

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ СОБСТВЕННОГО МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЗАБОЛОЧЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ НИЗМЕННОСТИ ПО ЕЖЕДНЕВНЫМ ДАННЫМ СПУТНИКА SMOS



Романов А.Н. (1), Тихонов В.В. (2), Хвостов И.В. (1), Трошкин Д.Н. (1), Уланов П.Н.
(1), Боярский Д.А. (2), Шарков Е.А. (2).

(1) Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия

(2) Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

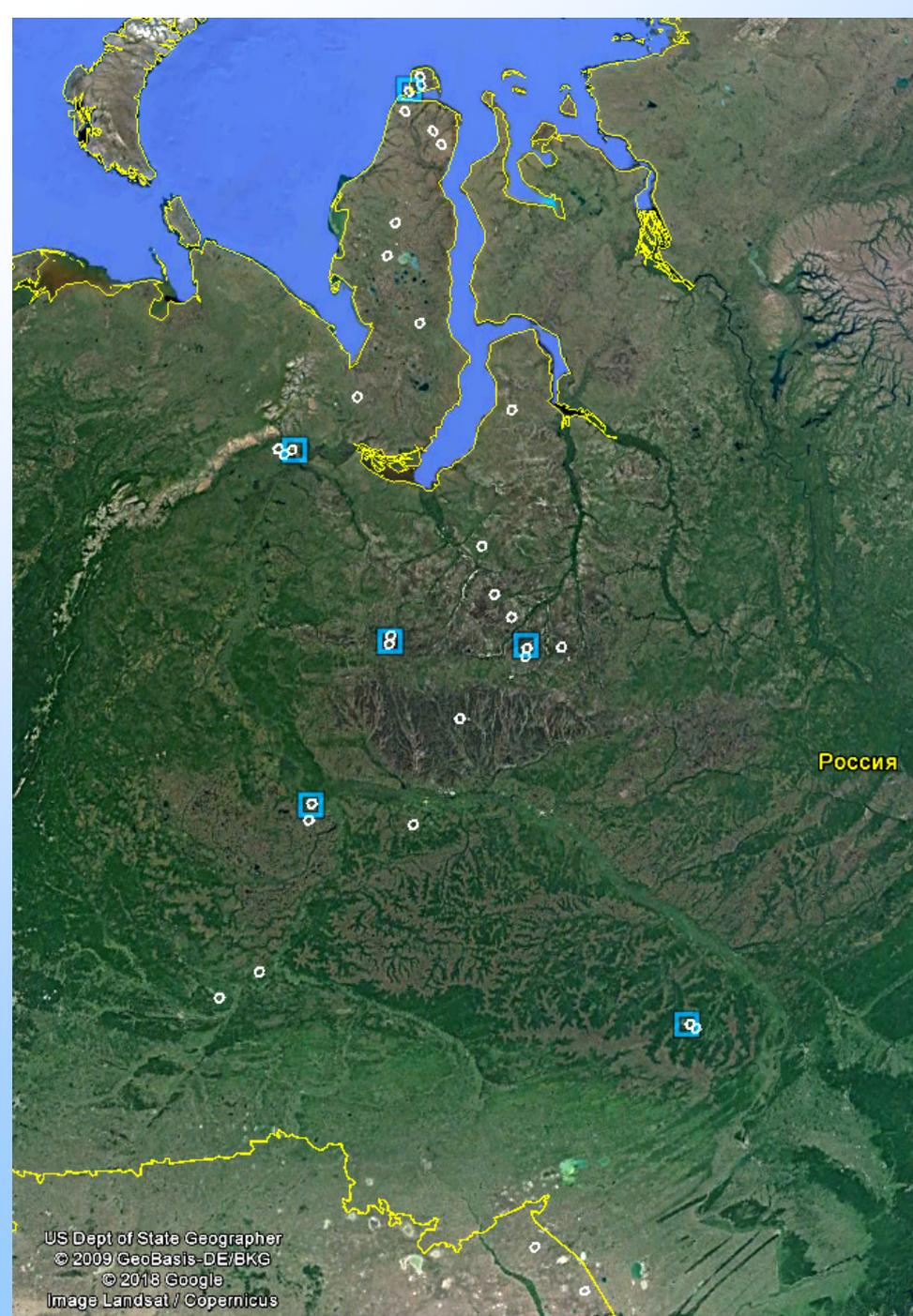
Актуальность

1. Крупнейшая в мире Западно-Сибирская низменность характеризуется большим количеством болот, расположенных в трех природных зонах (тундре, тайге, лесостепи) и занимающих по разным оценкам площадь от 800 тыс. до 1 млн. кв. километров.

2. Богатейшие запасы нефти, газа, торфа делают Западно-Сибирскую низменность важнейшим регионом России по добыче топливно-энергетических ресурсов.

3. Возникает необходимость дистанционного мониторинга болот для своевременного выявления происходящих с ними изменений. В первую очередь это связано с процессами осушения и переувлажнения болот, вызванными климатическими изменениями.

4. Для дистанционного мониторинга болот могут быть применены методы СВЧ-радиометрии с использованием данных микроволновых радиометров, размещенных на искусственных спутниках Земли (SMOS, SMAP и др.).

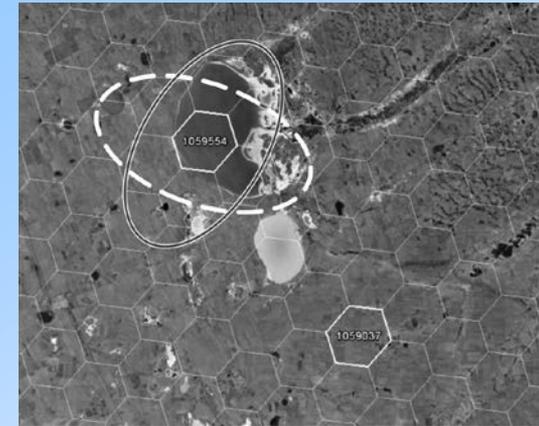


Данные спутника SMOS (продукт L1c) на частоте 1.41 ГГц использовали для оценки пространственного распределения радиоярких температур подстилающей поверхности.

Данные SMOS (продукт L1C), привязаны к дискретной геодезической сетке DGG ISEA 4N9, состоящей из 2621442 шестиугольных ячеек, покрывающих Земной шар.



Форма радиометрического следа радиометра MIRAS (SMOS) на вертикальной и горизонтальной поляризациях



Спутниковые снимки Landsat использовали для планирования экспедиций, определения мест отбора проб воды.

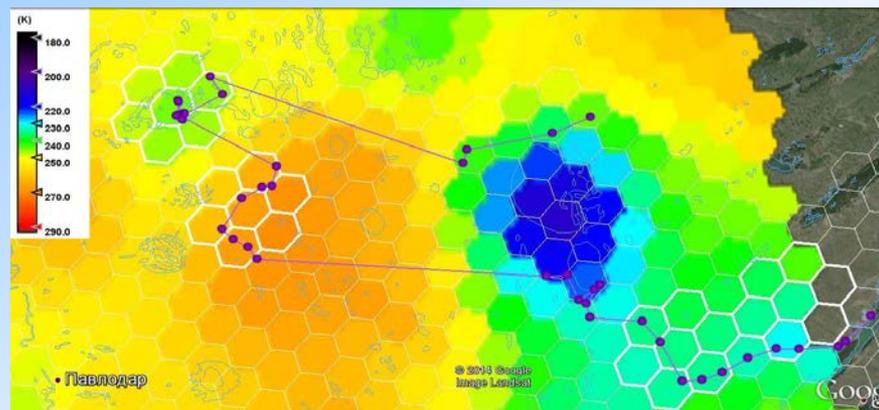
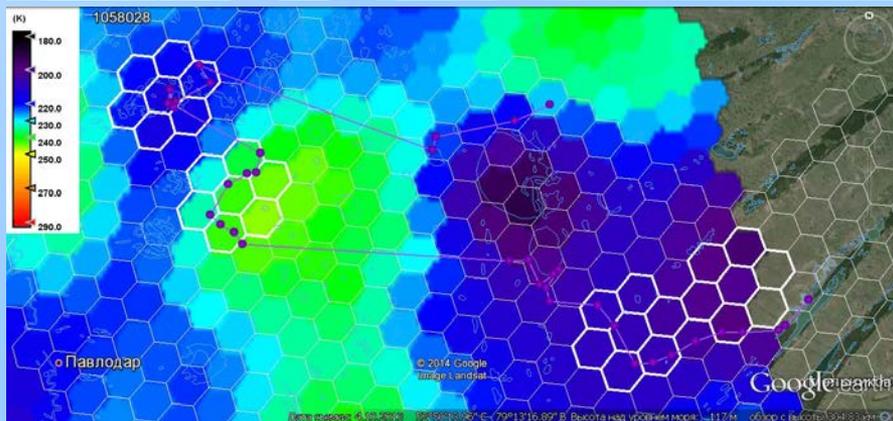
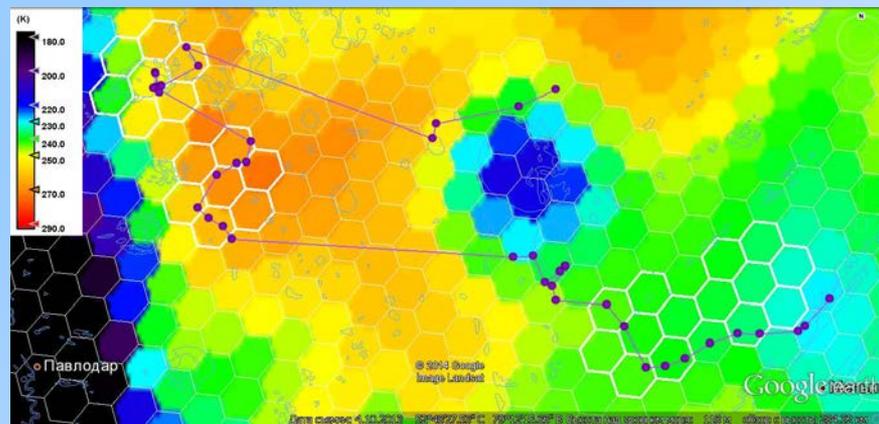
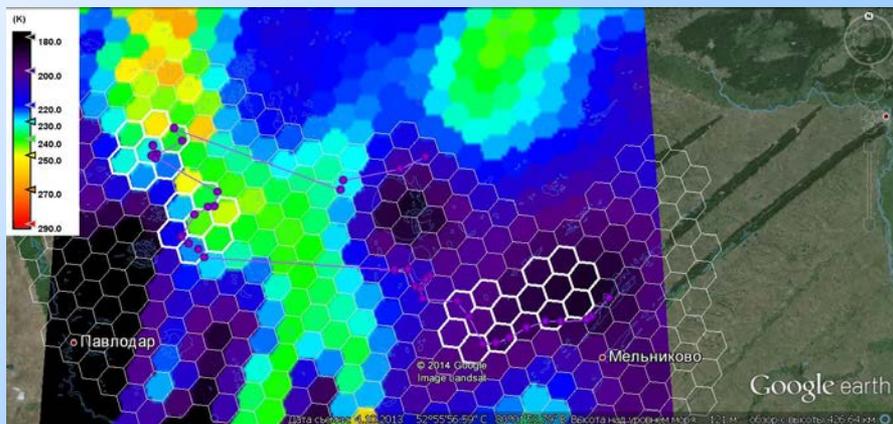
Полевые измерения: измеряли температуру, отбирали пробы воды, почвы, растительности.
Лабораторные измерения диэлектрических характеристик отобранных образцов проводили на лабораторной установке мостового типа.



- Значения радиоизлучательных характеристик откалиброваны в единицах радиоярких температур (Тя).
- Погрешность определения Тя изменяется от ± 3 К в центре до ± 6 К на краях полосы захвата, ширина которой 890 км.
- Съёмка территории производится на горизонтальной и вертикальной поляризациях в диапазоне углов зондирования от 0 до 55° .
- Разрешающая способность радиометра при рабочих углах зондирования изменяется от 30 до 50 км, при зондировании под углом 42.5° составляет 45 км.

горизонтальная поляризация
horizontal polarization

вертикальная поляризация
vertical polarization



Примеры сезонной динамики крупнейших болот мира

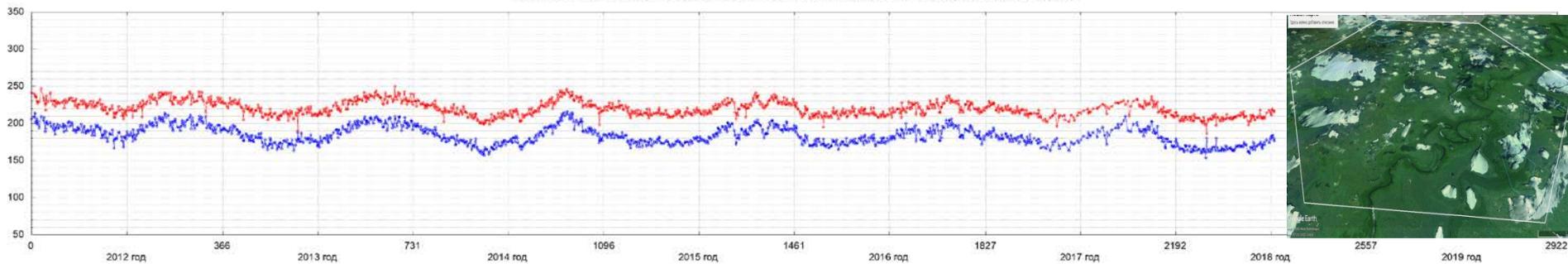
Болото Пантанал (Южная Америка)

Общая площадь 150-195 тыс.км², это крупнейшая заболоченная территория на планете.

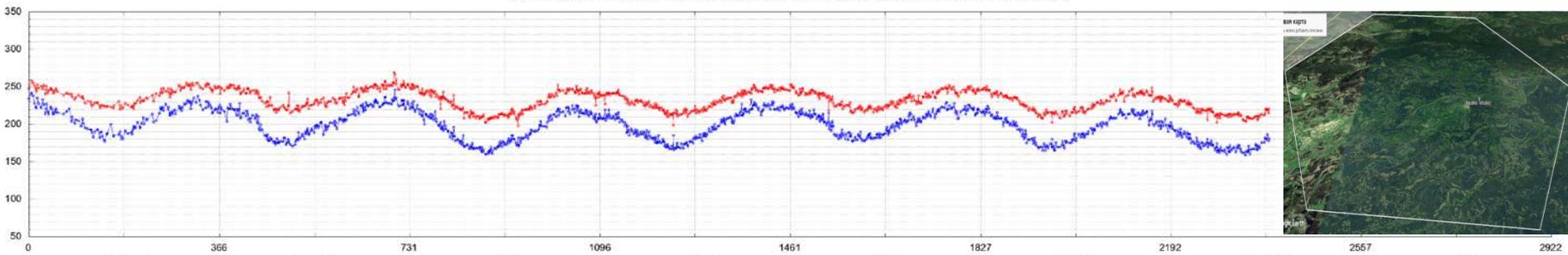
Выделены два сезона: засушливый зимний сезон и влажный летний сезон, превращающий Пантанал в огромное озеро-болото.



Динамика радиояростной температуры поверхности на участке наблюдения DGGID 1243886 [-18,292 с.ш.; -56,942 в.д.]



Динамика радиояростной температуры поверхности на участке наблюдения DGGID 1239786 [-17,413 с.ш.; -57,469 в.д.]

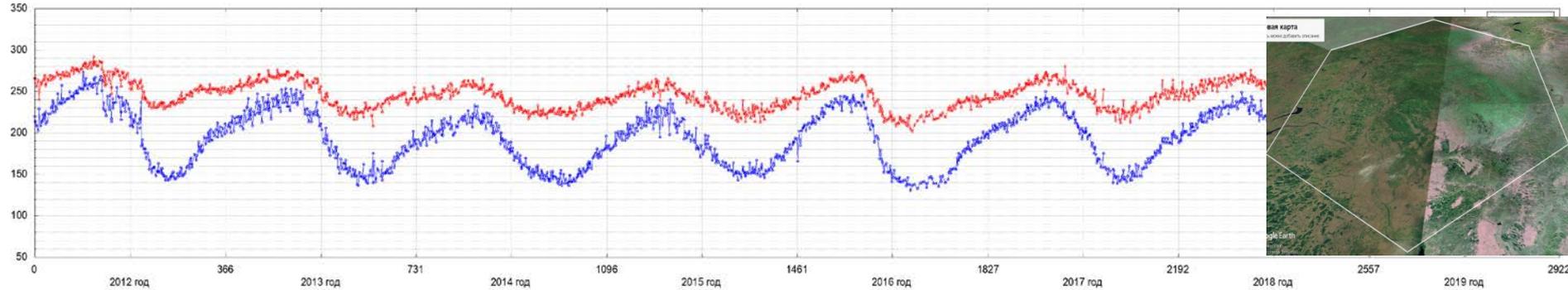


Болото Судд (Африка)

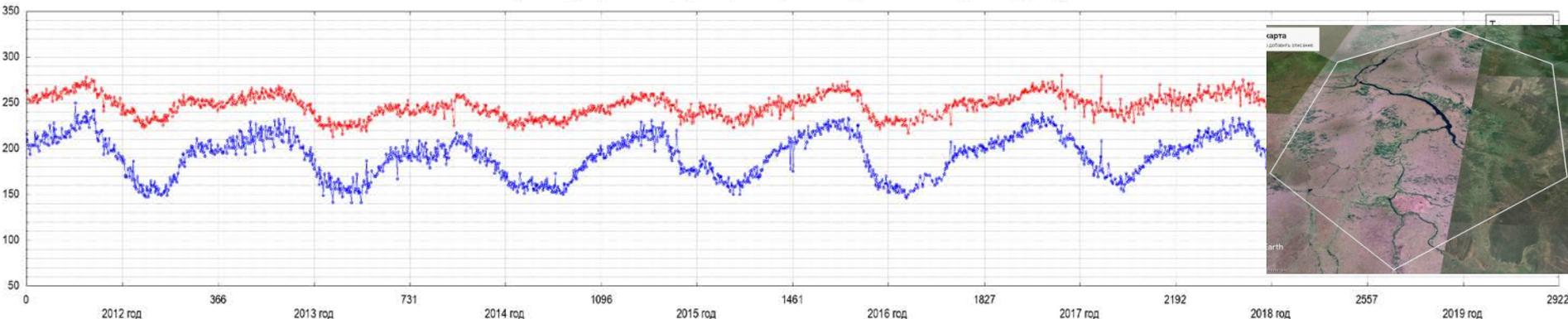
Выделены сезон дождей и сезон засух.
Площадь болота варьирует от 30 тыс. км² (в засуху) до 150 тыс. км² в сезон дождей.



Динамика радиояростной температуры поверхности на участке наблюдения DGGID 2192443 [8,690 с.ш.; 30,443 в.д.]



Динамика радиояростной температуры поверхности на участке наблюдения DGGID 2193466 [8,295 с.ш.; 30,509 в.д.]



Ветланды Западной Сибири

Васюганские болота — одни из самых больших болот в мире, расположены в Западной Сибири, в междуречье Оби и Иртыша, на территории Васюганской равнины, находящейся большей частью в пределах Томской области, и малыми частями — Новосибирской, Омской областей, Ханты-Мансийского АО и севера Тюменской области (Уватский и Тобольский район). Площадь болот 53 тыс. км²

Болота и озера Ханты-Мансийского автономного округа.

Площадь болот - 183,3 тыс.км², площадь озёр – 172,55 тыс. км².

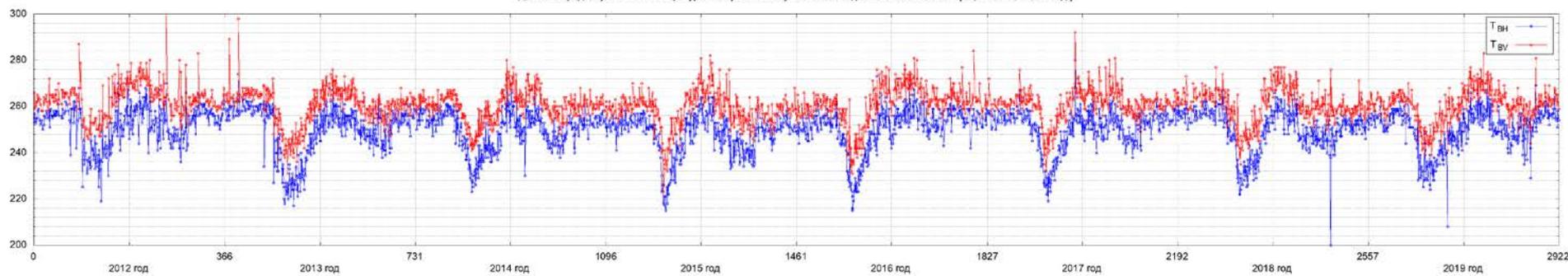
Озеро Чаны (крупнейшее соленое озеро в России). Площадь – 1708 -2269 км²



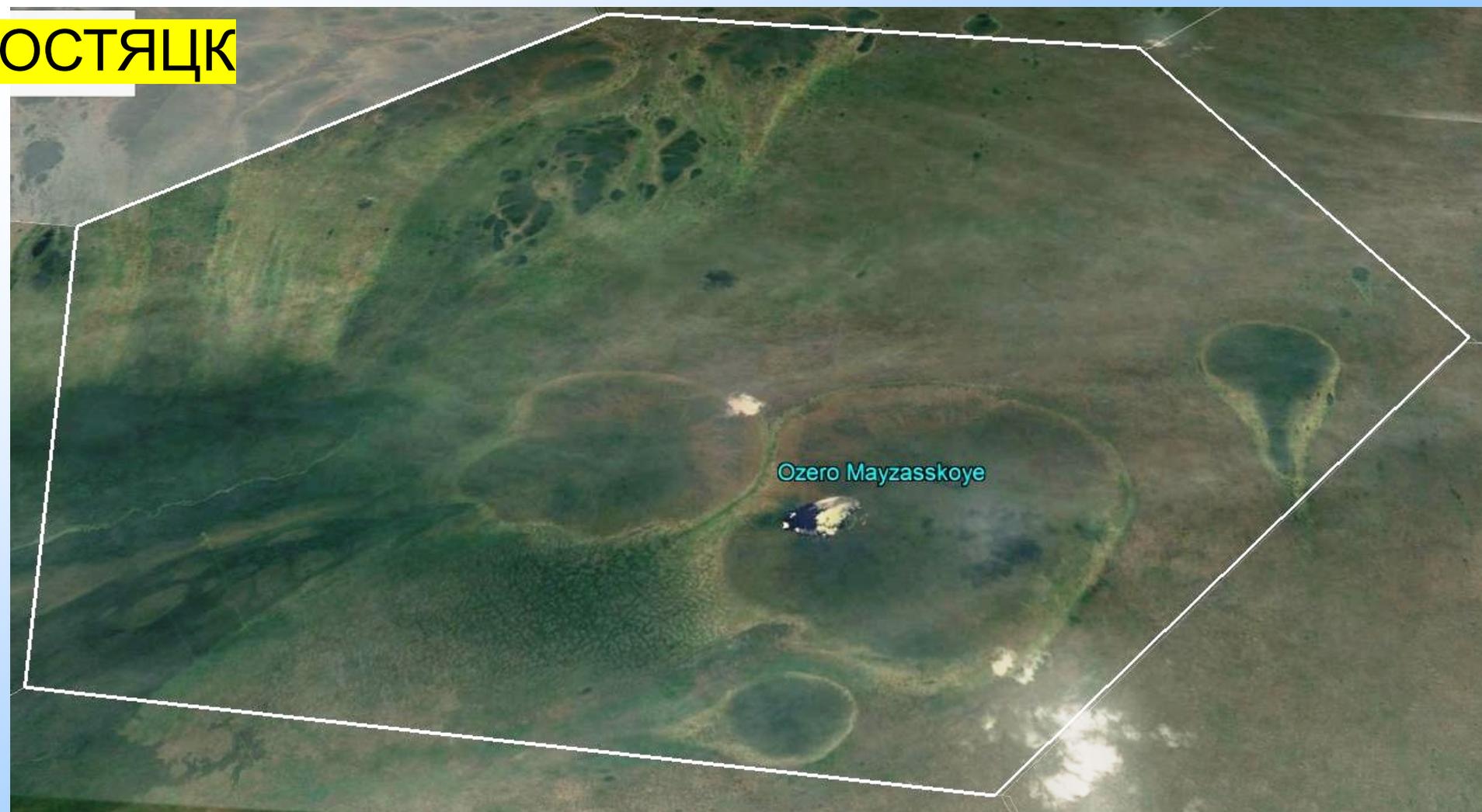
Васюган



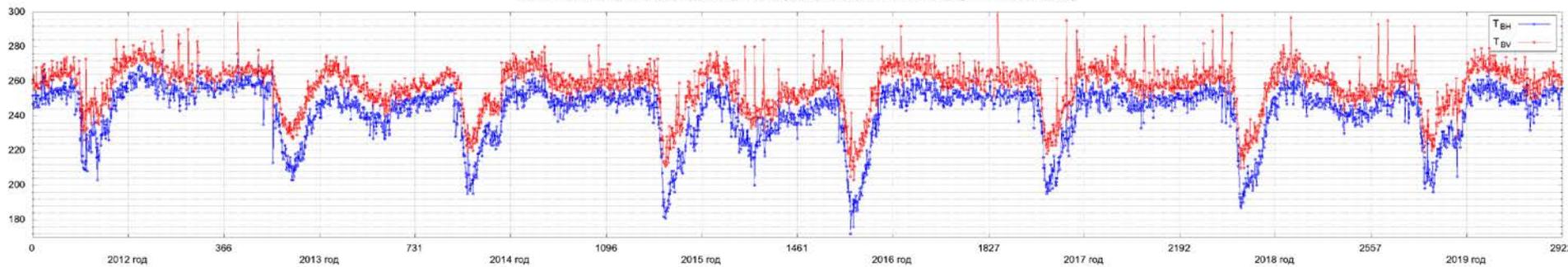
Динамика радиояростной температуры поверхности на участке наблюдения DGGID 4020238 [57,513 с.ш., 75,575 в.д.]



ОСТЯЦК



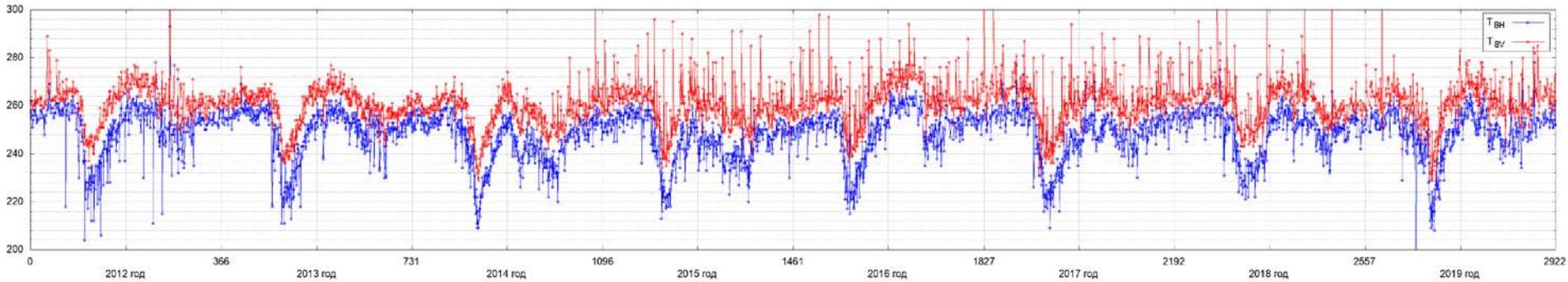
Динамика радиояростной температуры поверхности на участке наблюдения DGGID 4021253 [56.942 с.ш., 77.728 в.д.]



МУХРИНО



Динамика радиояростной температуры поверхности на участке наблюдения DGGID 4021820 [60,941 с.ш., 66,654 в.д.]

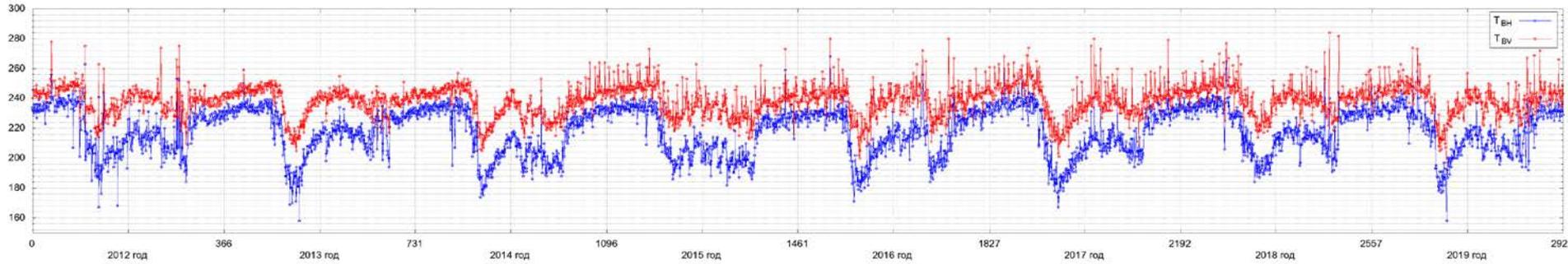


МУХРИНО



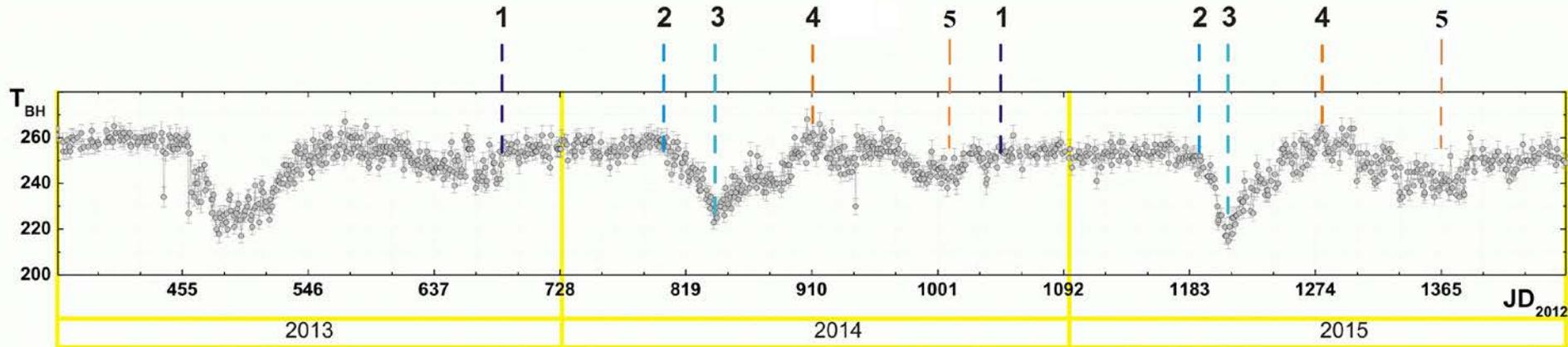
Earth
Copernicus
Satellite
Imaging
Technologies

Динамика радиояростной температуры поверхности на участке наблюдения DGGID 4019774 [60,765 с.ш., 85,248 в.д.]



Анализ сезонных вариаций яркостных температур

Сезонная динамика яркостных температур имеет характерный повторяющийся из года в год вид:



1-2 – "Зимнее" плато – период примерно с начала ноября по конец марта, в течение которого яркостные температуры имеют постоянные (в пределах доверительных интервалов) значения около 255 К или обнаруживают слабовыраженный положительный тренд в течение этого периода.

2-3 – «Весеннее таяние» - быстрый (10-30 дней) «спад» до значений около 220 К, вероятно связанный с покрытием большей части подстилающей поверхности жидкой влагой, в результате таяния сезонного снежного покрова, вскрытия рек ото льда. Минимальные значения держатся, как правило, не более 2-5 дней, т.е. отрицательная динамика достаточно резко сменяется положительной. Рост происходит чуть медленнее и не во всех случаях монотонно.

3-4 – «Летний период 1» - в разные годы наблюдается разная динамика $T_{\text{Я}}(\text{JD})$, вид которой зависит от вегетационных циклов болотной растительности (точка 4 - максимальное значение $T_{\text{Я}}$, может соответствовать максимальному усыханию заболоченной территории или максимальному развитию болотной растительности и экранированию ею водной поверхности).

4-5 – «Летний период 2» - увядание растительности.

5-1 – «Осенне-зимнее промерзание» болотной толщи. Вид сезонной динамики радиояркостных температур зависит от особенностей промерзания болотной толщи как многослойной системы, состоящей из слоев живой растительности, отмершей растительности и почвы.

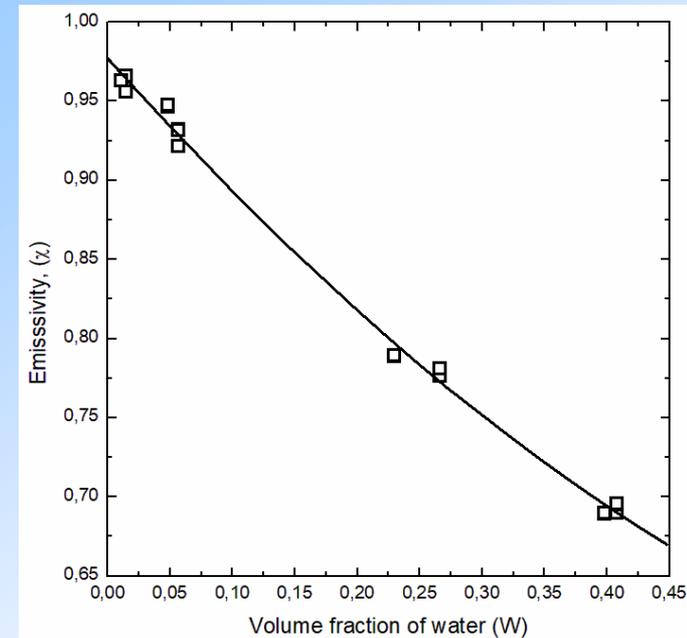
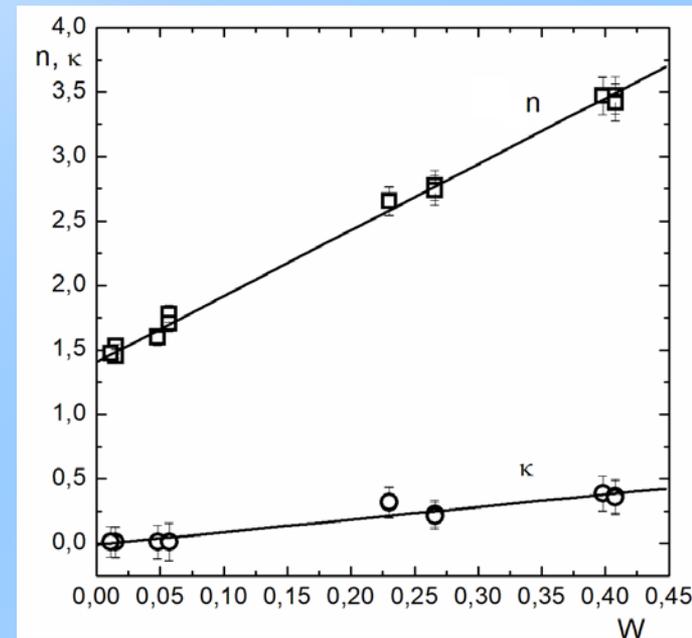
Сезонная динамика Тя(JD) болота в «летне-осенний период» может быть связана с изменением диэлектрических и радиоизлучательных характеристик надводной травяной растительности (в результате увядания).

Зависимости показателей преломления (n) и поглощения (κ) от влажности болотной растительности (рогоз).

$$n = 1,4066 + 5,11458 \times W, \sigma = 0,577, R^2 = 0,997$$

$$\kappa = (-0,0094 \pm 0,041) + 0,97306 \times W, \sigma = 0,34, R^2 = 0,97$$

R is the correlation coefficient,
 σ is the standard deviation.



Зависимость коэффициента излучения от влажности болотной растительности (рогоз).

$$\chi = 0,97741 - 0,88627 \times W + 0,44479 \times W^2, \sigma = 0,007, R^2 = 0,997$$

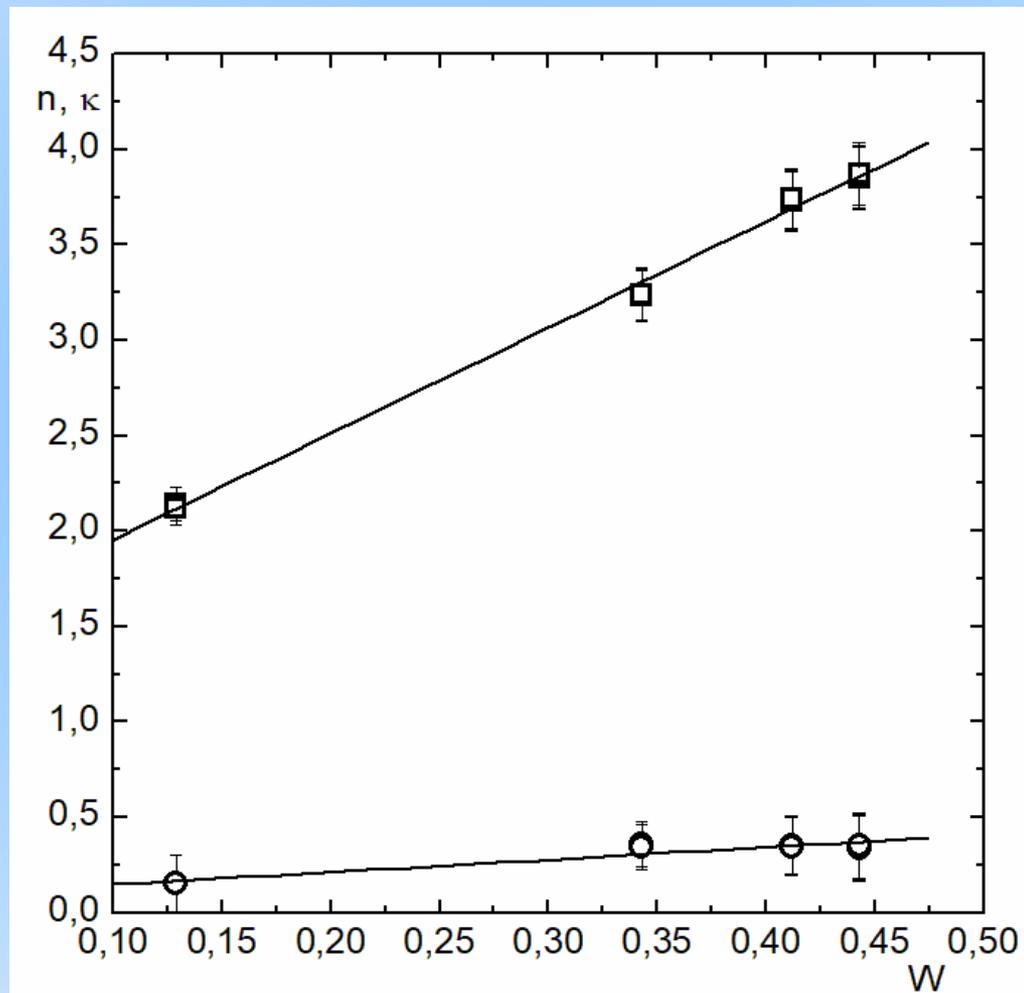
Сезонная динамика Тя(JD) заболоченной территории также может быть связана с изменением диэлектрических и радиоизлучательных характеристик древесной растительности при пожелтении и опадании ЛИСТВЫ.

Зависимости показателей преломления (n) и поглощения (κ) от объемной влажности (лист березы)

$$n = 1,40143 + 5,55163 \times W,$$
$$\sigma = 0,045, R^2 = 0,998$$

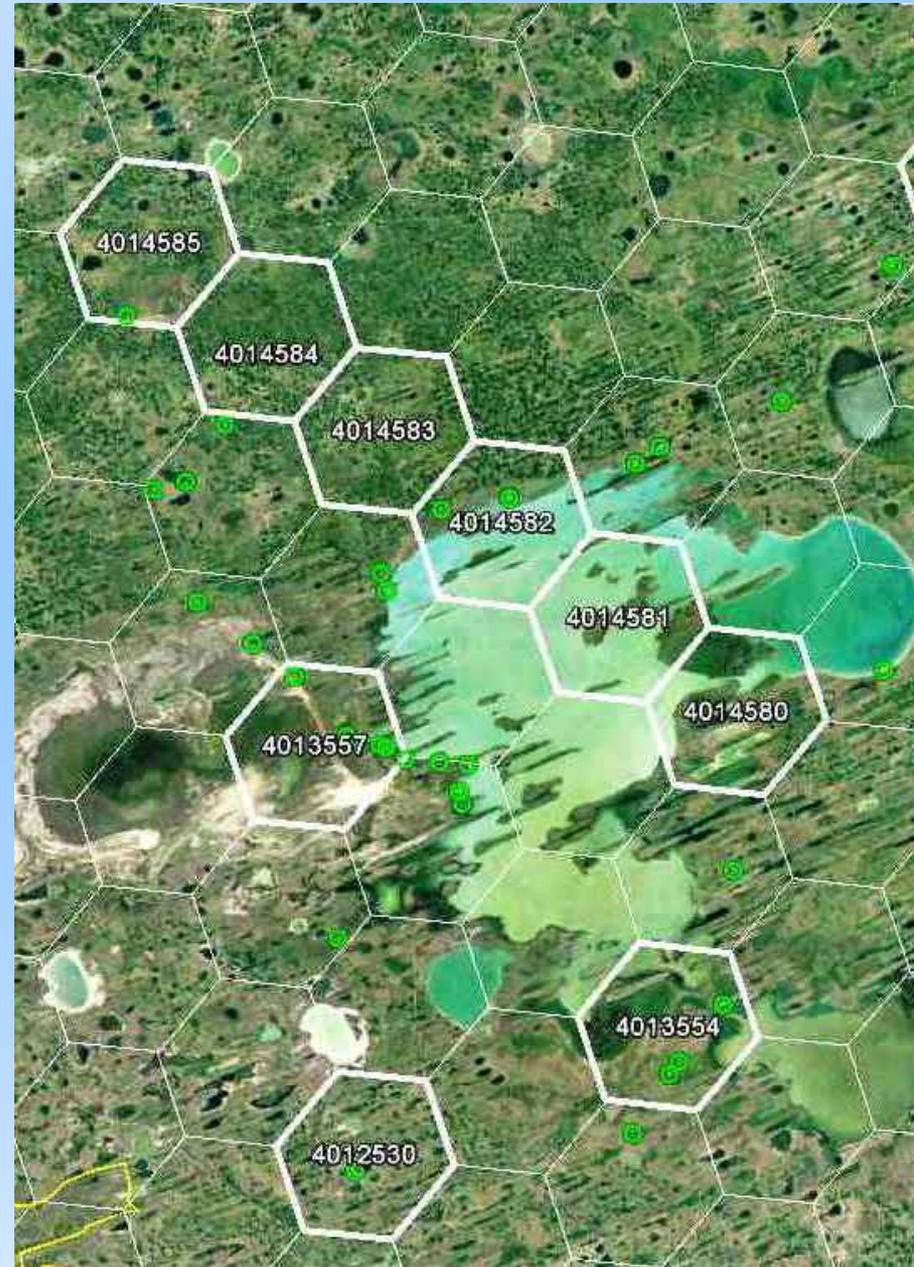
$$\kappa = 0,08498 + 0,64314 \times W,$$
$$\sigma = 0,045, R^2 = 0,941$$

Лист	Wv	Rp	Rs
зеленый	0,443	0,7	0,257
желто-зеленый	0,343	0,596	0,253
желтый	0,412	0,646	0,234
лист коричневый	0,129	0,599	0,469



Чановская озерная система (Новосибирская область)

1. Чановская озерная система включает в себя крупнейшее в России горько-соленое озеро Чаны и прилегающие к озеру заболоченные и подтопленные территории.
2. Площадь озера, достигающая **2269** квадратных километров, непостоянна, и в разные периоды года может заметно изменяться.
3. Циклические колебания уровня воды в озере связаны с климатическими изменениями, вызывающими возникновение периодов повышенной влажности и засухи.
4. На прилегающих к озеру территориях наблюдаются изменения почвенно-растительного покрова, процессы засоления, осолонцевания и осолодения почв.



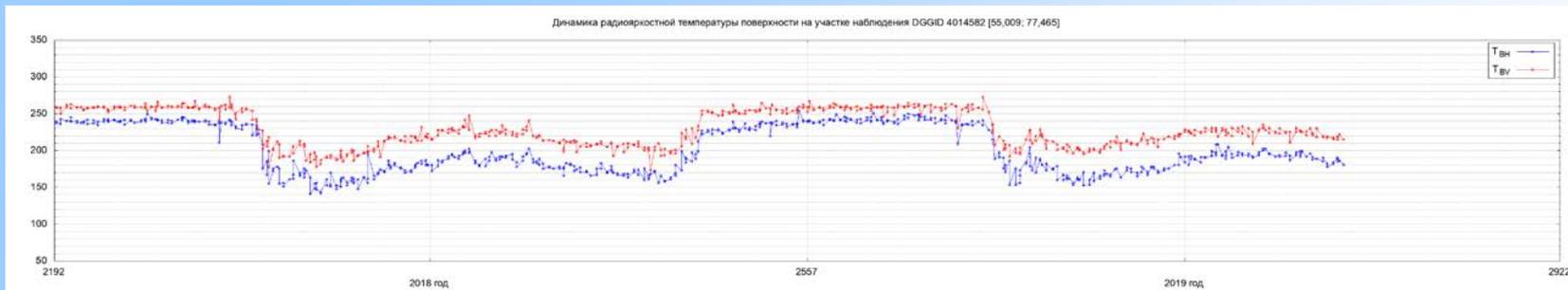
Водная поверхность



4014581



4014582



Почвенный покров и растительность



4014583



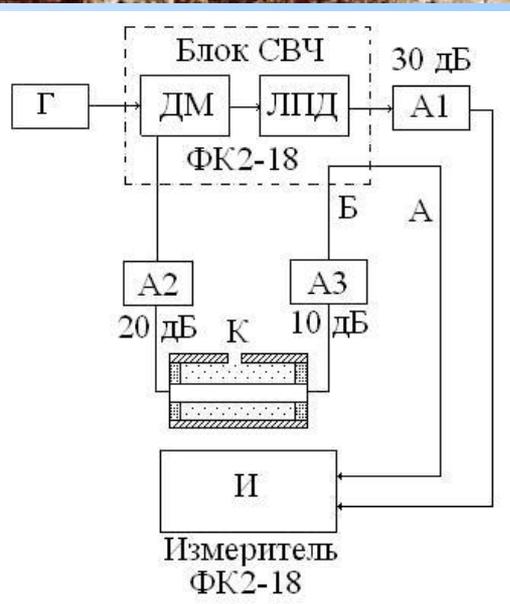
4014584



4014585



Солончак с произрастающим на нем солеросом (*Salicornia perennans* Willd)



На лабораторной установке мостового типа, созданной на основе измерителя разности фаз ФК2-18, измеряли на частоте 1.413 ГГц диэлектрические характеристики образцов воды, засоленной почвы и солелюбивой растительности.

Г – генератор сигналов высокочастотный Г4-78 (1.16-1.78 ГГц), ДМ – делитель мощности согласованный, ЛПД – линия переменной длины, А1, А2, А3 – аттенюаторы согласующие коаксиальные, И – измерительный блок фазометра, К – контейнер для образца, изготовленный в виде коаксиального волновода.

По данным диэлектрических измерений рассчитали регрессионные зависимости $\chi(W)$

Солончак (1):

$$\chi = (0.946 \pm 0.003) - (0.69 \pm 0.056) \cdot W - (3.16 \pm 0.30) \cdot W^2 + (4.73 \pm 0.41) \cdot W^3, R=0.997, \sigma=0.007,$$

Солерос (2):

$$\chi = (0.999 \pm 0.006) - (0.47 \pm 0.098) \cdot W - (3.65 \pm 0.41) \cdot W^2 + (4.26 \pm 0.48) \cdot W^3, R=0.996, \sigma=0.011,$$

Обратные зависимости

Солончак

$$W = (1.74 \pm 0.09) - (5.11 \pm 0.44) \cdot \chi + (6.25 \pm 0.66) \cdot \chi^2 - (2.94 \pm 0.32) \cdot \chi^3, R=0.996, \sigma=0.007,$$

Солерос

$$W = (1.28 \pm 0.08) - (3.21 \pm 0.38) \cdot \chi + (3.84 \pm 0.58) \cdot \chi^2 - (1.9 \pm 0.28) \cdot \chi^3, R=0.995, \sigma=0.010,$$

Обобщенная зависимость

$$\chi = (0.984 \pm 0.005) - (1.186 \pm 0.005) \cdot W,$$

$$R = 0.979, \sigma = 0.03,$$

Обратная обобщенная зависимость

$$W = (0.802 \pm 0.08) - (0.8086 \pm 0.017) \cdot \chi,$$

$$R = -0.979, \sigma = 0.027,$$

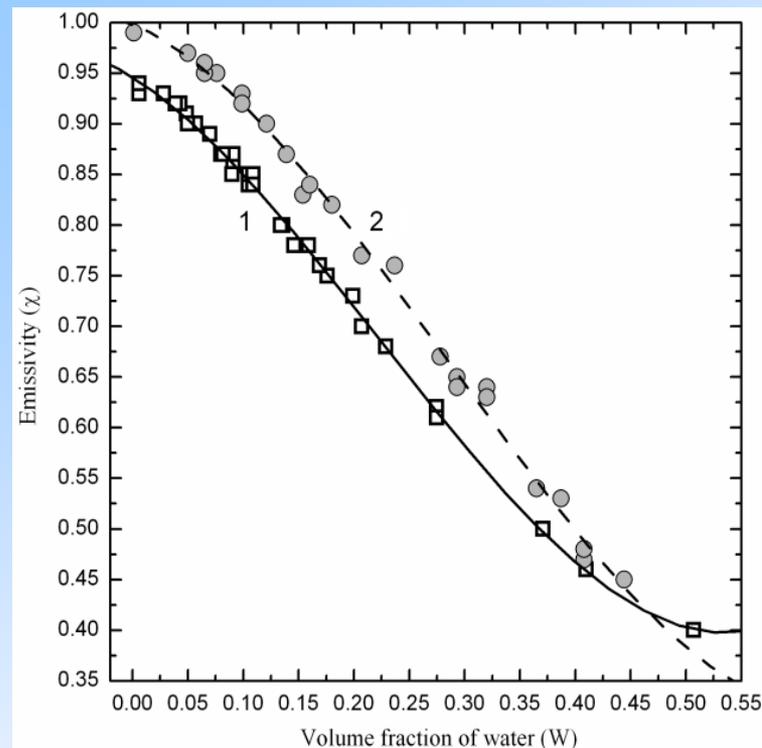


TABLE 1. Granulometric Composition and Texture

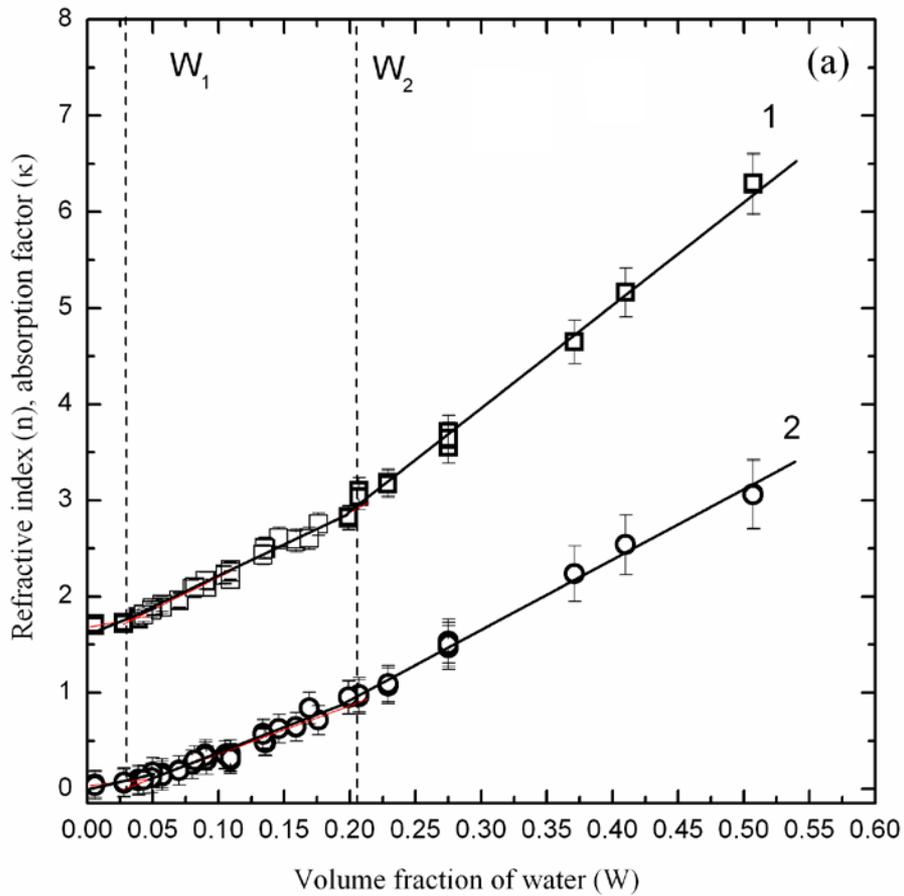
Percentage of particles of different size (mm)						USD ¹
1-0.25	0.25-0.05	0.05-0.01	0.01-0.005	0.005-0.001	<0.001	
4.1	23.22	25.24	21.12	9.64	16.68	Sandy Clay Loam

TABLE 2. Results Of Chemical Analysis Of SS And SPW Water Extract, [mg/kg]

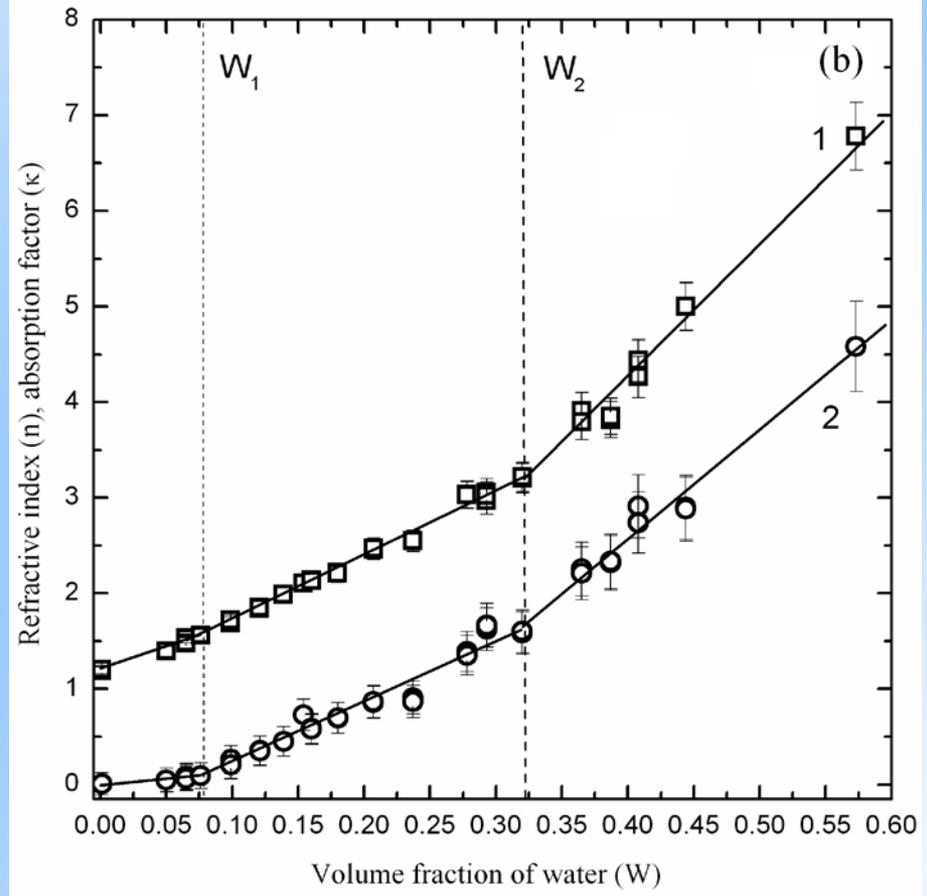
Sample	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	F ₂	Br ⁻	NH ₄ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	Amount of salts mg/kg
SS	130±4	145±4	674±23	16,9±0,5	1400±350	750±188	1,9±0,5	2,7±0,7	4,1±0,1	<0,1	<0,1	3125
SPW	297±9	1362±34	10008±340	1107±32	20234±5058	2078±520	84±21	92±9	518±17	19±5	<0,1	33848

Saline soil (SS), *Salicornia perennans* Willd (SPW)

Солончак



Солерос



Зависимости показателей преломления (1) и поглощения (2) для солончака и солероса при температуре образца $t = 25 \pm 1^\circ\text{C}$.

$$(n, \kappa) = \begin{cases} A1, W = 0, \\ A1 + A2 \cdot W, 0 < W \leq W_1, \\ A3 + A4 \cdot W, W_1 < W \leq W_2, \\ A5 + A6 \cdot W, W_2 < W \leq W_{\max}. \end{cases}$$

Sample	SS		SPW	
	N	κ	n	κ
W	0÷0.03		0÷0.08	
A1	1.67899	0.03369	1.18458	0.00376
A2	2.56084	1.41439	4.72697	1.07712
R	0.88	0.88	0.988	0.97
σ	0.34	0.2	0.49	0.07
W	0.03÷0.21		0.08÷0.32	
A3	1.52537	-0.14507	1.04094	-0.41895
A4	6.76797	5.05347	6.74667	6.38449
R	0.99	0.96	0.996	0.98
σ	0.39	0.35	0.43	0.57
W	0.21÷0.51		0.32÷0.57	
A5	0.71651	-0.50839	-1.27164	-2.05593
A6	10.80745	7.20219	13.83319	11.52528
R	0.995	0.996	0.98	0.98
σ	0.51	0.24	0.73	0.42

Используем рефракционную модель

$$(n, \kappa) = \sum_{i=1}^n (n_i, \kappa_i) \cdot W_i \quad n = \begin{cases} n_0, W = 0, \\ n_0 + (n_W^1 - 1) \cdot W, 0 < W \leq W_1 \\ n_1 + (n_W^2 - 1) \cdot (W - W_1), W_1 < W \leq W_2, \\ n_2 + (n_W^3 - 1) \cdot (W - W_2), W_2 < W \leq W_{MAX}, \end{cases} \quad \kappa = \begin{cases} \kappa_0, W = 0, \\ \kappa_0 + \kappa_W^1 \cdot W, 0 < W \leq W_1, \\ \kappa_1 + \kappa_W^2 \cdot (W - W_1), W_1 < W \leq W_2, \\ \kappa_2 + \kappa_W^3 \cdot (W - W_2), W_2 < W \leq W_{MAX}, \end{cases}$$

$$n_1 = n_0 + (n_W^1 - 1) \cdot W_1, \quad \kappa_1 = \kappa_0 + \kappa_W^1 \cdot W_1,$$

$$n_2 = n_1 + (n_W^2 - 1) \cdot W_2, \quad \kappa_2 = \kappa_1 + \kappa_W^2 \cdot W_2,$$

1) $W = W_1$:

$$n_W^1 = 1 + (n_1 - n_0) / W_1$$

$$\kappa_W^1 = (\kappa_1 - \kappa_0) / W_1$$

2) $W = W_2$:

$$n_W^2 = 1 + (n_2 - n_1) / (W_2 - W_1)$$

$$\kappa_W^2 = (\kappa_2 - \kappa_1) / (W_2 - W_1)$$

3) $W = W_{MAX}$ (not shown in Fig. 1):

$$n_W^3 = 1 + (n_{MAX} - n_2) / (W_{MAX} - W_2)$$

$$\kappa_W^3 = (\kappa_{MAX} - \kappa_2) / (W_{MAX} - W_2)$$

	n_1	κ_1	n_2	κ_2	n_3	κ_3
SS	1.76	0.08	2.95	0.92	6.23	3.16
SPW	1.56	0.09	3.20	1.62	6.61	4.51

	n_W^1	κ_W^1	n_W^2	κ_W^2	n_W^3	κ_W^3
SS	3.56	1.41	7.62	4.67	11.94	7.50
SPW	5.73	1.08	7.82	6.39	14.65	11.56
σ	0.38	0.31	0.03	0.27	0.19	0.35

ВЫВОДЫ:

1. Спутниковые данные:

- Анализ спутниковых данных SMOS, наземных и лабораторных измерений позволяет выявить сезонные изменения микроволнового излучения ветландов.
- Пространственно-временные вариации радиояркостных температур подстилающей поверхности зависят от площадей разных типов поверхности, попадающих в пиксель спутникового радиометра, их радиоизлучательных характеристик, которые, в свою очередь, зависят от температуры и минерализации воды, температуры и влажности почв, характеристик растительности.
- Для болот Западной Сибири выделено четыре временных периода, в каждом из которых зависимости $T_{\text{я}}(\text{JD})$ различаются.

2. Результаты лабораторных измерений диэлектрических характеристик:

- Три категории воды, идентифицированные в SS и SPW, различаются по диэлектрическим свойствам;
- Качественное подобие зависимостей $n(W)$ и $k(W)$ связано с одинаковым составом ионов растворенных минеральных солей во влаге SS и соке растений SPW;
- Различие в зависимостях диэлектрических свойств связанной и свободной воды в SS и SPW обусловлено разной объемной долей связанной и свободной воды, а также разной концентрацией растворенных минеральных солей;
- Для описания зависимостей $n(W)$ и $k(W)$ SS и SPW от объемной доли воды использована рефракционная модель.



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

Исследования проведены в ходе выполнения государственных заданий ИВЭП СО РАН, ИКИ РАН, при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 18-05-00753 "Поиск, экспериментальное и теоретическое обоснование дистанционных радиофизических маркеров гидролого-климатических изменений в Северной Евразии на основе ежедневных данных спутникового микроволнового зондирования для прогнозирования опасных природных явлений", № 20-05-00198-а «Спутниковая микроволновая радиометрия эстуариев российской Арктики – анализ гидрологического режима в период ледостава»), темы «Мониторинг» гос. регистрация № 01.20.0.2.00164 .