

XXI международная конференция  
"Современные проблемы дистанционного  
зондирования Земли из космоса"  
13 - 17 ноября 2023 г.

Романов А.Н., Плуталова Т.Г., Романов Д.А., Рябинин И.В., Трошкин Д.Н., Хвостов И.В.

# К РАЗРАБОТКЕ ДИСТАНЦИОННЫХ МИКРОВОЛНОВЫХ ИНДИКАТОРОВ СОСТОЯНИЯ ЛЕСА

Институт водных и экологических проблем СО РАН,

656038, Алтайский край, Барнаул, ул. Молодежная, д. 1, тел.: +7-(385-2)66-64-62, romanov\_alt@mail.ru

## Актуальность

На Земном шаре территории, занятые древесной растительностью, занимают треть площади Суши. Лес как важнейший биологический ресурс в значительной степени определяет условия существования человека на планете, повышает качество жизни, участвует в круговоротах воды и углерода в природе.

Леса подвергаются различным природным и техногенным опасностям, в том числе таким катастрофическим как засухи и лесные пожары, представляющие реальную угрозу для жизни проживающего поблизости населения, а также для всех видов живых существ (флоры и фауны), оказавшихся в зоне распространения пожара.

На больших по площади лесных территориях с малым количеством наблюдательных пунктов лесоохраны возникает необходимость организации дистанционных наблюдений в оптическом, инфракрасном и микроволновом диапазонах со спутников, самолетов, беспилотных летательных аппаратов.



# Дистанционное зондирование как способ получения объективной информации о состоянии леса

Наибольшее распространение и широкое практическое применение нашли методы дистанционного зондирования леса в оптическом и инфракрасном диапазонах [1-3], используемые для картирования леса, оценки экологического состояния, своевременного выявления опасностей и угроз.

К настоящему времени разработаны методы дистанционного микроволнового зондирования лесов [4, 5], созданы модели радиоизлучения лесных пожаров [6, 7].

Однако, несмотря на значительное количество научных публикаций по данной теме, проблема разработки высокоточных, оперативных методов дистанционного мониторинга лесных пожаров и прогнозирования пожарной опасности остается актуальной и в настоящее время.

В данной работе сделана попытка исследовать некоторые особенности поведения радиоярких температур (Тя) лесных массивов до, во время, и после крупных лесных пожаров, разработать микроволновые индикаторы сухости леса на основе ежедневных спутниковых измерений Тя.

1. Котельников Р.В., Лупян Е.А. Особенности дистанционно оцениваемых распределений площадей лесных пожаров для территорий с различным уровнем пожарной охраны // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. №4. С. 75–87.
2. Лозин Д.В., Лупян Е.А., Балашов И.В., Барталев С.А. Оценка гибели северных лесов от пожаров в XXI веке на основе анализа данных прибора MODIS об интенсивности горения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. №2. С. 292–301
3. Лупян Е.А., Лозин Д.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Стыценко Ф.В. Исследование зависимости степени повреждений лесов пожарами от интенсивности горения по данным спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. №3. С. 217–232.
4. Chukhlantsev A.A., Shutko A.M., Golovachev S.P., Attenuation of electromagnetic waves by vegetation canopies, Journal of Communications Technology and Electronics. V. 48. No. 11. P. 1177-1202, 2003.
5. Чухланцев А.А., Головачев С.П. оценки затухания радиоволн диапазона 3-300 см в растительных покровах, Лесной вестник (1997–2002). 2002. № 1. С. 112-117  
Чухланцев А.А., Шутко А.М. “Особенности определения влажности почвы СВЧ-радиометрическим методом в лесных районах”, /Исследование Земли из космоса, 2012. № 2. С. 3.
6. Саворский В.П., Каевецер В.И., Кибардина И.Н., Маклаков С.М., Панова О.Ю., Чухланцев А.А. СВЧ радиометрическая модель очага возгорания лесного пожара // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 137-144.
7. Кибардина И.Н., Саворский В.П., Кузнецов О.О., Маклаков С.М., Панова О.Ю., Чухланцев А.А. Развитие СВЧ-радиометрической модели очага пламени лесного пожара //Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 79–88.

## Исследуемая территория

Для выявления особенностей поведения радиоизлучательных характеристик леса исследовались сезонные вариации. Три тестовых участка (рис. 1):

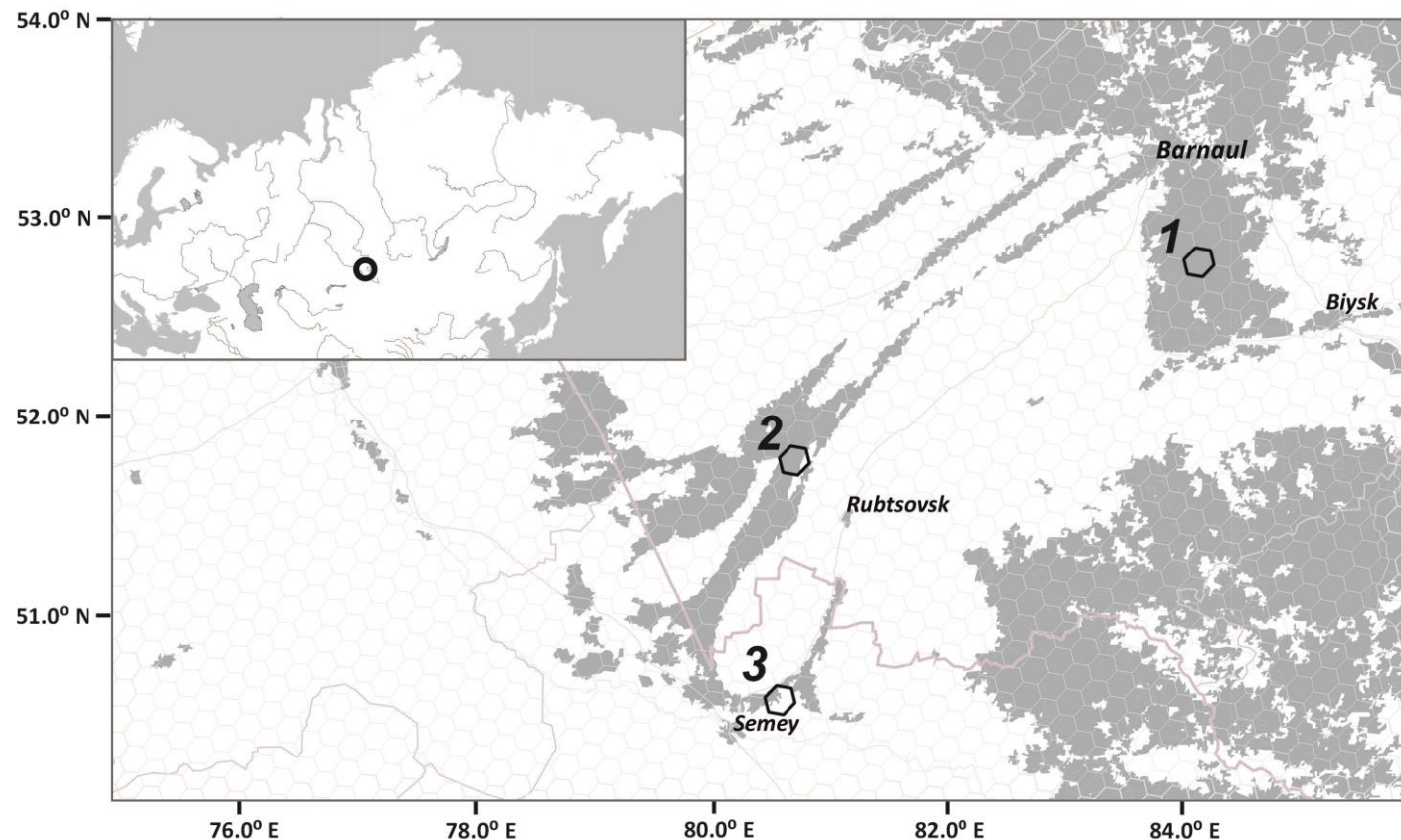
1. Приобский бор, состоящий из 70% лиственных (берёза, осина) и 30% хвойных (сосна) пород деревьев;

2. Реликтовый ленточный бор (Алтайский край, Российская Федерация), в период лесного пожара (19-23.06.2023) на площади 97 км<sup>2</sup>;

3. Сосновый бор (Республика Казахстан) в период лесного пожара (08-12.06.2023) на площади 600 км<sup>2</sup>.

Экспедиционное обследование проводили в Алтайском крае в Приобском и Сростинском борах.

Основные породы деревьев в Приобском бору – береза, осина, сосна, кустарники, в Сростинском бору - сосна.



Карта-схема тестовых участков:

- 1 – Приобский бор,
- 2 – ленточный бор (Сросты, Алтайский край),
- 3 – сосновый бор (Абайская область (Республика Казахстан))

## Постановка задачи

Методы дистанционного микроволнового зондирования основаны на использовании моделей микроволнового излучения леса, представленного как многослойная неоднородная система с изменяющимися в пространстве и времени диэлектрическими характеристиками каждого из слоев (кроны высоких деревьев, подлесок, кустарник, трава, лесной опад, перегной, почва).

Микроволновое излучение леса будет зависеть от свойств каждого слоя, в том числе: температуры, биомассы (сплоченности, густоты леса, диаметров и плотности древесной растительности, объемных долей элементов дерева (стволов, веток, хвои, листьев), фазового состава и диэлектрических характеристик воды в древесине, температуры, влажности и гранулометрического состава почвы, определяющего объемную долю связанной воды в почве.



Наличие значительного числа параметров, оказывающих влияние на микроволновое излучение леса, их пространственно-временная неоднородность, зависимость от фенологических особенностей и периодов вегетации, сезонные и годовые вариации, значительно затрудняют интерпретацию данных дистанционного микроволнового мониторинга леса.

## Постановка задачи

В настоящее время  $T_B$  леса рассчитывается с использованием общепринятой  $(\tau-\omega)$ -модели, имеющей следующий вид (Kerr, 2012):

$$T_{\text{Я}} = (1 - \omega)(1 - \gamma)(1 + \gamma r_{\text{ПР}})T_{\text{Р}} + (1 - r_{\text{ПР}})\gamma T_{\text{П}}. \quad (1)$$

Здесь  $T_{\text{Р}}$ ,  $T_{\text{П}}$  – эффективные температуры растительности и почвы,  $r_{\text{ПР}}$  – коэффициент отражения подстилающей поверхности,  $\omega = 0,05-0,20$  – альbedo однократного рассеяния леса,  $\gamma = \exp(-\tau/\cos\theta)$ ,  $\tau = 0 - 3$  – оптическая толщина растительности, характеризующая ослабление растительностью микроволнового излучения подстилающей поверхности,  $\theta$  – угол зондирования.

Формулу (1) используют, в основном, для оценки влажности почвы, находящейся под лесным пологом. При зондировании под углом  $\theta$  влияние почвы на микроволновое излучение подстилающей поверхности уменьшается с увеличением  $\tau$ . Для расчета  $\tau$  используют соотношение (Schmugge and Jackson, 1992)

$$\tau = (4\pi/\lambda) H \operatorname{Im}\sqrt{\varepsilon} = (4\pi/\lambda) H (\operatorname{Im}(n + i \cdot \kappa) = (4\pi/\lambda) H \kappa,$$

где  $H$  – высота растительности,  $\lambda$  – длина волны,  $\varepsilon'$ ,  $\varepsilon''$  – действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости (КДП)  $\varepsilon = \varepsilon' + i \cdot \varepsilon''$ ,  $\sqrt{\varepsilon} = n + i\kappa$ ,  $\varepsilon' = n^2 - \kappa^2$ ,  $\varepsilon'' = 2n\kappa$ ,  $n$ ,  $\kappa$  – показатели преломления и поглощения.

Применение микроволновых методов определения влажности почвы под пологом леса возможно при малых значениях  $\tau$  и проблематично при увеличении  $\tau$  (уменьшении  $\gamma$ )

При высокой влажности леса и зондировании под углом,  $\gamma \Rightarrow 0$  (микроволновое излучение формируется в растительном слое, влияние влажности почвы и лесной подстилки несущественно).

Применение микроволновых методов определения влажности почвы под пологом густого леса проблематично вследствие малых значений  $\gamma$ . Лесная подстилка экранирует излучение почвы, будучи согласующим слоем, что приводит к значениям  $\gamma \approx 0$  (Чухланцев, Шутко, 2012).

В (Marselony et al., 2001) для леса установлена связь  $T_{\text{я}}(\text{ГГц}) = 0.97-0.99 T_{\text{я}}(\text{ИК})$ .

Согласно (Owe et al., 2001), при  $\tau > 0.75$ , коэффициент излучения кроны  $\chi_{\text{С}} > 0.9$ , а при  $\tau > 1.5$ ,  $\chi_{\text{С}} > 0.95$ .

В (Jones, 2011) показано, что  $\tau > 1.5$ ,  $\chi_{\text{С}} = 0.95-0.96$ , а  $\omega \approx 0.05$ , то есть, густой лесной покров по излучательным характеристикам приближается к абсолютно черному телу (АЧТ) с  $\chi_{\text{АЧТ}} = 1$ .

Густой лес используют в качестве природного репера для калибровки спутниковых и самолетных микроволновых радиометров, полагая,  $T_{\text{я}} = (1 - \omega)T = (1 - r)T = \chi T$ , где  $\chi = (1 - r)$ ,  $r$  – коэфф. отражения.

Таким образом, задача дистанционного мониторинга леса распадается на две задачи:

1. Дистанционная оценка характеристик подстилающей поверхности под слоем растительности
  2. Дистанционная оценка характеристик слоя растительности, желательно, без влияния подстилающей поверхности.
- В данной работе нас интересует вторая задача.

*Чухланцев А.А., Шутко А.М.* “Особенности определения влажности почвы СВЧ-радиометрическим методом в лесных районах”, *Исследование Земли из космоса*, 2012. № 2. С. 3.  
*G. Macelloni, S. Paloscia, P. Pampaloni and R. Ruisi*, “Airborne multifrequency L- to Ka-band radiometric measurements over forests”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, V. 39, no. 11, P.2507-2513, Nov. 2001, doi: 10.1109/36.964988  
*Owe M., R. de Jeu, J. Walker*, “A methodology for surface soil moisture and vegetation optical depth retrieval using the microwave polarization difference index”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, V. 39, no. 8, P.1643-1654, Aug. 2001, doi: 10.1109/36.942542 <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.10.022>.  
*Jones M.O., L.A. Jones, J.S. Kimball, K.C. McDonald*, Satellite passive microwave remote sensing for monitoring global land surface phenology”. *Remote sensing of environment*, V. 115, no. 4, P.1102-1114, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.12.015>.

# Методика исследований

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

Погрешность определения  $T_b$  изменяется от  $\pm 3$  К в центре до  $\pm 6$  К на краях полосы захвата шириной 890 км.

Съемка территории производится на горизонтальной и вертикальной поляризациях в диапазоне углов зондирования от 0 до  $55^\circ$ .

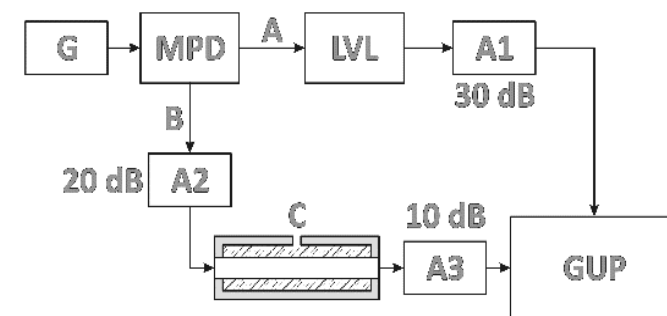
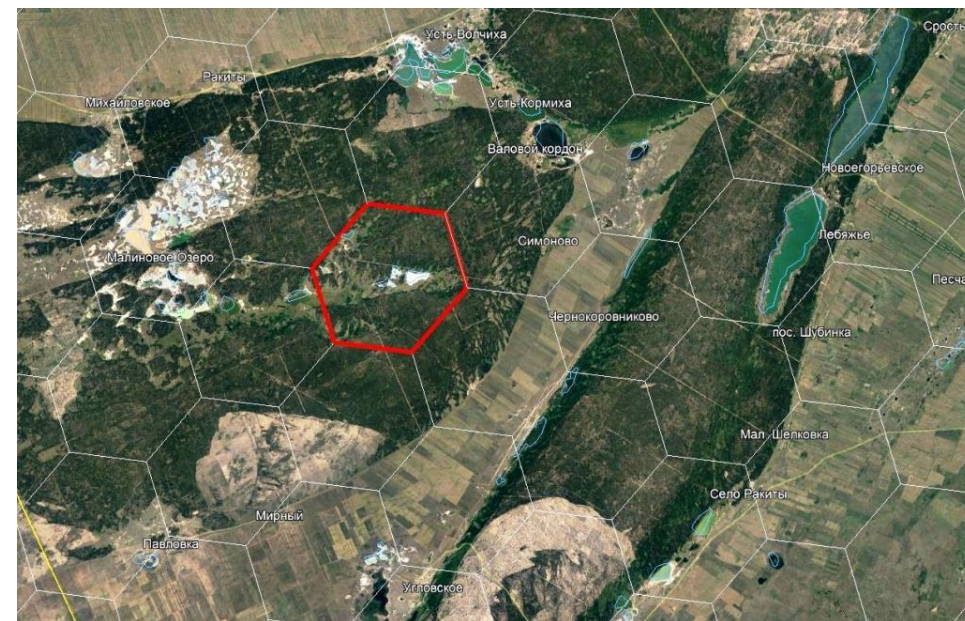
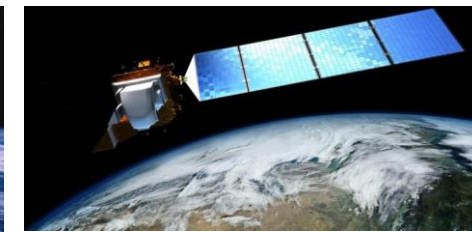
Разрешающая способность радиометра при зондировании под углом  $42.5^\circ$  45 км.

**Данные SMOS** привязаны к дискретной геодезической сетке DGG ISEA 4H9, состоящей из шестиугольных ячеек, покрывающих Земной шар. Размер ячейки 16 км.

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

**Полевые измерения:** измеряли температуру, отбирали пробы воды, почвы, растительности.

**В лабораторных условиях** измеряли диэлектрические характеристики отобранных образцов веток, хвои и листьев для установления зависимостей показателей преломления и поглощения от объемной влажности проводили на лабораторной установке мостового типа.



Блок-схема лабораторной установки на основе измерителя фаз ФК2-18.



## Результаты исследований

На рисунке приведена сезонная динамика  $T_{яв}$ ,  $T_{ян}$ ,  $T$  для Приобского бора.

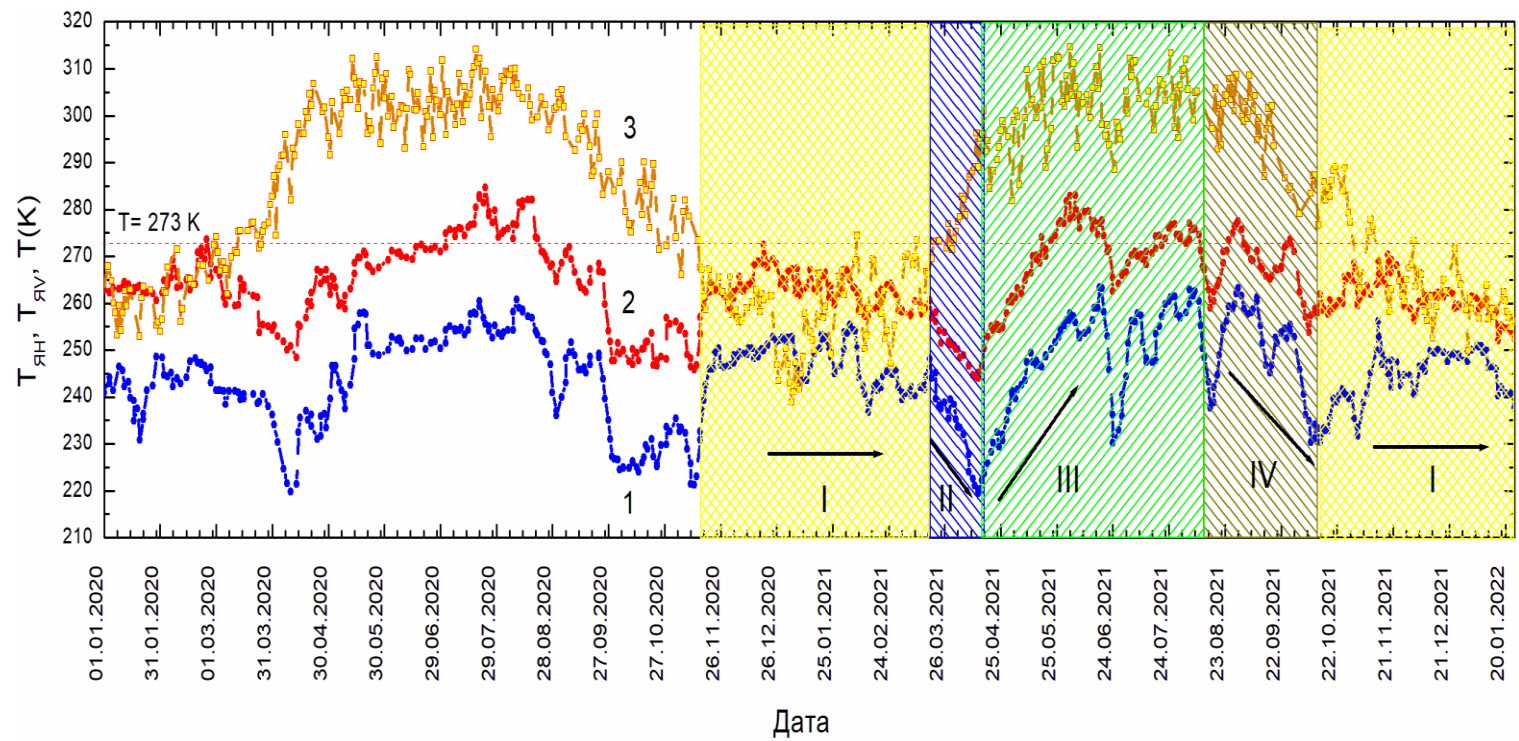
Выделяются периоды с разным поведением  $T_{яв}$  и  $T_{ян}$ , соответствующие разным фенологическим особенностям лесного массива и происходящим природным процессам:

I – холодный период (фаза покоя для древесных растений);

II – таяние снега, оттаивание почвы;

III – разворачивание листьев, развитие зеленой растительности;

IV – деградация, отмирание зеленой растительности.



Сезонная динамика  $T_{ян}$  (гор.) (1),  $T_{яв}$  (верт.) (2),  $T$  (3) для Приобского бора:  
I-IV – периоды с разным поведением  $T_{ян}$ ,  $T_{яв}$

На  $T_{яв}$  и  $T_{ян}$  оказывают влияние: в холодный период – вариации температуры ( $T$ ), в теплый период – вариации  $T$  и  $W$  почвы, влагосодержание растений, выпадение осадков.

Появление листвы и травяной растительности, экранирующей микроволновое излучение влажной почвы, способствует возрастанию  $T_{яв}$  и  $T_{ян}$ .

В конце лета и осенью опадание листвы ведет к уменьшению экранирующего влияния растительности на микроволновое излучение лесной подстилки и почвы, что, наряду с понижением  $T$  окружающей среды способствует уменьшению  $T_{яв}$  и  $T_{ян}$ .

Наблюдаемые на графиках заметные понижения  $T_{яв}$  и  $T_{ян}$  связаны с понижением  $T$  и дождевыми осадками.

## Реликтовый ленточный бор (Сросты)

На рисунке приведена сезонная динамика  $T_{я}$  геодезической ячейки, включающей в себя лесной массив, соленое озеро, а также несколько открытых степных участков.

В условиях пред-пожарной ситуации и угрозы лесного пожара наблюдаются высокие значения дневных температур и низкие значения влажности лесной подстилки и почвы.

Дневные температуры опавшей хвои) на освещенных солнцем участках достигали  $T = 320$  К, наблюдались предельно низкие значения объемной влажности лесной подстилки ( $W = 0.01 \text{ см}^3/\text{см}^3$ ) и нижележащей почвы ( $T = 309$  К,  $W = 0.01 \text{ см}^3/\text{см}^3$ ), меньшие максимальной доли связанной воды.

В то же время, объемные доли воды в ветках и хвое живых деревьев имели обычную влажность и составляли  $0.33$  и  $0.05 \text{ см}^3/\text{см}^3$ .

Зависимости  $T_{яV}(D)$  и  $T_{яH}(D)$  ( $D$  – число дней), полученные для исходных значений из продуктов SMOS L1C имеют вид:

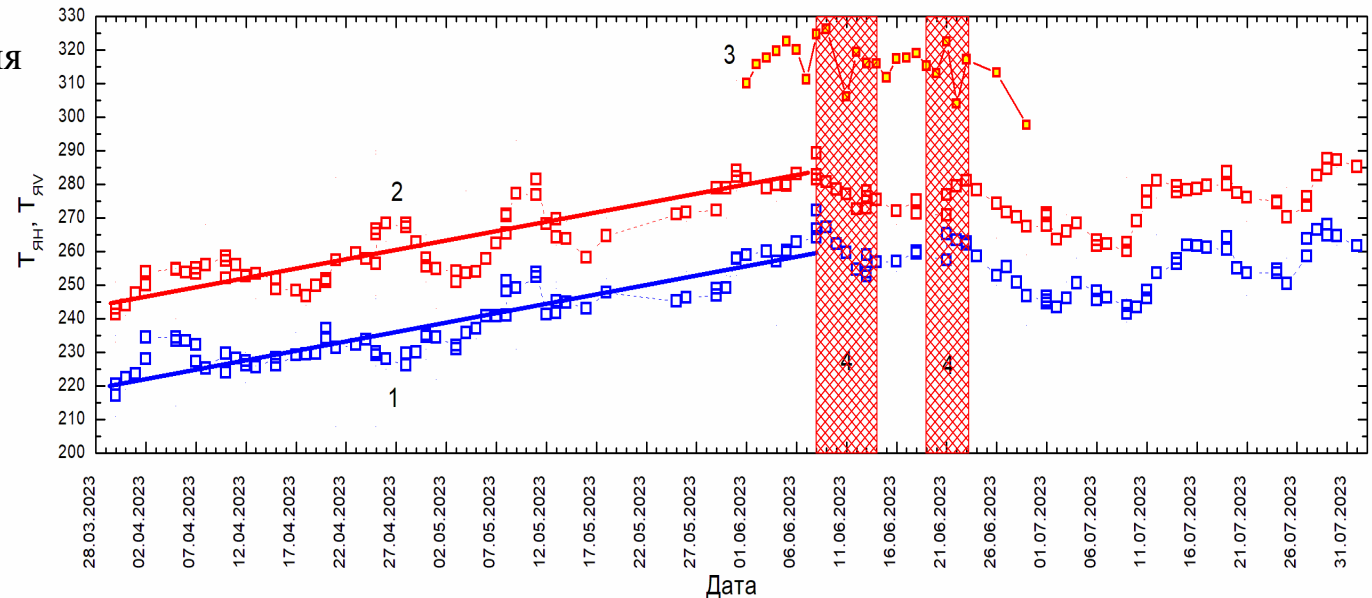
$$T_{яH} = (260.2 \pm 3.2) + (0.56 \pm 0.07) \cdot D,$$

$$T_{яV} = (282.8 \pm 3.6) + (0.52 \pm 0.08) \cdot D;$$

$D$  – количество суток от 28.03 до начала пожара (08.06.2023)

Результаты полевых измерений на тестовом участке леса, не охваченном пожаром.

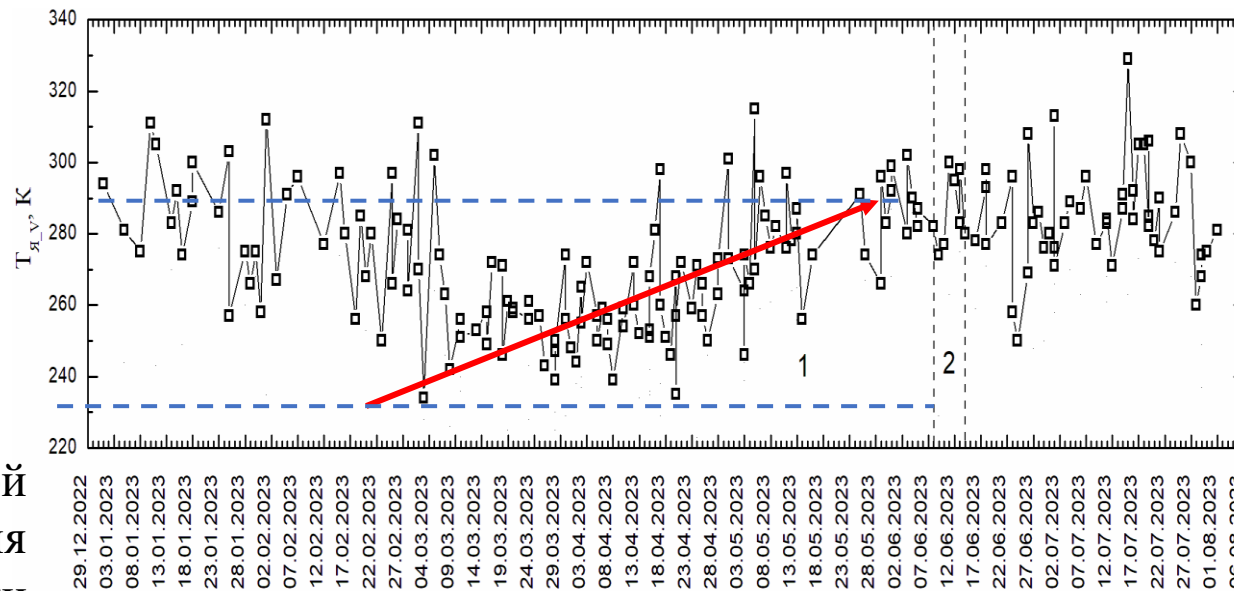
Объект	$W_V(\text{см}^3/\text{см}^3)$	$t^\circ\text{C}$
Живая хвоя	0,05	
Живые ветки	0,33	
Лесная подстилка (опавшая хвоя), $h = 1-2$ см	0,01	47
Песчаная почва под лесной подстилкой	0,01	29



Динамика  $T_{яH}$  (1),  $T_{яV}$  (2),  $T$  (3) реликтового ленточного бора (Сросты) в период лесных пожаров 08-14 и 19-22.06.2023 (4) на общей площади  $97 \text{ км}^2$ .



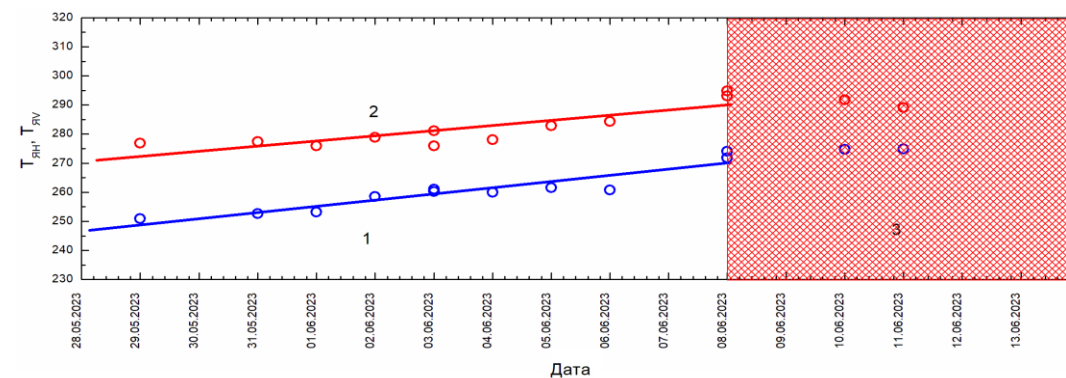
## Динамика радиояркой температуры $T_{Я\_ВЕРТ}$ , леса (Казахстан)



$T_{ЯV}$  и  $T_{ЯH}$ , зависящие от температуры и суммарной увлажненности территории, могут быть использованы для оценки потенциальной опасности возгорания, а скорости изменения ( $\Delta T_{ЯV}/\Delta D$ ) и ( $\Delta T_{ЯH}/\Delta D$ ) – для прогнозирования даты, начиная с которой в лесном массиве возникнут условия (высокая температура, малая влажность), необходимые для возгорания горючих лесных материалов.

Дистанционный микроволновый мониторинг лесных пожаров по спутниковым данным может быть в большинстве случаев проблематичен из-за большой площади пикселя и малой площади пожара (по сравнению с пикселем). При этом существует возможность выявления участков повышенной сухости (Кибардина и др., 2013).

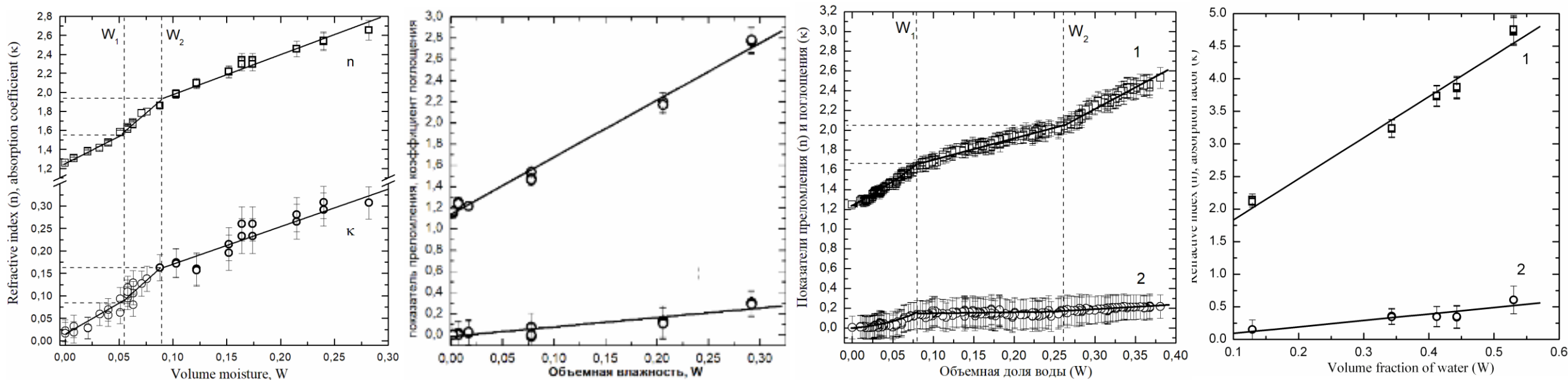
Лесной пожар, Казахстан 08-14.06. 2023, площадь пожара более 600 км<sup>2</sup>.



$$T_{Я\_гор} = (228 \pm 2,6) + (0,31 \pm 0,03) D ,$$

$$T_{Я\_верт} = (253 \pm 2,25) + (0,29 \pm 0,027) D$$

# Зависимости показателей преломления $n$ (1) и поглощения $\kappa$ (2) от $W$ для веток и хвои сосны, веток и листьев берёзы



Из графиков видно, что для веток при  $W_1$  and  $W_2$  происходит изменение поведения  $n$ ,  $\kappa$ . Это может быть вызвано существованием в живом дереве трех фаз воды, с разными Для примера приведем зависимости  $(n, \kappa)(W)$ , имеющие следующий вид:

1. Для веток сосны:

$$n = \begin{cases} 1,255 + 5,66 \cdot W, R = 0,99, \sigma = 0,85, & W \leq W_1, \\ 1,10 + 9,11 \cdot W, R = 0,97, \sigma = 0,66, W_1 \leq W \leq W_2, \\ 1,55 + 4,23 \cdot W, R = 0,98, \sigma = 0,73, W_2 \leq W \leq W_3, \end{cases} \quad (2) \quad \kappa = \begin{cases} 0,015 + 1,21 \cdot W, R = 0,92, \sigma = 0,4, & W \leq W_1, \\ -0,01 + 1,90 \cdot W, R = 0,81, \sigma = 0,5, & W_1 \leq W \leq W_2, \\ 0,83 + 0,86 \cdot W, R = 0,92, \sigma = 0,4, & W_2 \leq W \leq W_3, \end{cases} \quad (3)$$

$R$  – коэффициент корреляции,  $\sigma$  – среднеквадратическая погрешность,  $W_1 = 0,047$ ,  $W_2 = 0,094$ ,  $W_3 = 0,30$ .

2. Для хвои:  $n = 1,13878 + 5,37713 \cdot W, R = 0,994, \sigma = 0,06$ , (4),  $\kappa = 0,89231 \cdot W, R = 0,92, \sigma = 0,04$ . (5)

На рисунке приведены зависимости скин-слоёв  $L(W)$  для веток и хвои сосны, построенные по данным лабораторных измерений их диэлектрических характеристик при полном заполнении измерительного контейнера исследуемым образцом.

Зависимости  $L(W)$  имеют вид:

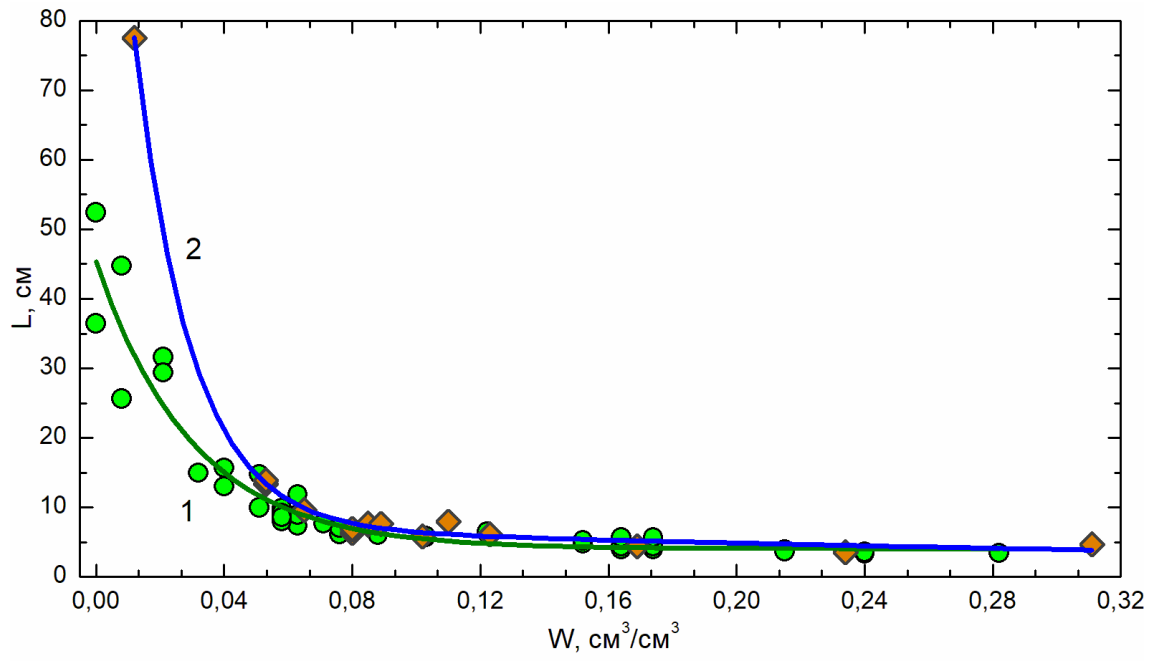
для веток:  $L = 4,06581 + 41,30567 \cdot \exp(-W/0,0301),$

для хвои:  $L = 139,54351 \cdot \exp(-W/0,01753) + 7,38335 \cdot \exp(-W/0,47949),$

Из графиков следует, что толщина скин-слоя  $L(W)$  изменяется при полном заполнении объема ветками – от 0,05 до 0,55 м, хвоей – от 0,05 до 0,78 м. В условиях леса относительный объем элементов дерева  $p < 0,03$  (Чухланцев, 2002).

Соответственно, в лесу толщина скин-слоя ( $L_{л}(W) = L(W)/Vp$ ) с учетом только веток и стволов будет изменяться от 1,66 м до 18,3 м (при уменьшении  $W$  от 0,30 до 0,0  $\text{см}^3/\text{см}^3$ ).

При зондировании под углом  $\theta = 42,5^\circ$  и средней высоте деревьев  $H > 18$  м, даже высохший лес будет заметным образом экранировать микроволновое излучение подстилающей поверхности.



Зависимости толщины скин-слоя  $L$  от  $W$  для веток (1) и хвои (2) сосны.

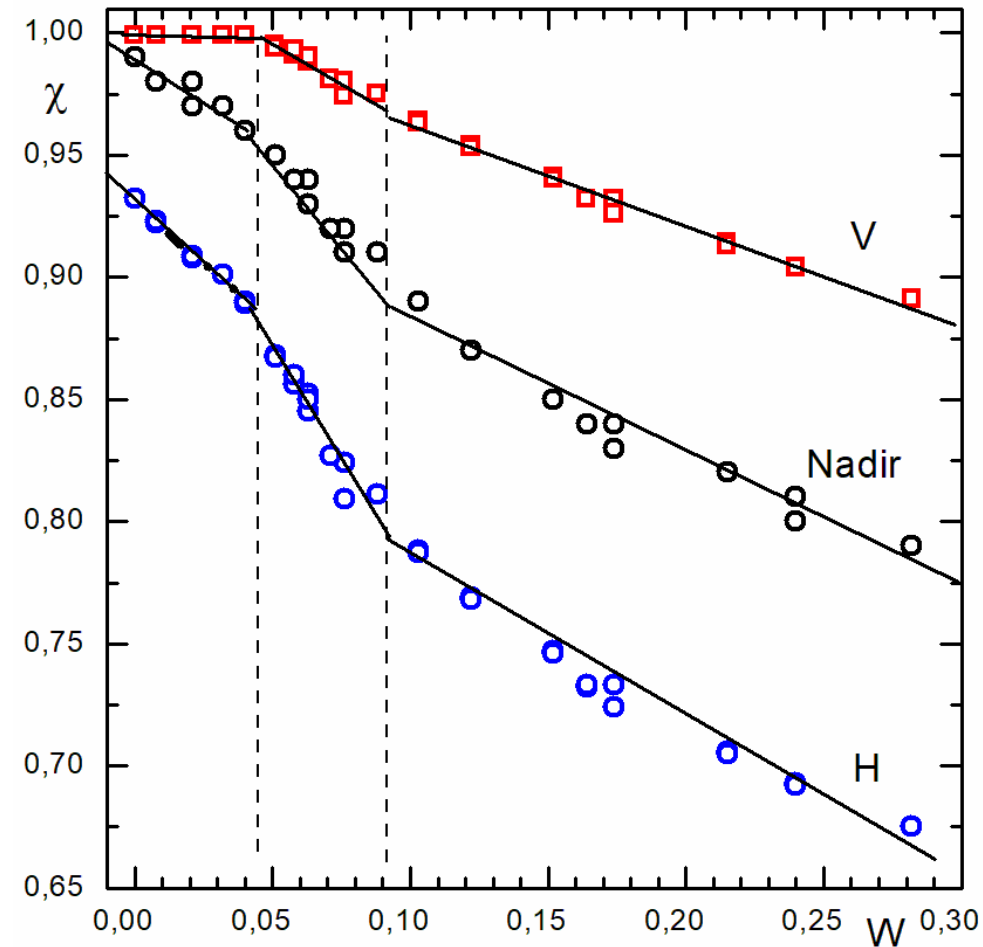
На рисунке приведена зависимость коэффициента излучения  $\chi(W)$ , построенная на основе лабораторных измерений диэлектрических характеристик веток сосны. Видно, что поведение  $\chi(W)$  в разных диапазонах  $W$  отличается. Это связано с разным фазовым составом древесной воды в дереве и различием их диэлектрических характеристик.

Модельный анализ значений  $\gamma$ , рассчитанных по формуле  $\gamma = \exp(-\tau_{F_{nadir}}/\cos\theta)$  указывает на то, что при  $W < W_2$  и тем более при  $W < W_1$  (деревья находятся в условиях водного стресса, возможно, погибшие) лес можно считать полупрозрачной средой. В этом случае  $T_{\text{я}}$  будет зависеть от влажности и гранулометрического состава почвы, сплоченности и биомассы деревьев.

При  $W > W_2$  и угле зондирования со спутника SMOS  $\theta = 42.5^\circ$  значения  $\gamma$  оказываются малыми (микроволновое излучение формируется в растительном слое, влияние влажности почвы и лесной подстилки несущественно).

Формулу (1) можно записать в следующем виде:

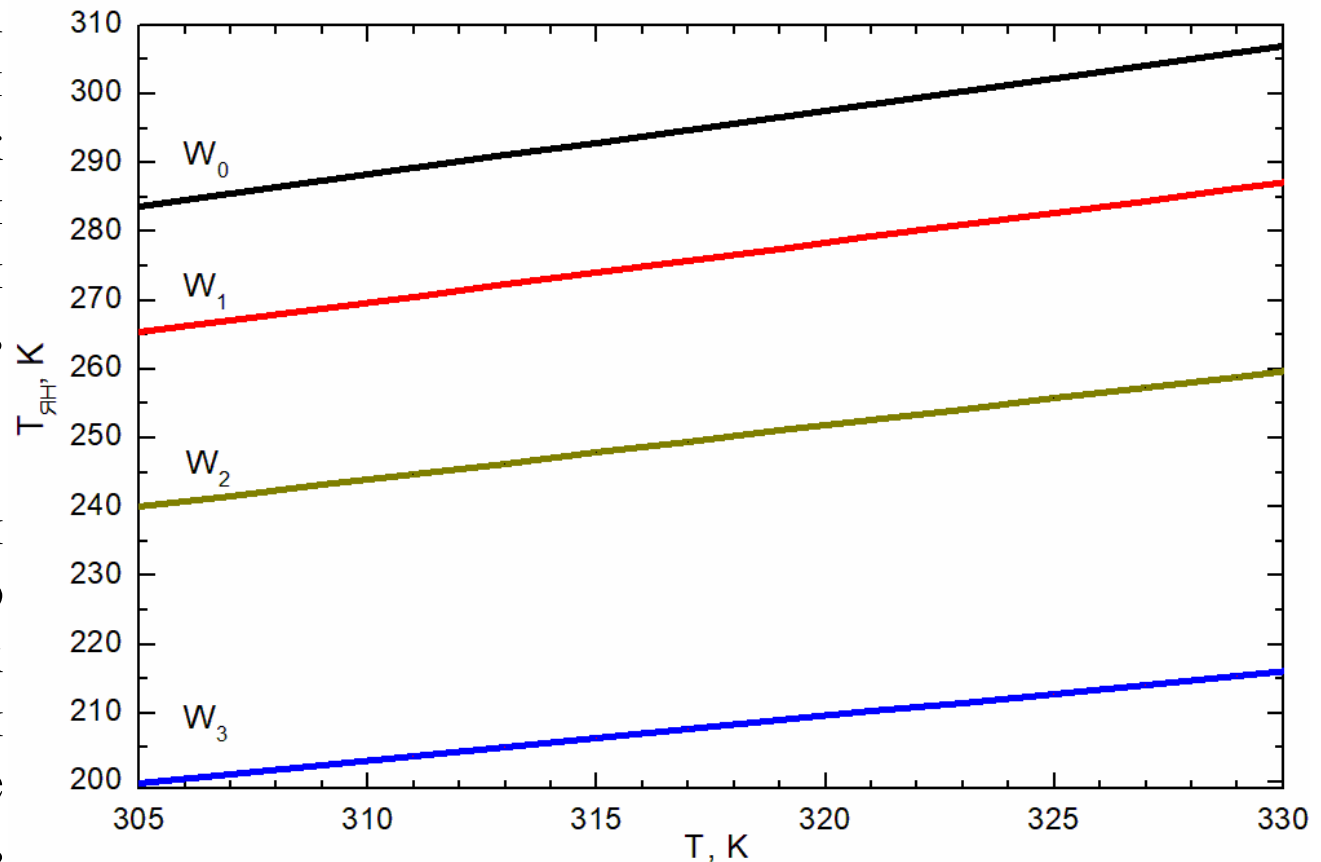
$$T_{\text{я}} = (1 - \omega_F)T_C = \chi T_C, \text{ где } \chi - \text{коэффициент излучения.}$$



	$\chi_0$	$\chi_1$	$\chi_2$	$\chi_3$
v	0,998	0,997	0,966	0,881
h	0,93	0,87	0,787	0,655

Значения  $\chi(W_0)–\chi(W_3)$  и рассчитанные на их основе  $T_{я}(T)$  для разных  $W$  могут быть полезными при дистанционном зондировании леса как микроволновые индикаторы влажности/сухости деревьев, учитывающие фазовый состав и диэлектрические характеристики древесной воды в живом дереве.

Анализ результатов экспериментальных и модельных исследований указывает на то, что установленные зависимости диэлектрических характеристик веток, хвои, листьев от объемной влажности  $W$  и экспериментально определенные значения влажностей  $W_1, W_2$  могут быть использованы для расчета зависимостей  $T_{я}(W)$  леса, а рассчитанные значения  $T_{я}(W_1), T_{я}(W_2)$  в качестве своеобразных индикаторов при оценке состояния древесной растительности.



Зависимость  $T_{яH}(T, \theta = 42,5^\circ)$  для веток сосны :  
 $W_0 = 0, W_1 = 0.047, W_2 = 0.094, W_3 = 0.30 \text{ см}^3/\text{см}^3$ .

**Исследование выполнено за счет гранта РФФ**

**№ 22-17-20041**

<https://rscf.ru/project/22-17-20041/>

*Спасибо за внимание*

*Будем рады научному сотрудничеству*

[romanov\\_alt@mail.ru](mailto:romanov_alt@mail.ru)