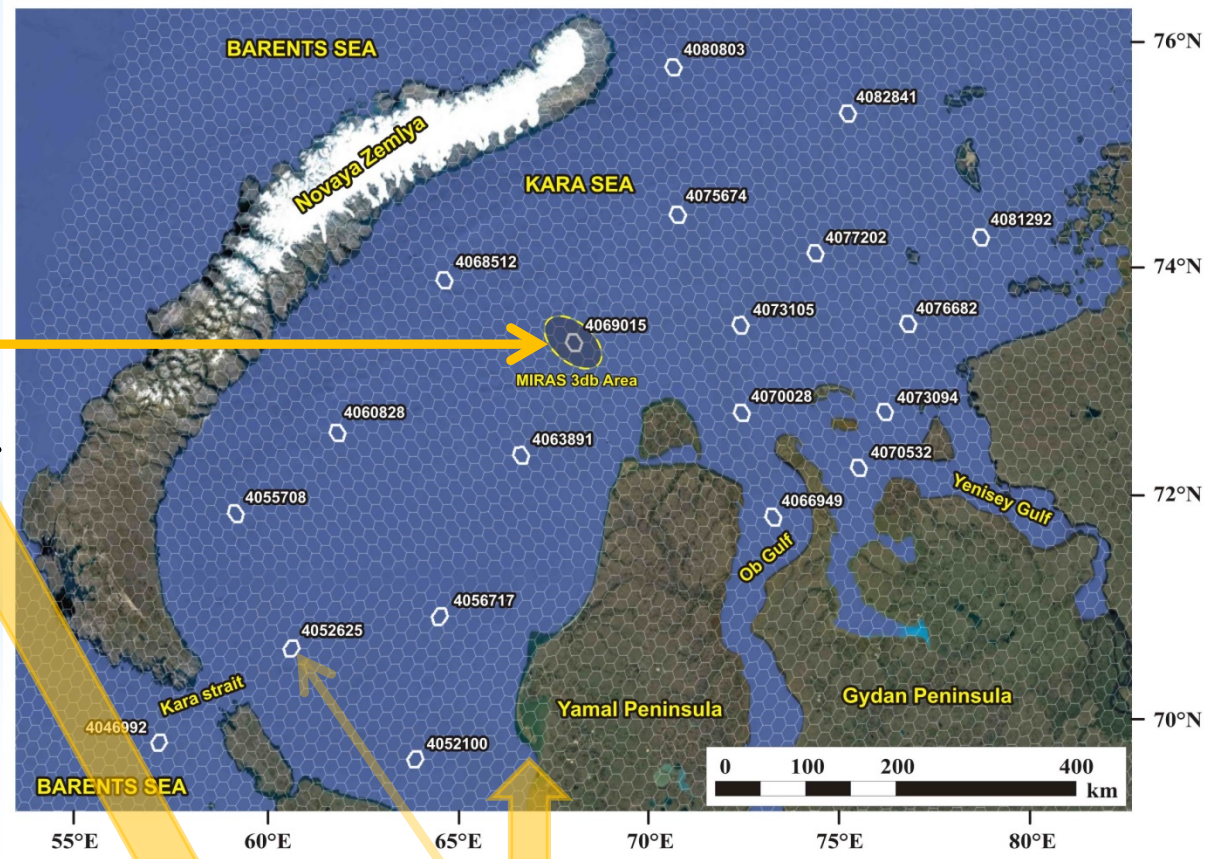
**SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) – 2009 — наст. вр.**  
**MIRAS (Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis)**

Продукт SMOS L1C

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

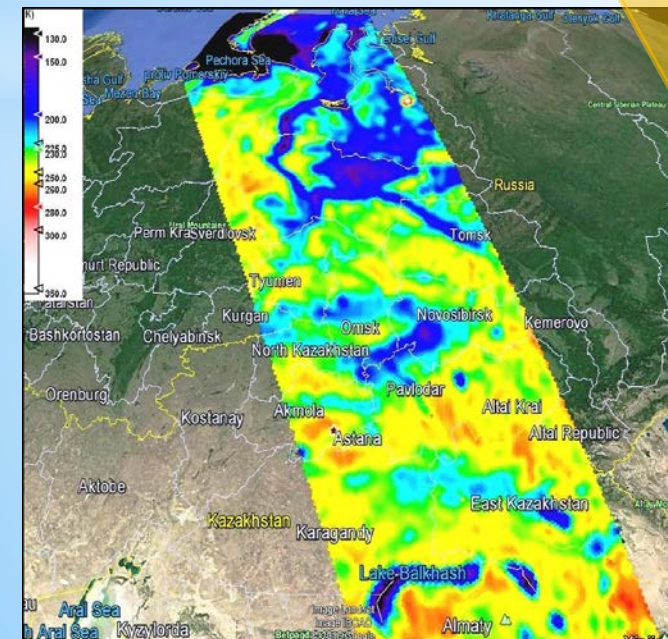
Пиксель

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



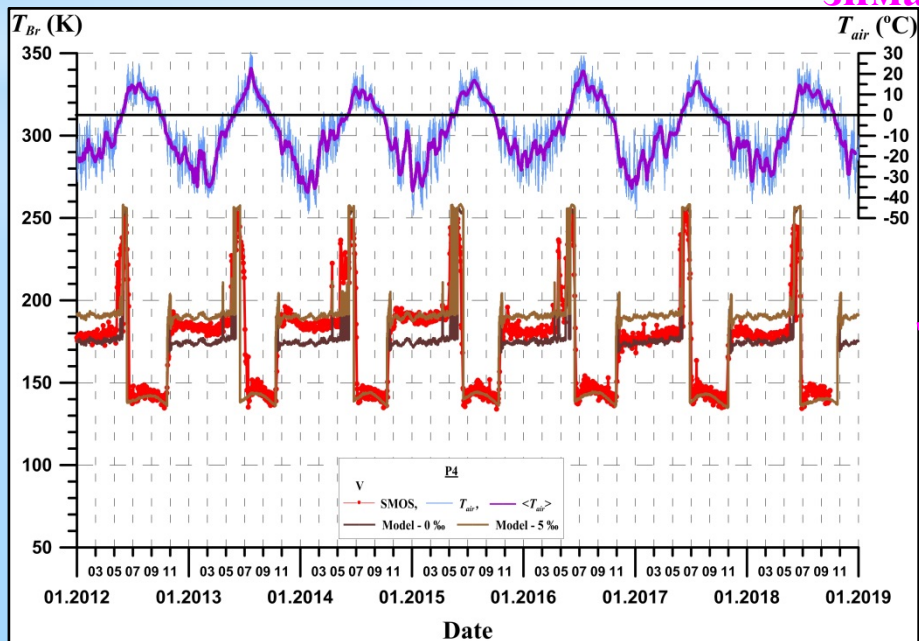
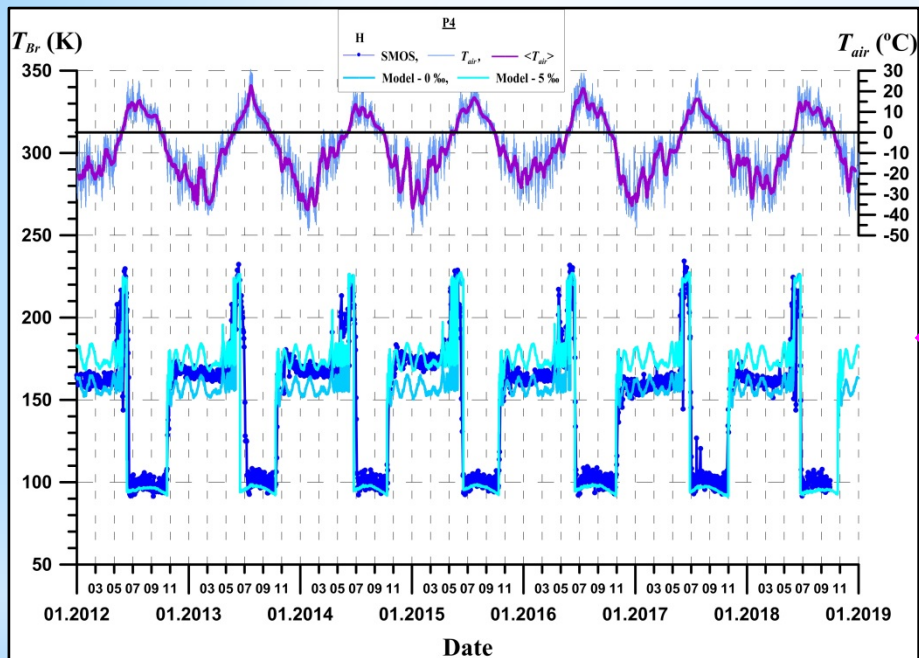
Дискретная геодезическая сетка DGG ISEA 4H9

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

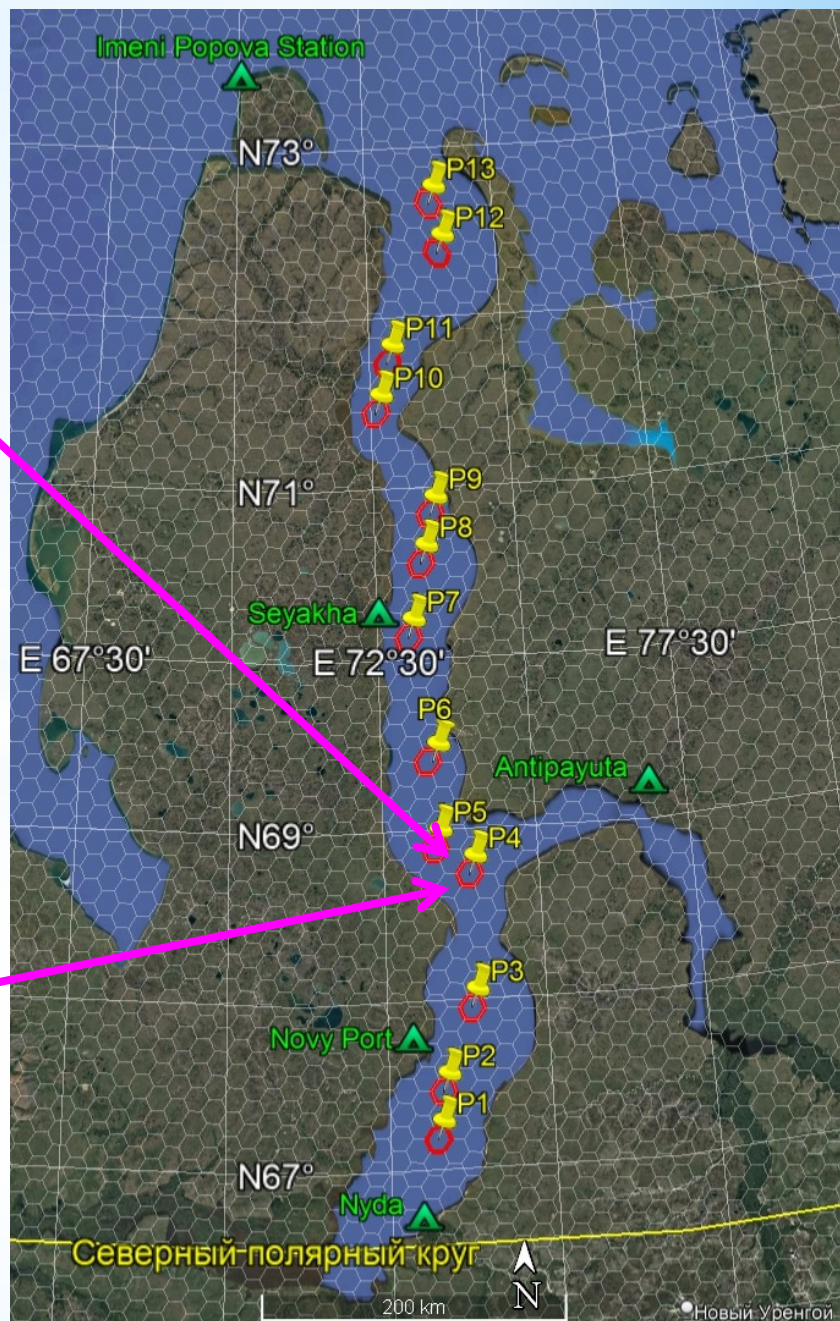




# ОБСКАЯ ГУБА



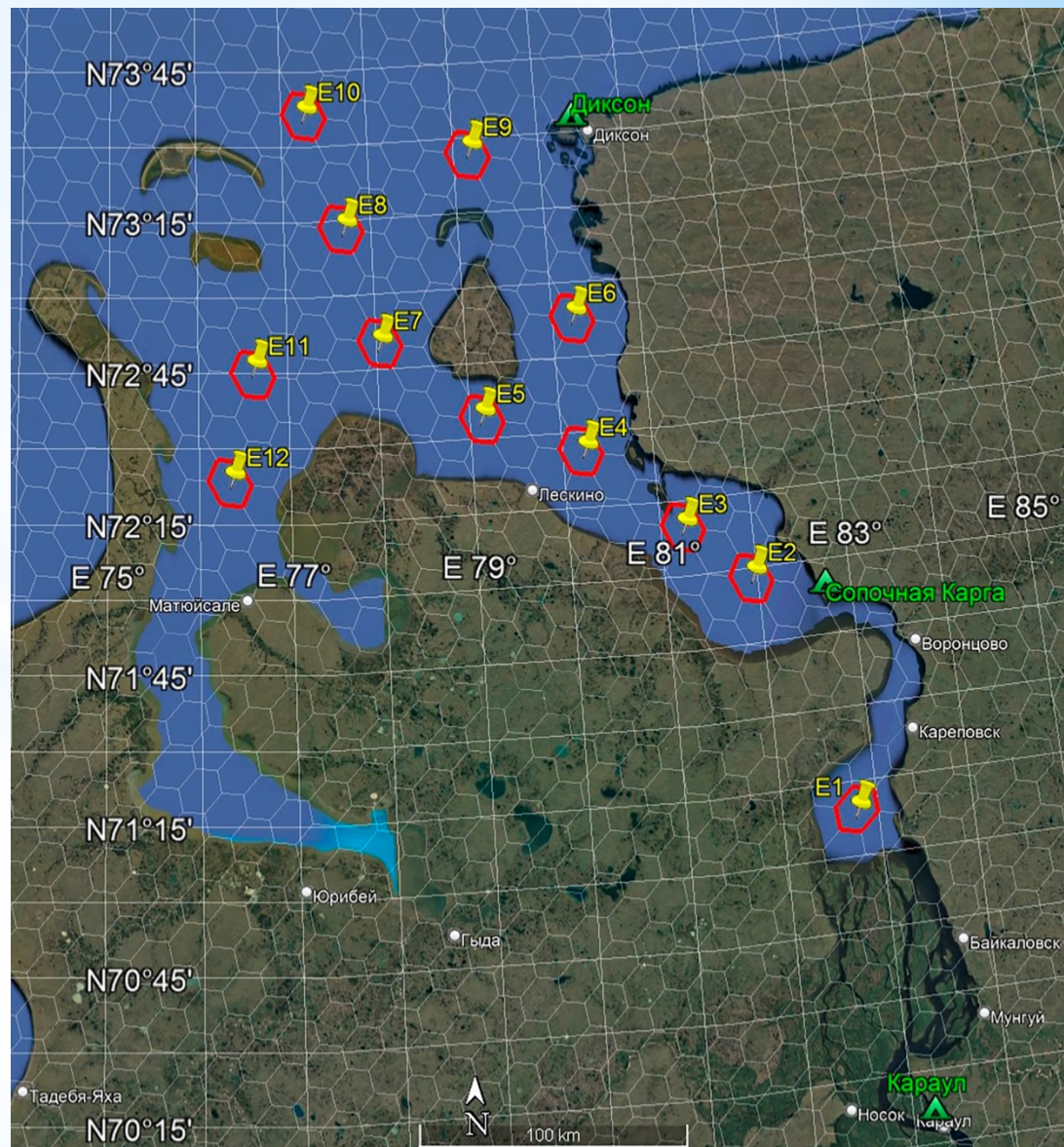
зима  
0 %  
5 %





# 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



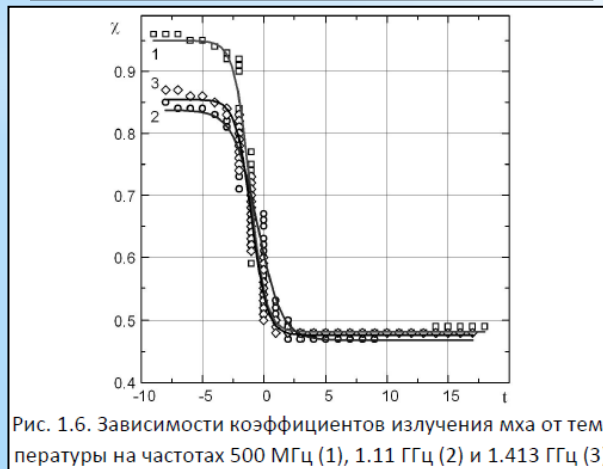
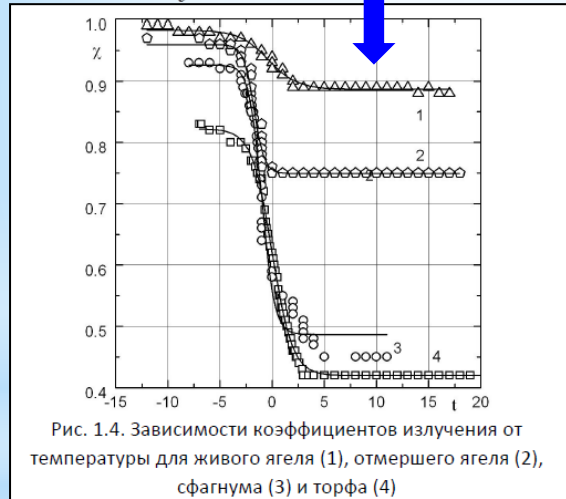


# МОДЕЛЬ

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

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

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



# МОДЕЛЬ

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

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

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

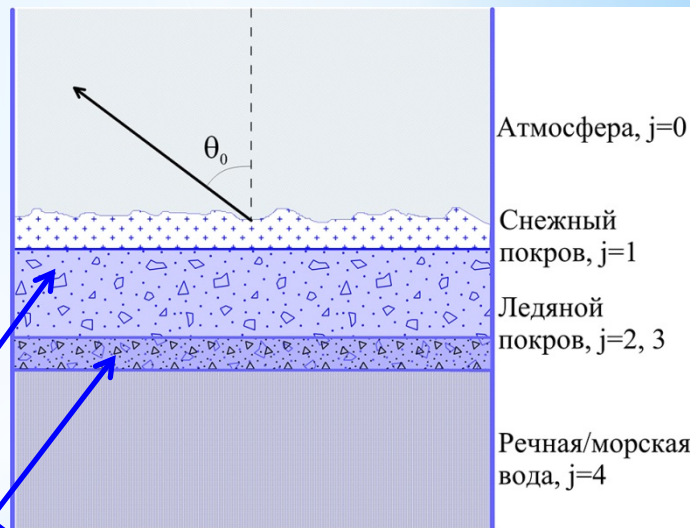
$$T_{SurfCell}^h = \sum_{j=1}^3 \frac{T_j |W_j|^2}{|1 - r_j^- r_j^+ \exp(2i\psi_j)|^2} \times [(1 - \exp(-2\text{Im}\psi_j)) (1 + |r_j^- \exp(i\psi_j)|^2)] +$$

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

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

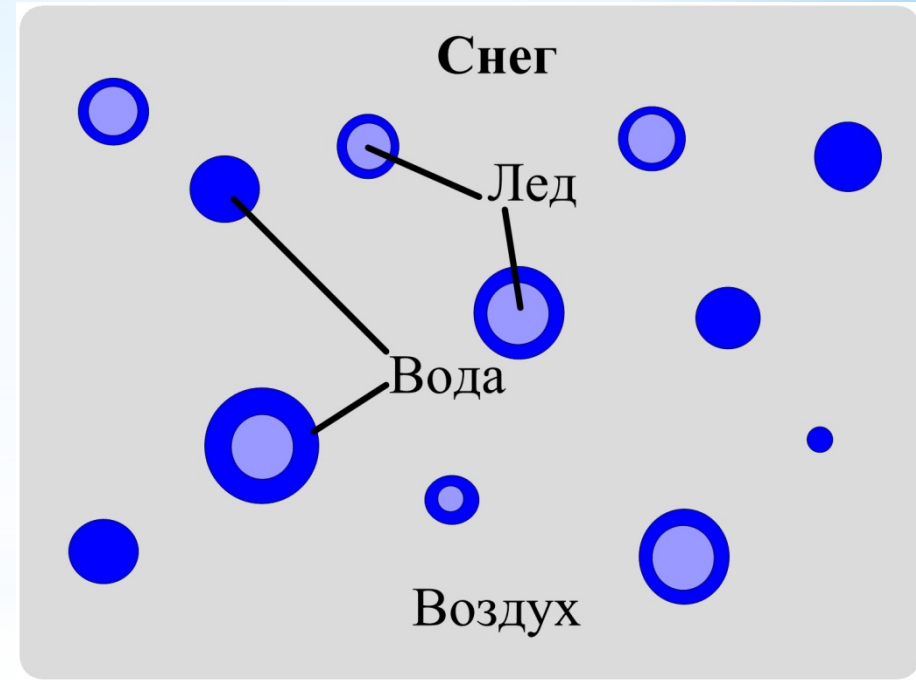
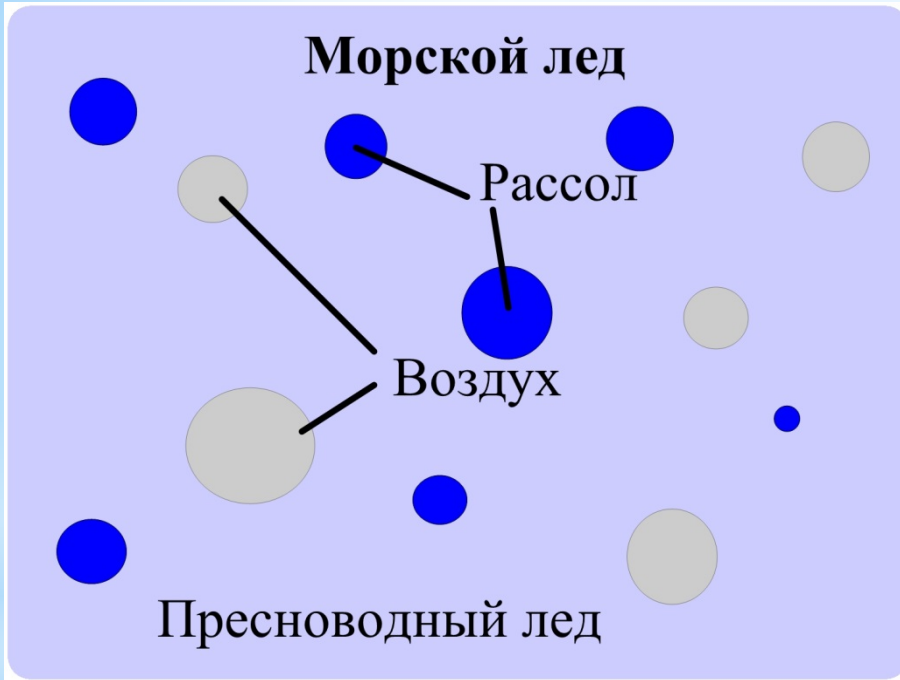
$$\psi_j = k_{z_j} h_j, \quad k_{z_j} = k_j \cos \theta_j, \quad k_x = k_0 \sin \theta_0, \quad k_j = \frac{2\pi \sqrt{\varepsilon_j}}{\lambda}, \quad \cos \theta_j = \sqrt{\frac{\varepsilon_j - \varepsilon_0 \sin^2 \theta_0}{\varepsilon_j}}$$

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



# МОДЕЛЬ

## ЭФФЕКТИВНАЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ



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

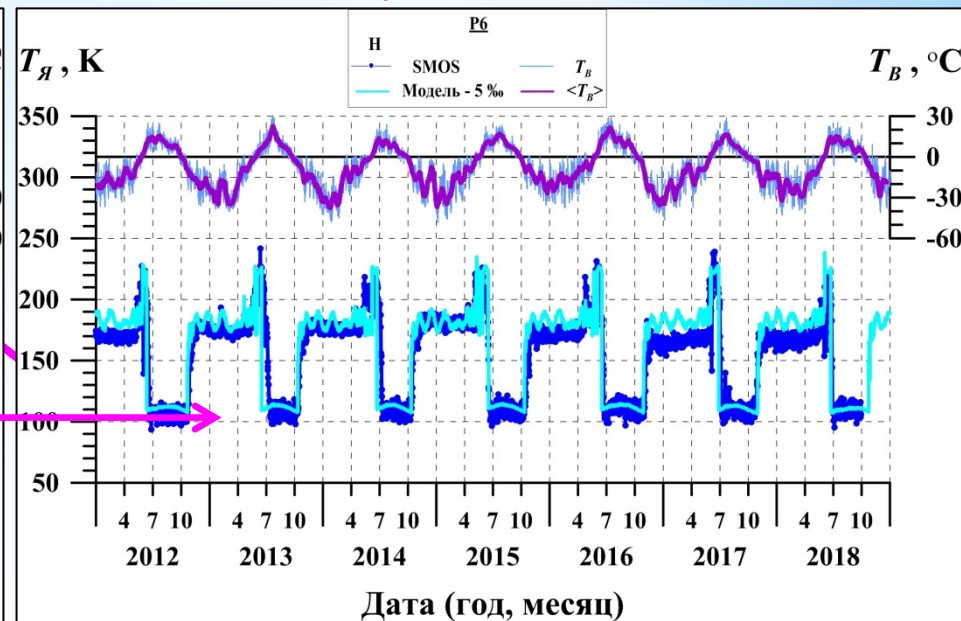
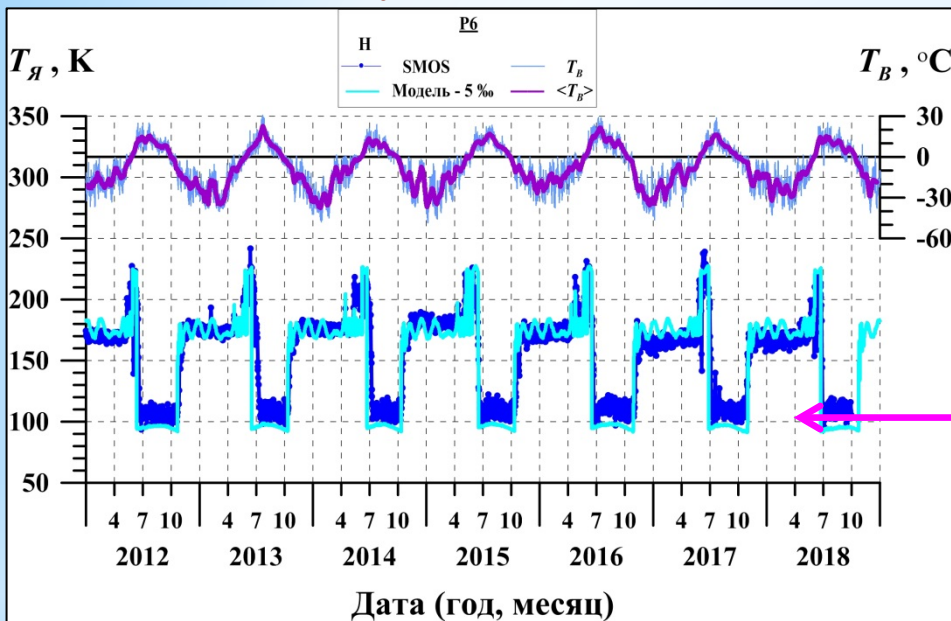
$$\varepsilon_{\text{эфф}}^{\text{снег}} = \varepsilon_{\text{возд}} \left[ 1 - \frac{4\pi n_{\text{лед}} (\varepsilon_{\text{вода}} + 2\varepsilon_{\text{возд}}) \frac{\langle f_{\omega} \rangle_{\text{лед}}}{k^2}}{2\varepsilon_{\text{эфф}} + \varepsilon_{\text{лед}}} - \frac{4\pi n_{\text{вода}} (\varepsilon_{\text{вода}}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



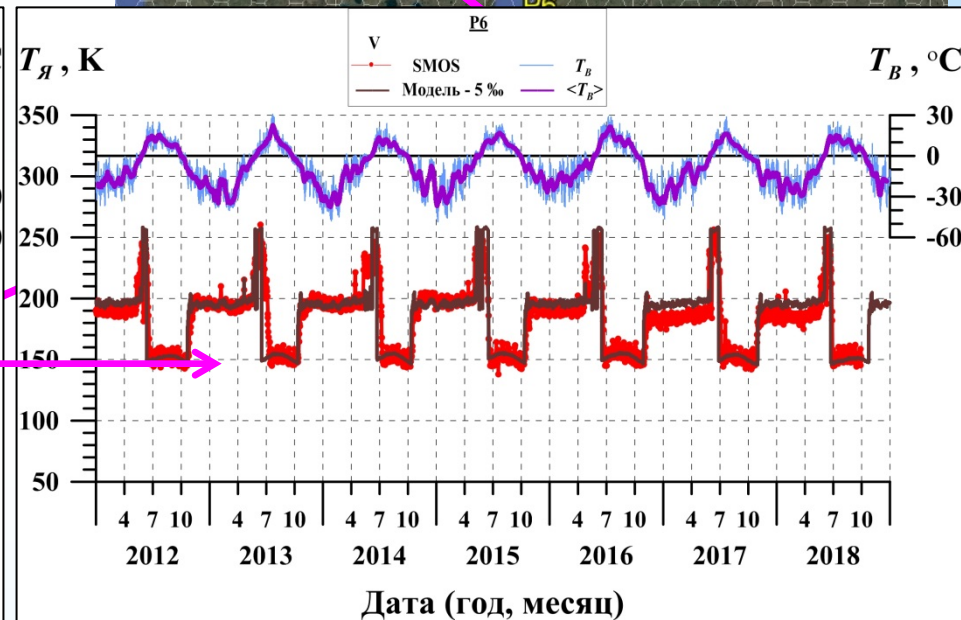
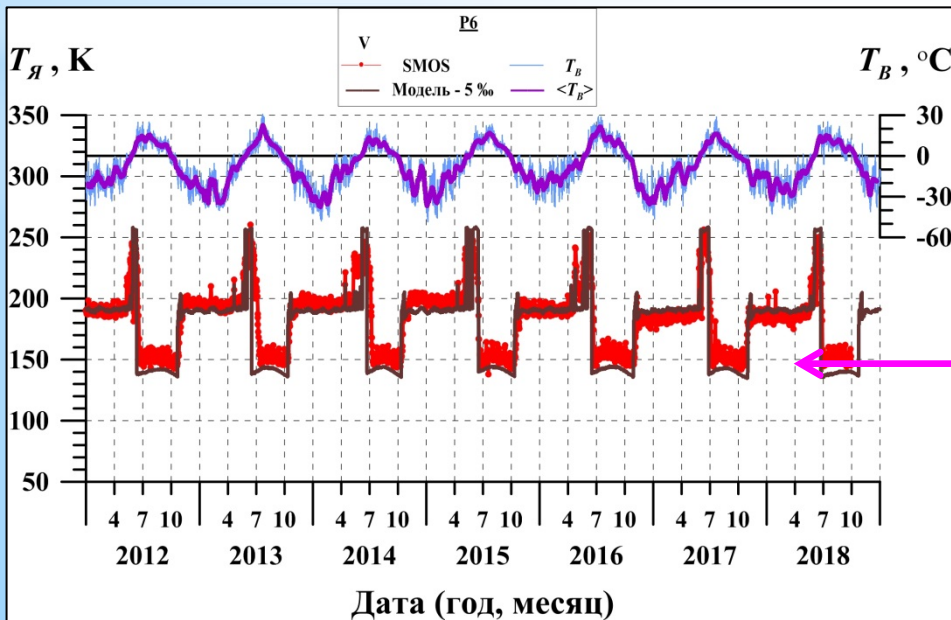
Суша – 0%

# ОБСКАЯ ГУБА

Суша – 10%



зима 5%



# МОДЕЛЬ (зима-лето)

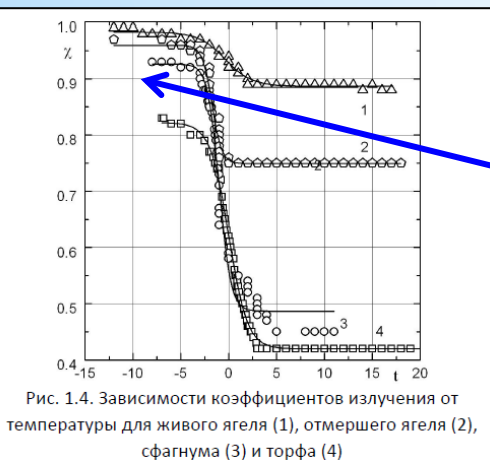
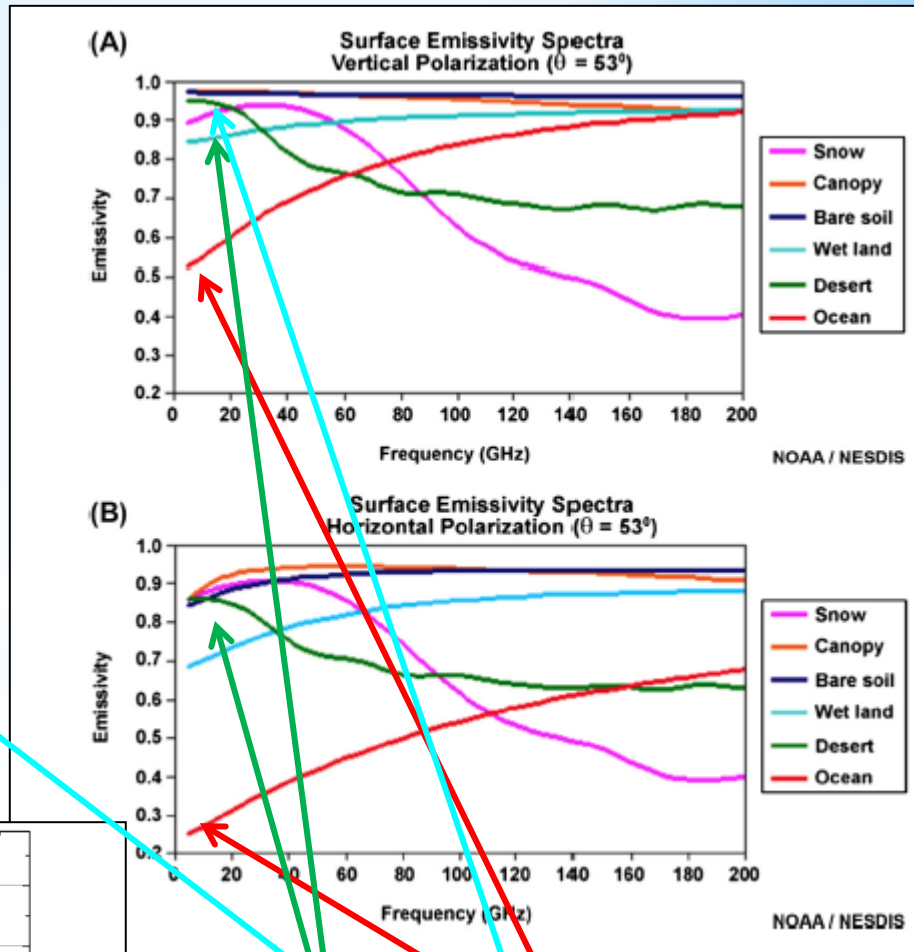
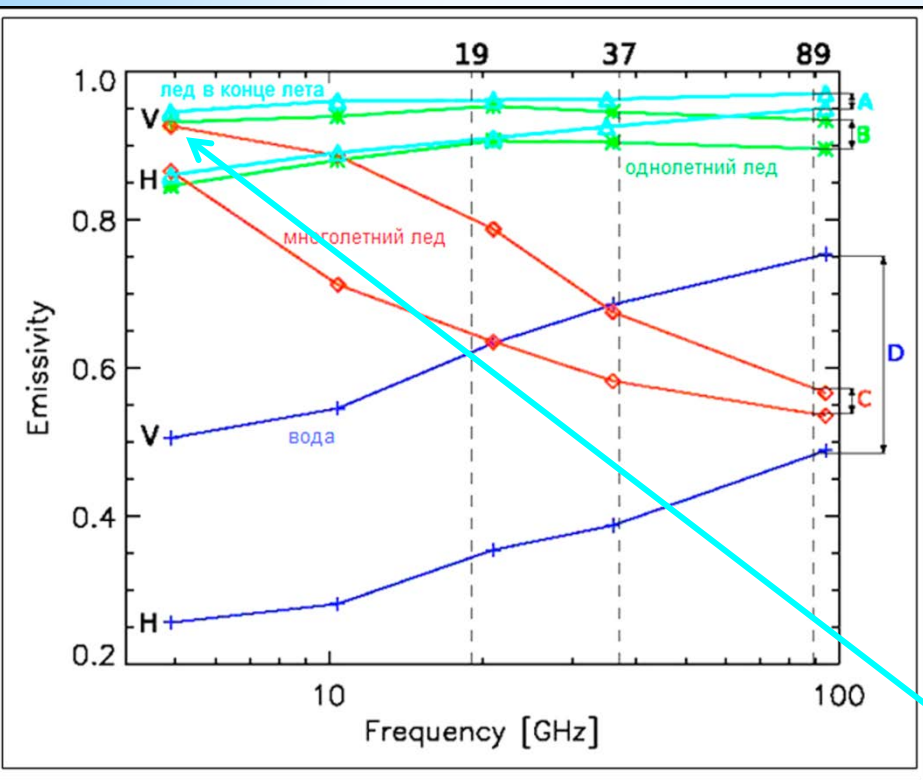


Рис. 1.4. Зависимости коэффициентов излучения от температуры для живого ягеля (1), отмершего ягеля (2), сфагнума (3) и торфа (4)

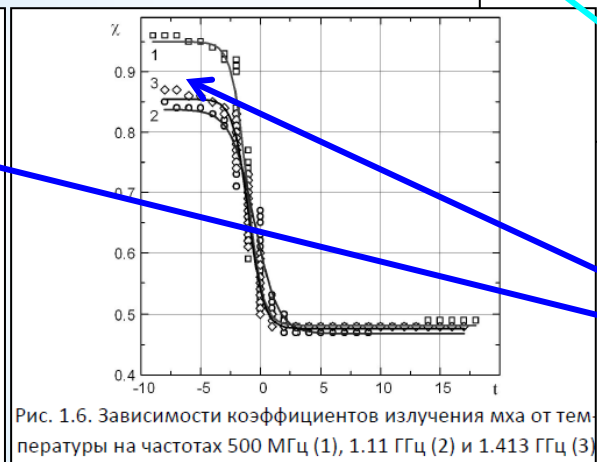


Рис. 1.6. Зависимости коэффициентов излучения мха от температуры на частотах 500 МГц (1), 1.11 ГГц (2) и 1.413 ГГц (3)

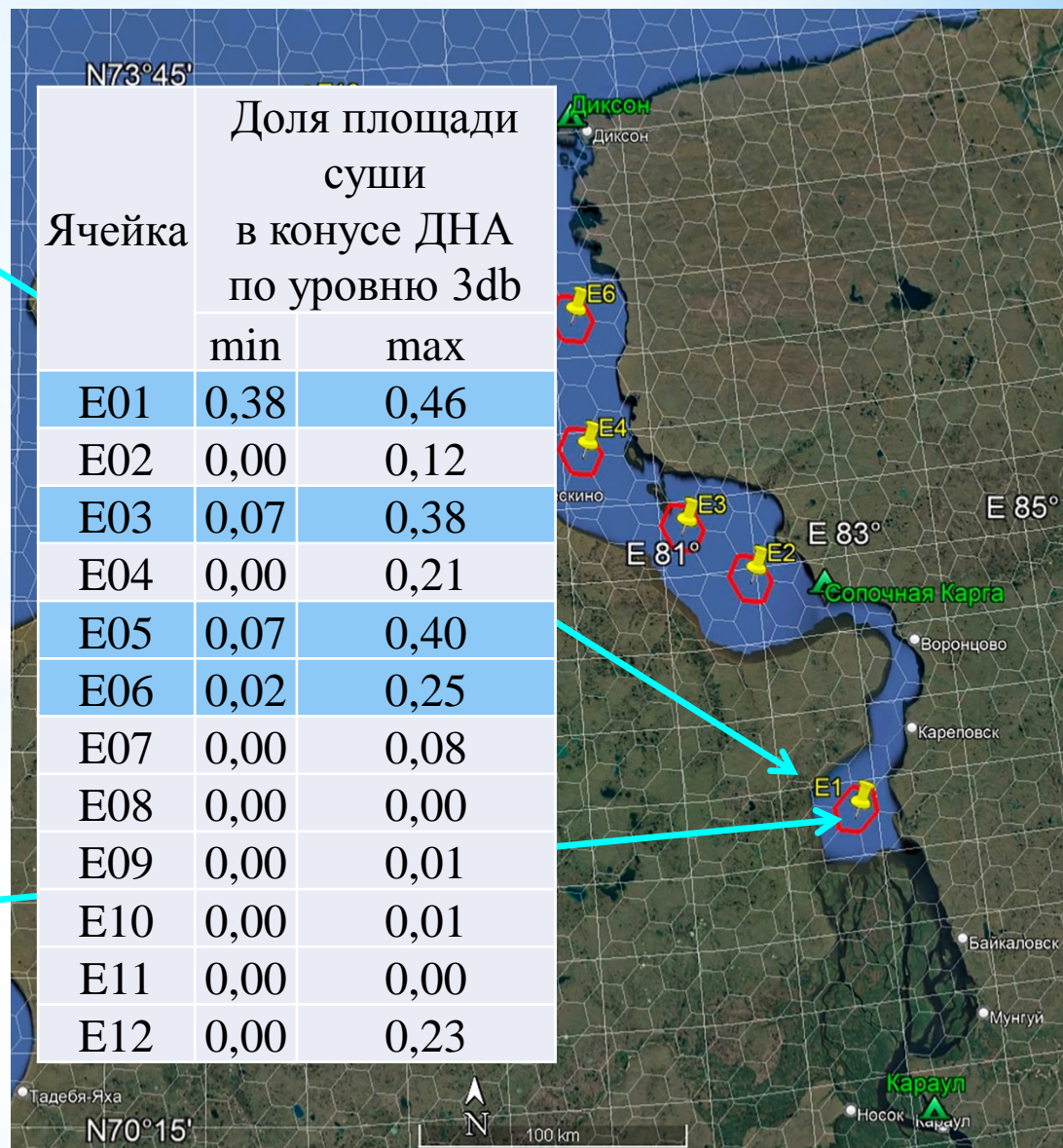
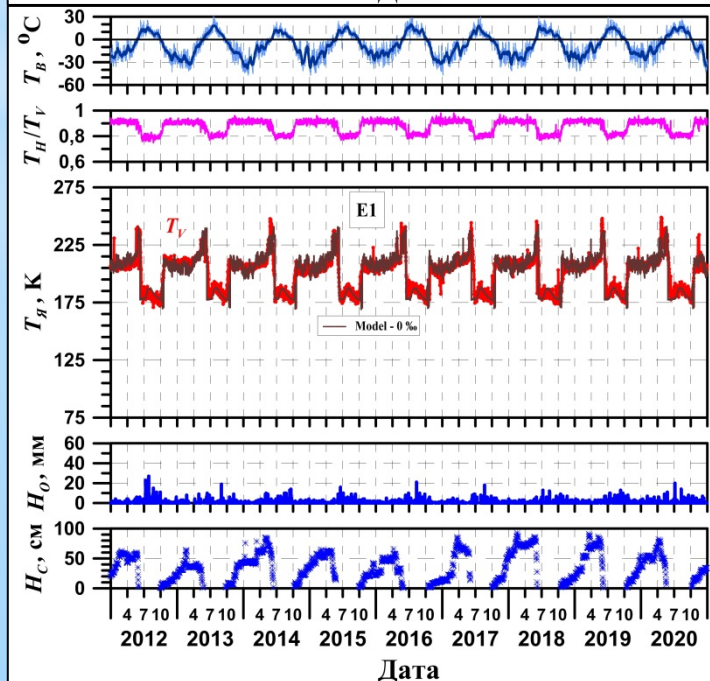
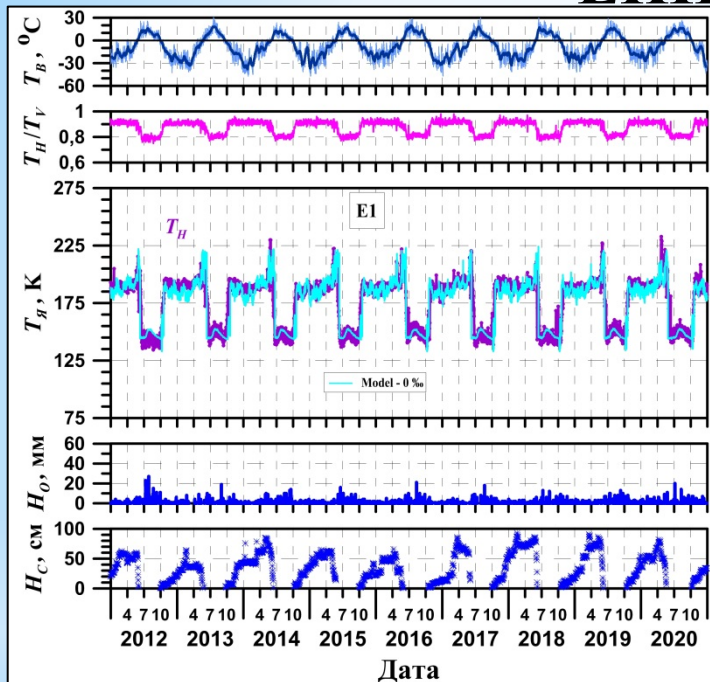
$\chi_{\text{берег}}^{\text{лето}} > \chi_{\text{акватория}}^{\text{лето}}$   
 $\chi_{\text{берег}}^{\text{зима}} \sim \chi_{\text{акватория}}^{\text{зима}}$



# ЕНИСЕЙСКИЙ ЗАЛИВ

Зима - 0 %

Суша - 44%

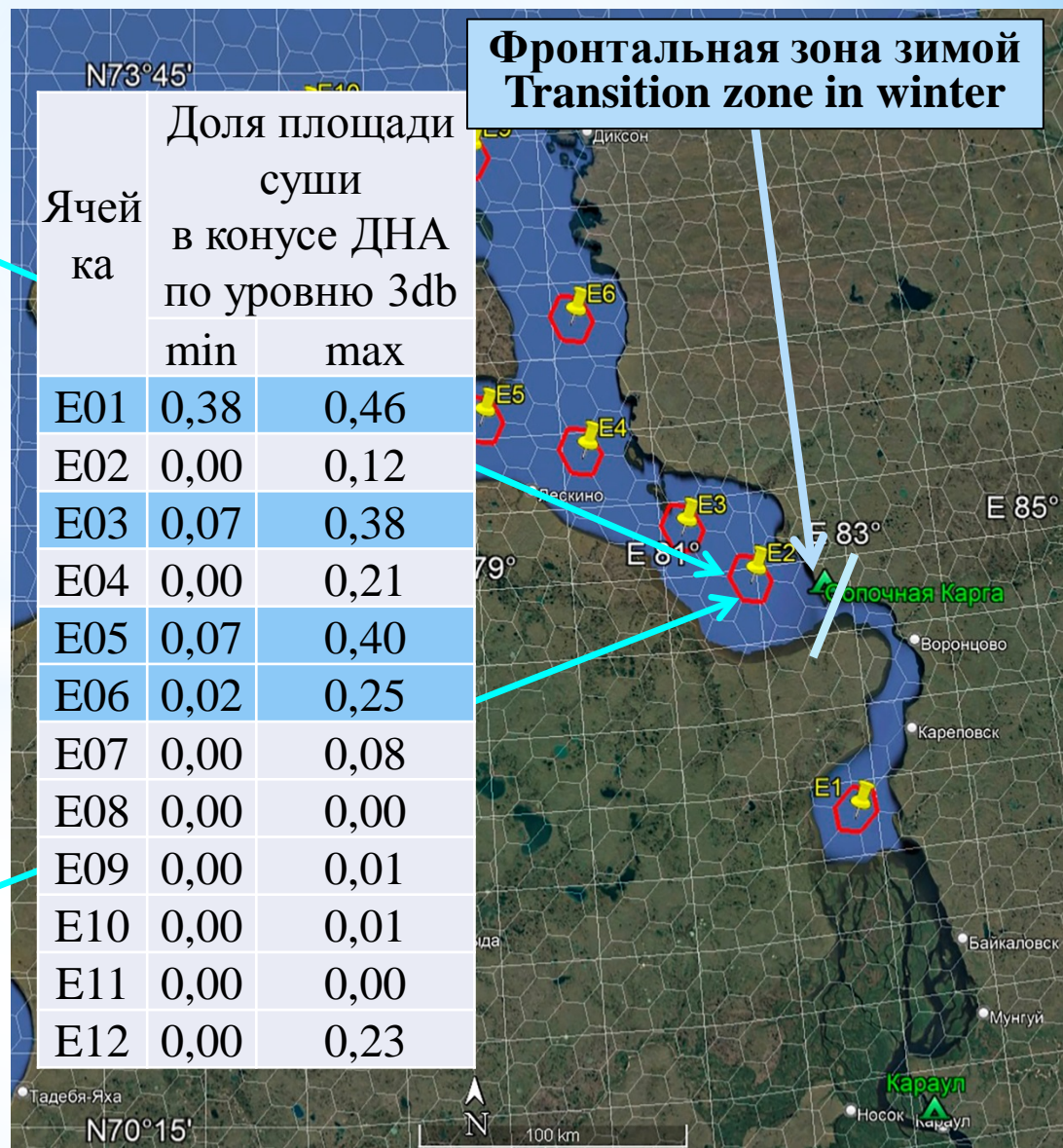
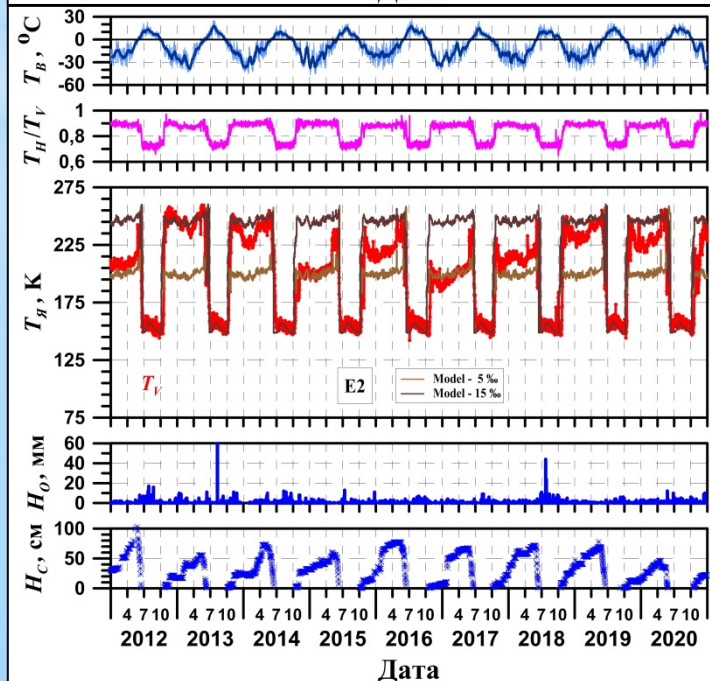
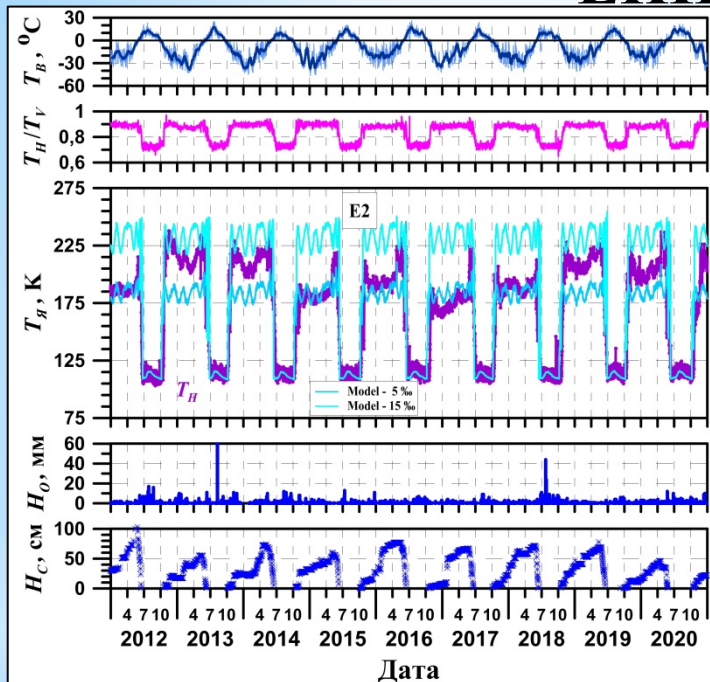




# ЕНИСЕЙСКИЙ ЗАЛИВ

Зима – 5-15 %

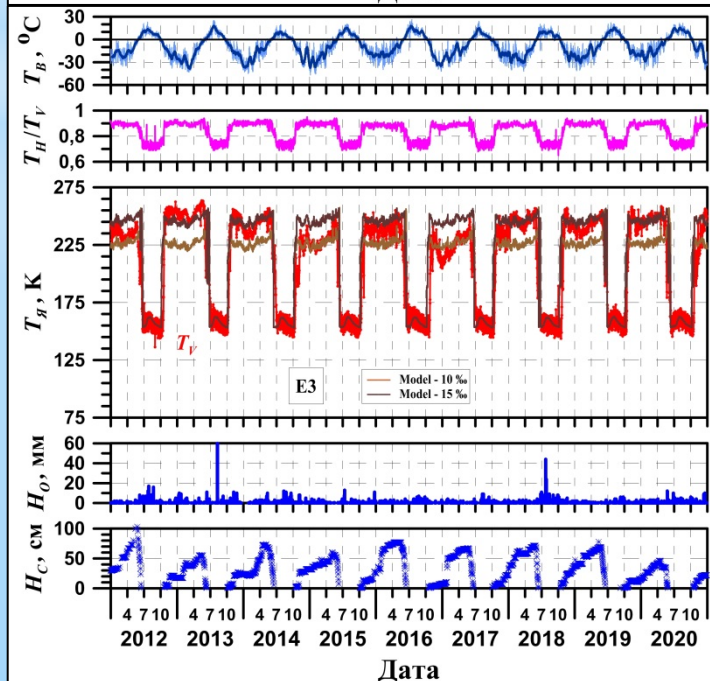
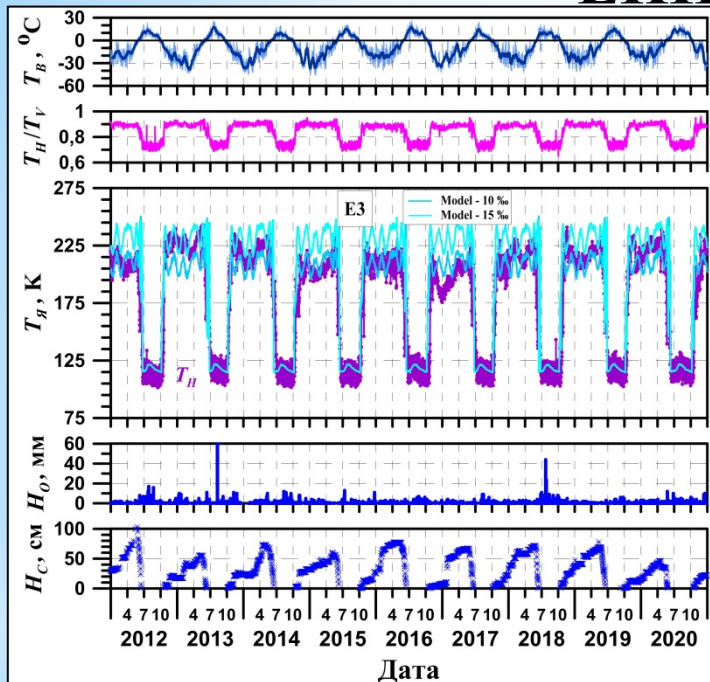
Суша – 10%



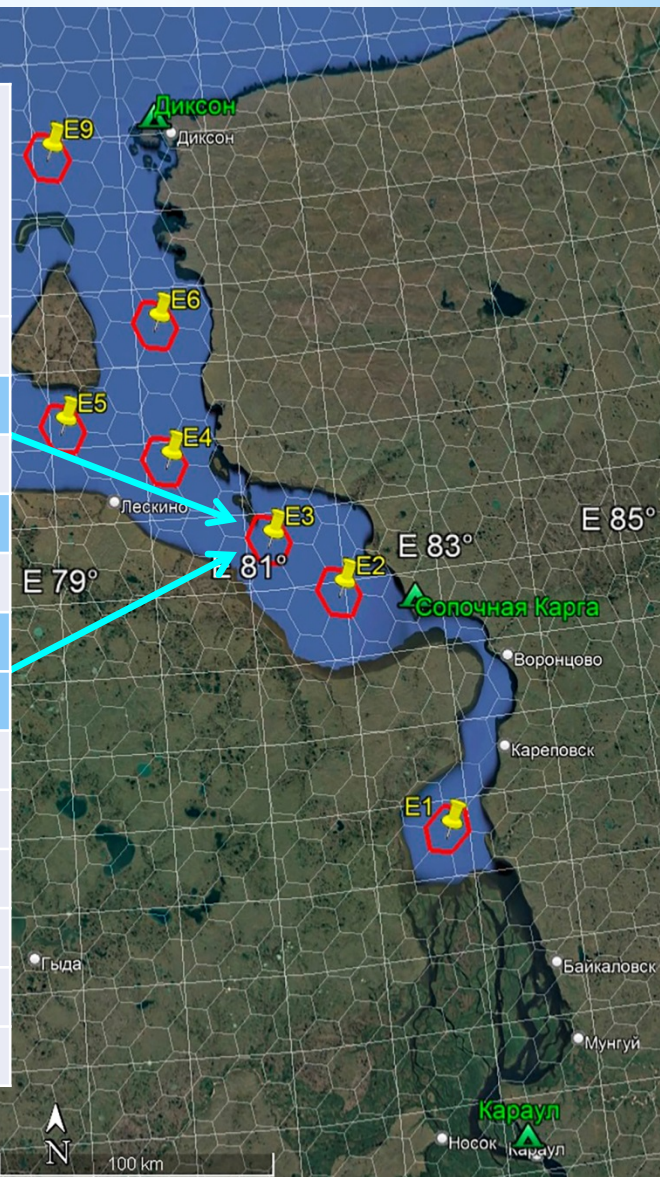


# ЕНИСЕЙСКИЙ ЗАЛИВ

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

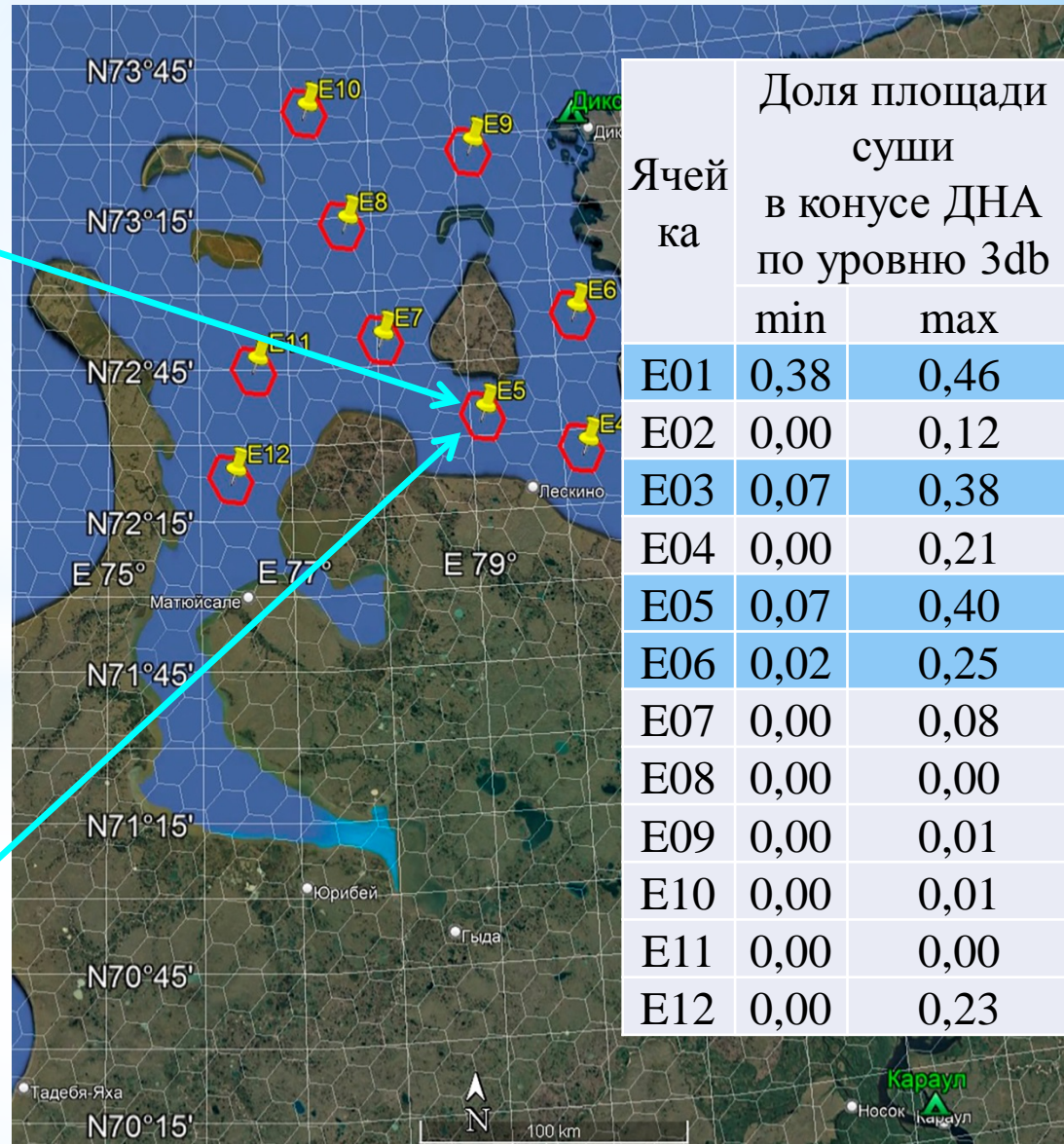
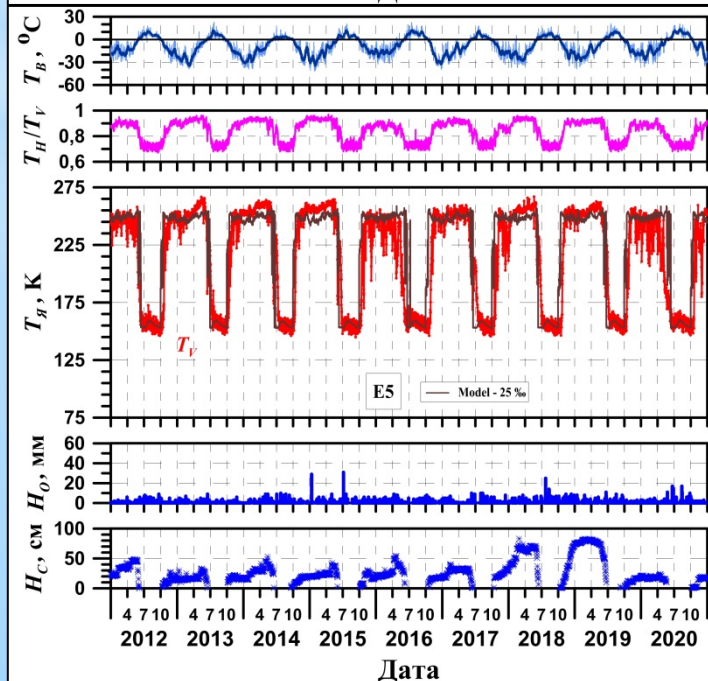
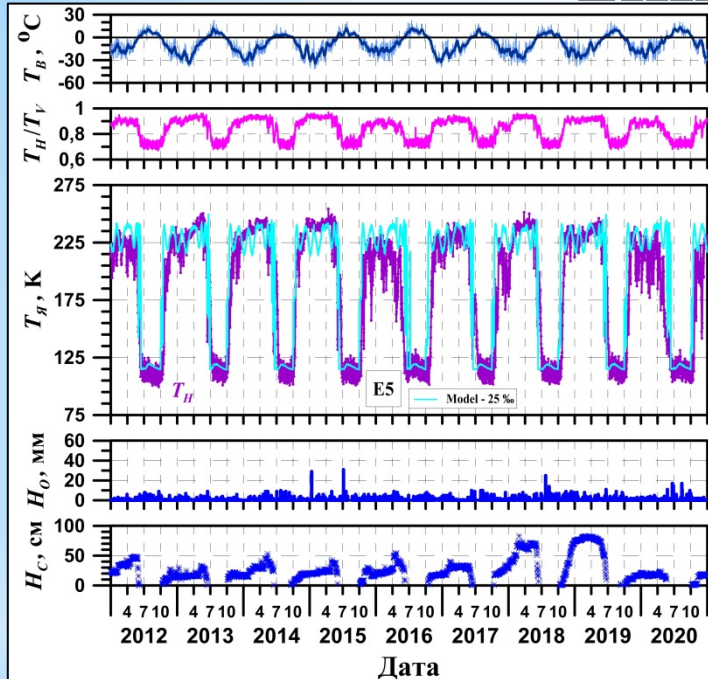




# ЕНИСЕЙСКИЙ ЗАЛИВ

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



# ВЫВОДЫ

# Спасибо!

# Thanks!



Работа выполнена при поддержке темы «Мониторинг» (гос. регистрация № 122042500031-8), а также темы «Природные и природно-хозяйственные системы Сибири в условиях современных вызовов: диагностика состояний, адаптивные возможности, потенциал экосистемных услуг» (госзадание № 0306-2021-0007).