

Дистанционные микроволновые индикаторы сухости леса

А. Н. Романов, И. В. Хвостов, И. В. Рябинин, Д. А. Романов, Д. Н. Трошкин

Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, 656038, Россия
E-mail: ran@iwep.ru

На примере тестовых участков сосновых боров (Алтайский край, Российская Федерация; Абайская обл., Республика Казахстан) изучена динамика радиояркостной температуры хвойного леса, измеренных со спутника SMOS (*англ.* Soil Moisture and Ocean Salinity) в период крупных лесных пожаров. Оценено влияние лесных пожаров на микроволновое излучение леса. Исследованы диэлектрические характеристики веток и хвои сосны, веток и листьев берёзы на частоте 1,41 ГГц. Использовали лабораторную установку мостового типа на основе промышленного фазометра ФК2-18, позволяющую измерять диэлектрические характеристики дисперсных смесей и водных растворов мостовым методом в диапазоне частот от 0,3 до 10,0 ГГц. Установлены зависимости показателей преломления и поглощения веток и хвои сосны, веток и листьев берёзы от объёмной доли воды в живом дереве. Для оценки пожарной опасности леса предложено использовать новый подход, основанный на комплексном анализе результатов дистанционных, натуральных и лабораторных исследований. Предложены новые дистанционные микроволновые индикаторы сухости/влажности леса, основанные на использовании спутниковых измерений радиояркостной температуры в микроволновом диапазоне и лабораторных измерений диэлектрических характеристик живого дерева, позволяющие учесть фазовый состав и диэлектрические свойства древесной воды и сухой древесины.

Ключевые слова: сосна, берёза, ветка, хвоя, листья, влага, температура, влажность, лесной пожар, показатель преломления, коэффициент поглощения, комплексная диэлектрическая проницаемость, СВЧ-диапазон

Одобрена к печати: 08.12.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-197-209

Введение

На земном шаре лесные территории занимают треть площади суши. Влияние лесов на жизнедеятельность человека неоспоримо. Лес как важнейший биологический ресурс в значительной степени определяет условия существования человека на планете, повышает качество жизни, участвует в круговороте воды и углерода в природе. Сохранение лесов является одной из приоритетных задач человечества. Леса подвергаются различным природным и техногенным опасностям, в том числе таким катастрофическим, как засухи и лесные пожары, ведущие к уничтожению сложившихся лесных экосистем. Лесные пожары — стихийные бедствия и представляют реальную угрозу для жизни проживающего поблизости населения, а также для всех видов живых существ (флоры и фауны), оказавшихся в зоне распространения пожара. Пожары наносят значительный ущерб социально-экономической сфере районов, на территории которых они происходят (Брушлинский и др., 2022).

На значительных по площади лесных территориях с малым количеством наблюдательных пунктов лесоохраны возникает необходимость организации дистанционных наблюдений в оптическом, инфракрасном (ИК), микроволновом диапазонах со спутников, самолётов, беспилотных летательных аппаратов. Наибольшее распространение и практическое применение получили методы дистанционного зондирования леса в оптическом и инфракрасном диапазонах, используемые для картирования леса, оценки его экологического состояния, своевременного выявления опасностей и угроз (Котельников, Лупян, 2022; Лозин и др., 2023; Лупян и др., 2022), картирования запасов горючих материалов (древесины) как потенциального топлива для лесных пожаров (Argo et al., 2008; Gale et al., 2021).

Разработанные к настоящему времени методы дистанционного микроволнового зондирования основаны на использовании моделей микроволнового излучения леса, представленного

как многослойная пространственно-неоднородная система с изменяющимися во времени диэлектрическими и радиоизлучательными характеристиками каждого из слоёв (Чухланцев, Шутко, 2012; Kerr et al., 2012). В исследованиях (Кибардина и др., 2013; Саворский и др., 2012) разработана модель радиоизлучения лесного пожара, учитывающая температуру пламени при низовом пожаре и позволяющая оценить минимальную площадь пожара, при которой возможно его дистанционное обнаружение.

Лесная растительность является случайно-неоднородной средой, состоящей из включений различной формы и размеров. В публикации (Чухланцев и др., 2003) приведены модели микроволнового излучения леса, учитывающие диэлектрические свойства сухой древесины, связанной и свободной воды в живом дереве. Для описания диэлектрических и радиоизлучательных характеристик лесной растительности используется модель непрерывной среды и совокупности рассеивателей, характеризующаяся эффективной комплексной диэлектрической проницаемостью (КДП) ε_{ef} в квазистатическом приближении (при размере неоднородностей много меньше длины волны λ) (Чухланцев, Головачев, 2002): $\varepsilon_{ef} = 1 + (u/3)p(\varepsilon - 1)$, где ε — КДП хвои ($u = 1$) или листьев ($u = 2$), u — численный коэффициент; p — относительный объём, занимаемый элементами растительности (как правило, для растительных покровов $p < 0,03$).

В настоящее время радиояркостьная температура ($T_{я}$) леса рассчитывается с использованием общепринятой τ - ω -модели, имеющей следующий вид (Kerr et al., 2012):

$$T_{я} = (1 - \omega) \cdot (1 - \gamma) \cdot (1 + \gamma r_{ПР}) T_{Р} + (1 - r_{ПР}) \gamma T_{П}, \quad (1)$$

где $T_{Р}$, $T_{П}$ — эффективная температура растительности и почвы; $r_{ПР}$ — коэффициент отражения подстилающей поверхности; ω — альbedo однократного рассеяния леса, $\omega = 0,05-0,20$; γ — ослабление растительностью микроволнового излучения подстилающей поверхности, $\gamma = \exp(-\tau/\cos\theta)$, τ — оптическая толщина растительности ($\tau = 0-3$), θ — угол зондирования. При использовании вместо ω коэффициента отражения (r) оптически толстого растительного слоя данная модель становится точной при больших значениях τ (Чухланцев, Шутко, 2012). Формулу (1) используют в основном для оценки влажности почвы, находящейся под лесным пологом. При зондировании под углом θ влияние почвы на микроволновое излучение подстилающей поверхности уменьшается с увеличением τ . Для расчёта τ используют соотношение (Schmugge, Jackson, 1992):

$$\tau = \frac{4\pi}{\lambda} H \cdot \text{Im}\sqrt{\varepsilon} = \frac{4\pi}{\lambda} H \cdot \text{Im}(n + ik) = \frac{4\pi}{\lambda} H k,$$

где H — высота растительности; $\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon''$, где ε' , ε'' — действительная и мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости, $\sqrt{\varepsilon} = n + ik$, $\varepsilon' = n^2 - k^2$, $\varepsilon'' = 2nk$, n , k — показатель преломления и поглощения соответственно.

Применение микроволновых методов определения влажности почвы под пологом леса возможно при малых значениях τ и проблематично при увеличении τ (уменьшении γ). В работе (Maseloni et al., 2001) для леса установлена связь между $T_{я}$ (ГГц) в СВЧ-диапазоне и $T_{я}$ в ИК-диапазоне: $T_{я}$ (ГГц) = $(0,98 \pm 0,01) T_{я}$ (ИК). Согласно (Owe et al., 2001), при $\tau > 0,75$ коэффициент излучения кроны $\chi_k > 0,9$, а при $\tau > 0,15$ — $\chi_k > 0,95$. В исследовании (Jones et al., 2011) показано, что при $\tau > 1,5$ $\chi_k = 0,95$, а $\omega \approx 0,05$, т. е. густой лесной покров по радиоизлучательным характеристикам приближается к абсолютно чёрному телу (АЧТ) с $\chi_{АЧТ} = 1$. При высокой влажности леса и зондировании под углом значения γ оказываются малыми (микроволновое излучение формируется в растительном слое, влияние влажности почвы и лесной подстилки несущественно). В соответствии с этим густой лес используют в качестве природного репера для калибровки спутниковых и самолётных микроволновых радиометров, полагая, что $T_{я} = (1 - \omega)T = (1 - r)T = \chi T$, где $\chi = (1 - r)$ — коэффициент излучения.

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

В настоящей работе сделана попытка исследовать динамику радиояркостной температуры лесных массивов до, во время и после крупных лесных пожаров, а также разработать микроволновые индикаторы сухости леса на основе ежедневных спутниковых измерений $T_{я}$.

Методика исследований

С целью выявления особенностей поведения радиоизлучательных характеристик леса исследовались сезонные вариации $T_{я}$ трёх тестовых участков (рис. 1): Приобский бор (1), состоящий из 70 % лиственных (берёза, осина) и 30 % хвойных (сосна) пород деревьев; реликтовый ленточный бор (2) (Алтайский край, Российская Федерация) в период лесного пожара (19–23 июня 2023 г.) на площади 97 км²; сосновый бор (3) в Абайской обл. (Республика Казахстан) в период лесного пожара (8–12 июня 2023 г.) на площади 600 км².

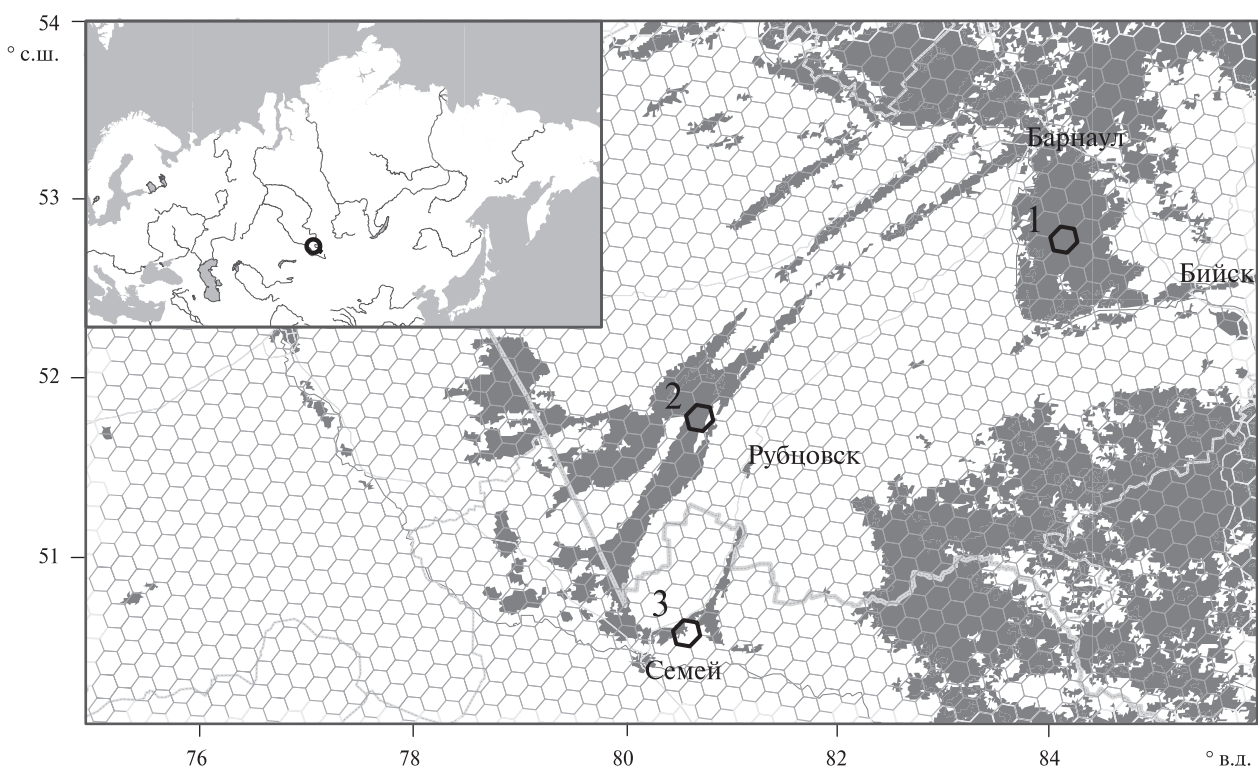


Рис. 1. Карта-схема тестовых участков: 1 — Приобский бор, 2 — ленточный бор (Сросты, Алтайский край), 3 — сосновый бор (Абайская обл., Республика Казахстан)

Для анализа сезонной динамики $T_{я}$ на горизонтальной ($T_{яH}$) (H от *англ.* horizontal) и вертикальной ($T_{яV}$) (V от *англ.* vertical) поляризации использовали данные спутника SMOS (продукт L1C) на частоте 1,41 ГГц, поступающие на указанную территорию два раза в сутки (утром и вечером). Данные SMOS привязаны к дискретной геодезической сетке DGG ISEA 4N9 (*англ.* Discrete Global Grid Icosahedral Snyder Equal Area). Температуру подстилающей поверхности определяли по данным MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (продукт MYD11A1_061). В подспутниковом эксперименте измеряли температуру растительности, лесной подстилки и почвы, проводили отбор образцов почвы, веток, хвои, листьев для определения влажности гравиметрическим методом в лабораторных условиях.

В лабораторных условиях измеряли диэлектрические характеристики свежесрезанных веток и хвои сосны, веток и листьев берёзы при разной влажности. Использовали лабораторную установку мостового типа на основе промышленного фазометра ФК2-18, позволяющую

измерять диэлектрические характеристики дисперсных смесей и водных растворов мостовым методом в диапазоне частот от 0,3 до 10,0 ГГц. Подробное описание лабораторной установки и диэлектрических измерений приведено в работе (Romanov, 2022). Диаметр (1,6 см) и длина (3,7 см) веток, а также диаметр удалённой сердцевины (0,7 см) соответствовали длине измерительного коаксиального контейнера (3,7 см) и диаметрам внешнего (1,6 см) и внутреннего (0,7 см) проводников. Добивались максимального заполнения объёма контейнера исследуемым образцом. Объёмная ($W = V_B/V [\text{см}^3/\text{см}^3]$) и массовая ($W_M = M_B/M [\text{г}/\text{г}]$) доли воды в образце связаны соотношением $W = (\rho_{\text{влаж}}/\rho_B)W_M$, где V , V_B — объём влажной древесины и воды соответственно; $M = M_{\text{сух}} + M_B$, где M , $M_{\text{сух}}$, M_B — масса влажной и сухой древесины и воды соответственно; $\rho_{\text{влаж}}$, $\rho_{\text{сух}}$, ρ_B — плотность влажной и сухой древесины и воды соответственно, $\rho_{\text{влаж}} = \rho_{\text{сух}} + (0,98 \pm 0,05)W$, $\rho_{\text{сух}} = 0,45 \pm 0,05 \text{ г}/\text{см}^3$, $\rho_B = 1 \text{ г}/\text{см}^3$.

Результаты анализа спутниковых данных

На рис. 2 приведена сезонная динамика $T_{\text{яв}}$, $T_{\text{ян}}$, T Приобского бора. На графике выделяются периоды с разным поведением $T_{\text{яв}}$ и $T_{\text{ян}}$, соответствующие разным фенологическим особенностям лесного массива и происходящим природным процессам: I — холодный период (фаза покоя для древесных растений); II — таяние снега, оттаивание почвы; III — развёртывание листьев, развитие зелёной растительности; IV — деградация, отмирание зелёной растительности. На $T_{\text{яв}}$ и $T_{\text{ян}}$ оказывают влияние: в холодный период — вариации температуры (T), в тёплый период — вариации T и W почвы, влагосодержание растений, выпадение осадков. Появление листвы и травяной растительности, экранирующей микроволновое излучение влажной почвы, способствует возрастанию $T_{\text{яв}}$ и $T_{\text{ян}}$. В конце лета и осенью опадание листвы ведёт к уменьшению экранирующего влияния растительности на микроволновое излучение лесной подстилки и почвы, что наряду с понижением T окружающей среды способствует уменьшению $T_{\text{яв}}$ и $T_{\text{ян}}$. Наблюдаемые на графиках заметные понижения $T_{\text{яв}}$ и $T_{\text{ян}}$ связаны с понижением T и дождевыми осадками.

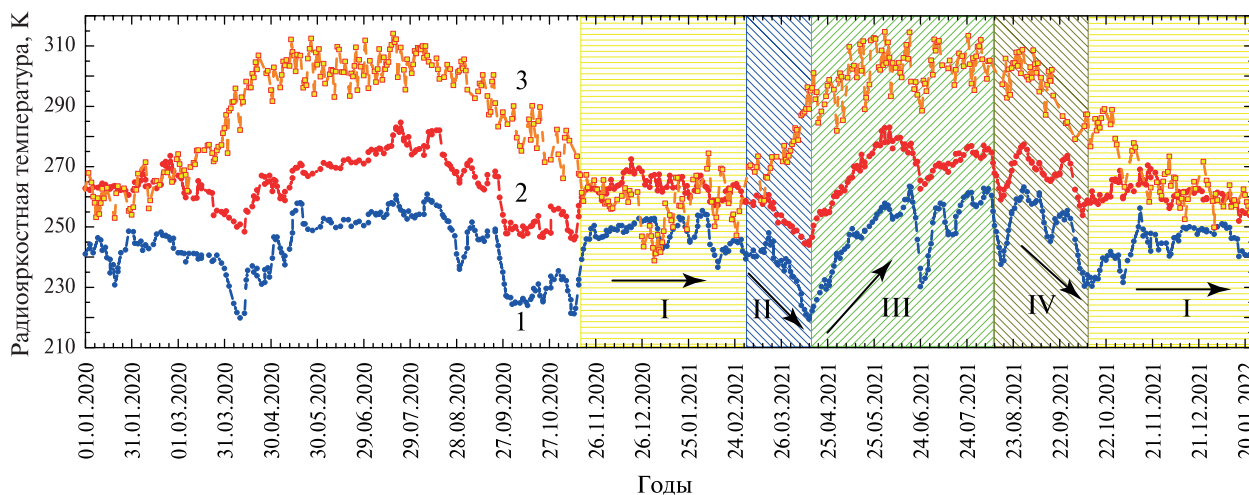


Рис. 2. Сезонная динамика $T_{\text{ян}}$ (1), $T_{\text{яв}}$ (2), T (3) для Приобского бора (Алтайский край): I–IV — периоды с разным поведением $T_{\text{ян}}$ и $T_{\text{яв}}$

Из анализа динамики $T_{\text{ян}}$ (1), $T_{\text{яв}}$ (2), T (3) в холодный период года следует, что значения T , определённые по данным MODIS (инфракрасный диапазон), оказываются ниже значений $T_{\text{ян}}$, $T_{\text{яв}}$, измеренных со спутника SMOS (микроволновый диапазон). Подобное поведение $T_{\text{ян}}$, $T_{\text{яв}}$, T объясняется тем, что величины измеренной температуры соответствуют разным скин-слоям, зависящим от длины волны. Величина T , определённая в ИК-диапазоне, соответствует температуре на поверхности дерева, в то время как $T_{\text{ян}}$ и $T_{\text{яв}}$, определённые по дан-

ным микроволнового зондирования, соответствуют температуре эффективно излучающего слоя ($T_{эф}$), определяемой по известной формуле:

$$T_{эф} = T + \int_0^z \frac{dT}{dz} \exp\left[-\int_0^z \gamma(z') dz'\right] dz,$$

где T — температура поверхности; dT/dz — градиент температуры в слое z ; $\gamma(z')$ — коэффициент поглощения материальной среды (Шарков, 2014).

В живом дереве для тонких веток, хвои, листьев $dT/dz \approx 0$; соответственно, $T_{эф} = T$. Для стволов с диаметром 40 см и более T на поверхности и T внутри дерева могут заметно различаться. Так, например, из анализа годовой динамики температуры на поверхности дерева (сосны) (t_0) и на глубине $z = 20$ см (t_{20}) (Романов и др., 2022) следует, что разница значений температуры Δt может достигать 12°C . Причём t_{20} может быть как меньше, так и больше t_0 в зависимости от температуры окружающей среды и температурной предыстории дерева, определяющей разные скорости проникновения тепловой волны внутрь ствола. Возникающая неопределённость не позволяет точно рассчитать $T_{эф}$ леса, так как толщина деревьев в лесу различная; соответственно, для каждого дерева будет своя величина $T_{эф}$.

На рис. 3 приведена динамика $T_{я}$ геодезической ячейки № 4009429 в весенне-летний период, когда возрастает опасность лесных пожаров. Площади лесного массива составили 65,46 % от площади всей ячейки, солёного озера — 5,71 %, открытых участков (степь, сельскохозяйственные поля, населённые пункты и др.) — 28,83 %. В условиях предпожарной ситуации и повышенной угрозы лесного пожара наблюдаются высокие значения дневной температуры и низкие значения влажности лесной подстилки и почвы. Дневные температуры лесной подстилки (опавшей хвои) на освещённых солнцем участках достигали $T = 320$ К, наблюдались предельно низкие значения объёмной влажности лесной подстилки ($W = 0,01 \text{ см}^3/\text{см}^3$) и нижележащей песчаной почвы ($T = 309$ К, $W = 0,01 \text{ см}^3/\text{см}^3$), меньшие максимальной доли связанной воды. В то же время объёмные доли воды в ветках и хвое живых деревьев имели обычную влажность и составляли $0,33$ и $0,25 \text{ см}^3/\text{см}^3$. Объёмная влажность степной (супесчаной) почвы и высохшего берега озера составляла $0,03$ и $0,10 \text{ см}^3/\text{см}^3$ соответственно.

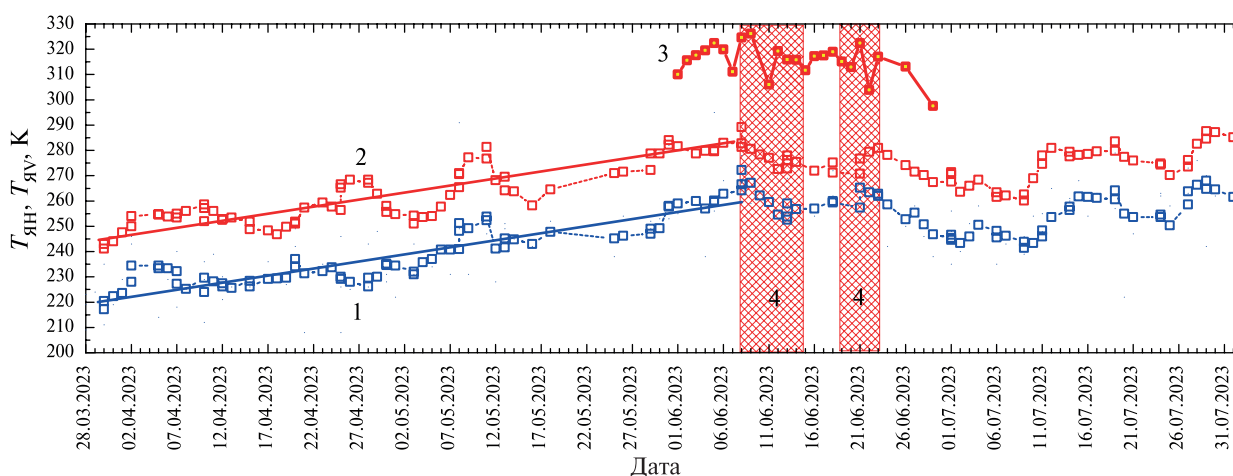


Рис. 3. Динамика $T_{ян}$ (1), $T_{яв}$ (2), T (3) ленточного бора (Сросты) в период лесных пожаров 8–14 и 19–22 июня 2023 г. (4) на общей площади 97 км^2

Зависимости $T_{яв}(D)$ и $T_{ян}(D)$, полученные для исходных значений из продуктов SMOS L1C, имеют следующий вид:

$$T_{ян} = (260,2 \pm 3,2) + (0,56 \pm 0,07)D, \quad T_{яв} = (282,8 \pm 3,6) + (0,52 \pm 0,08)D,$$

где D — количество суток, отсчитываемых с начала тёплого периода и до начала пожара.

Зависимости $T_{яв}(D)$ и $T_{ян}(D)$ для значений, сглаженных окном шириной в пять предшествующих значений, следующие:

$$T_{ян} = (257,4 \pm 1,3) + (0,51 \pm 0,03)D, \quad T_{яв} = (280,7 \pm 1,5) + (0,49 \pm 0,03)D.$$

На рис. 4 приведена динамика $T_{яв}$ и $T_{ян}$ соснового бора в Абайской обл. (Республика Казахстан) за 20 дней до лесного пожара на площади 60 000 га. Зависимости $T_{яв}(D)$ и $T_{ян}(D)$, аппроксимированные прямыми линиями, следующие:

$$T_{ян} = (228 \pm 2,60) + (0,31 \pm 0,03)D, \quad T_{яв} = (253 \pm 2,25) + (0,29 \pm 0,027)D.$$

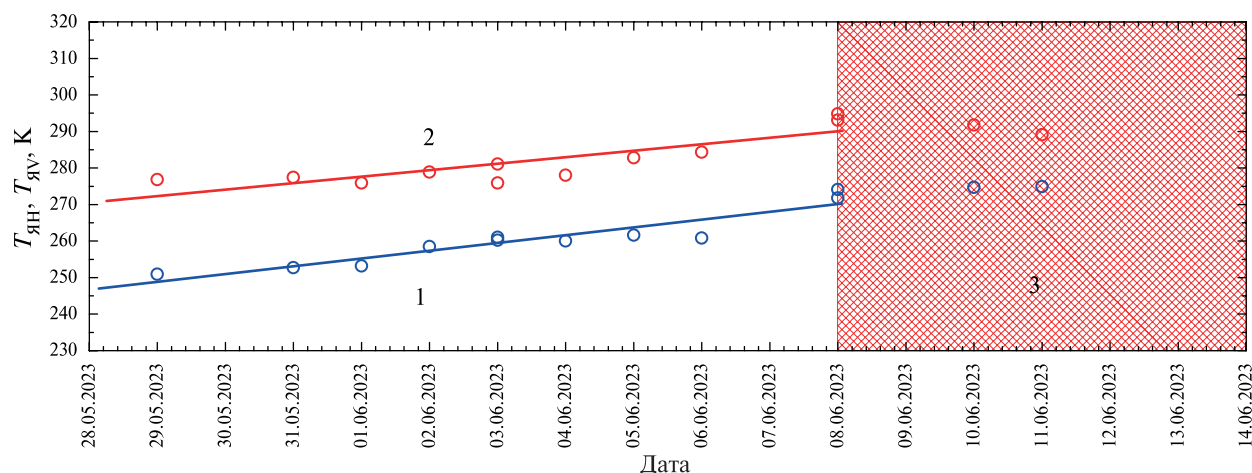


Рис. 4. Динамика радиояркостной температуры $T_{яв}$ (1), $T_{ян}$ (2) соснового бора (Восточный Казахстан); 3 — лесной пожар, Казахстан (8–14 июня 2023 г., площадь пожара — 60 000 га)

Из приведённых графиков видно, что $T_{яв}$ и $T_{ян}$ испытывают значительные вариации в весенне-летний период, вызванные колебаниями термодинамической температуры подстилающей поверхности, а также дождевыми осадками, увлажняющими почву и растительность, осушенные участки озера. В то же время видно, что $T_{яв}(D)$ и $T_{ян}(D)$ имеют возрастающие тренды, указывающие на уменьшение суммарной увлажнённости территории.

Обсуждение

В условиях земной атмосферы лесной пожар возможен при наличии горючих материалов (сухой древесины, высохшей травы, опавшей хвои и листвы), готовых к горению в том случае, если их влажность меньше некоторого критического значения, различного для разных их видов, а также источника возгорания. Потенциальная возможность возгорания в значительной мере зависит от погодных условий (Гусев, 2018). Максимальное количество лесных пожаров наблюдается в периоды засухи. Скорость высыхания влаги в лесу в значительной мере зависит от температуры окружающей среды. При высокой дневной температуре и длительном отсутствии дождей исчезает перехваченная вода, оставшаяся после осадков на листьях, хвое, ветках деревьев, на траве, высыхает лесная подстилка, уменьшается влажность почвы.

При засухе, характеризующейся высокой дневной температурой, достигающей 30–40 °С (воздух) и 45–65 °С (поверхность почвы), а также длительным отсутствием осадков, происходит уменьшение W почвы, усыхание пресноводных и солёных озёр, появление участков осушенного дна с отложениями солей на поверхности, увядание растительности. Все эти процессы ведут к суммарному уменьшению увлажнённости территории и тем самым создают благоприятные условия для лесного/степного пожара.

Величины $T_{яв}$ и $T_{ян}$, зависящие от температуры и суммарной увлажнённости территории, могут быть использованы для косвенной оценки потенциальной опасности возгорания

и угрозы пожара, а скорость изменения $(\Delta T_{\text{ЯВ}}/\Delta D)$ и $(\Delta T_{\text{ЯН}}/\Delta D)$ — для прогнозирования даты, начиная с которой в лесном массиве возникнут условия (высокая температура и малая влажность), необходимые для возгорания горючих лесных материалов.

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

При разработке дистанционного микроволнового индекса сухости необходимо учитывать различие диэлектрических характеристик сухой древесины, связанной и свободной воды в дереве (Чухланцев и др., 2003). Для примера на рис. 5 приведены зависимости показателей преломления n (1) и поглощения κ (2) от W для веток и хвои сосны, веток и листьев берёзы.

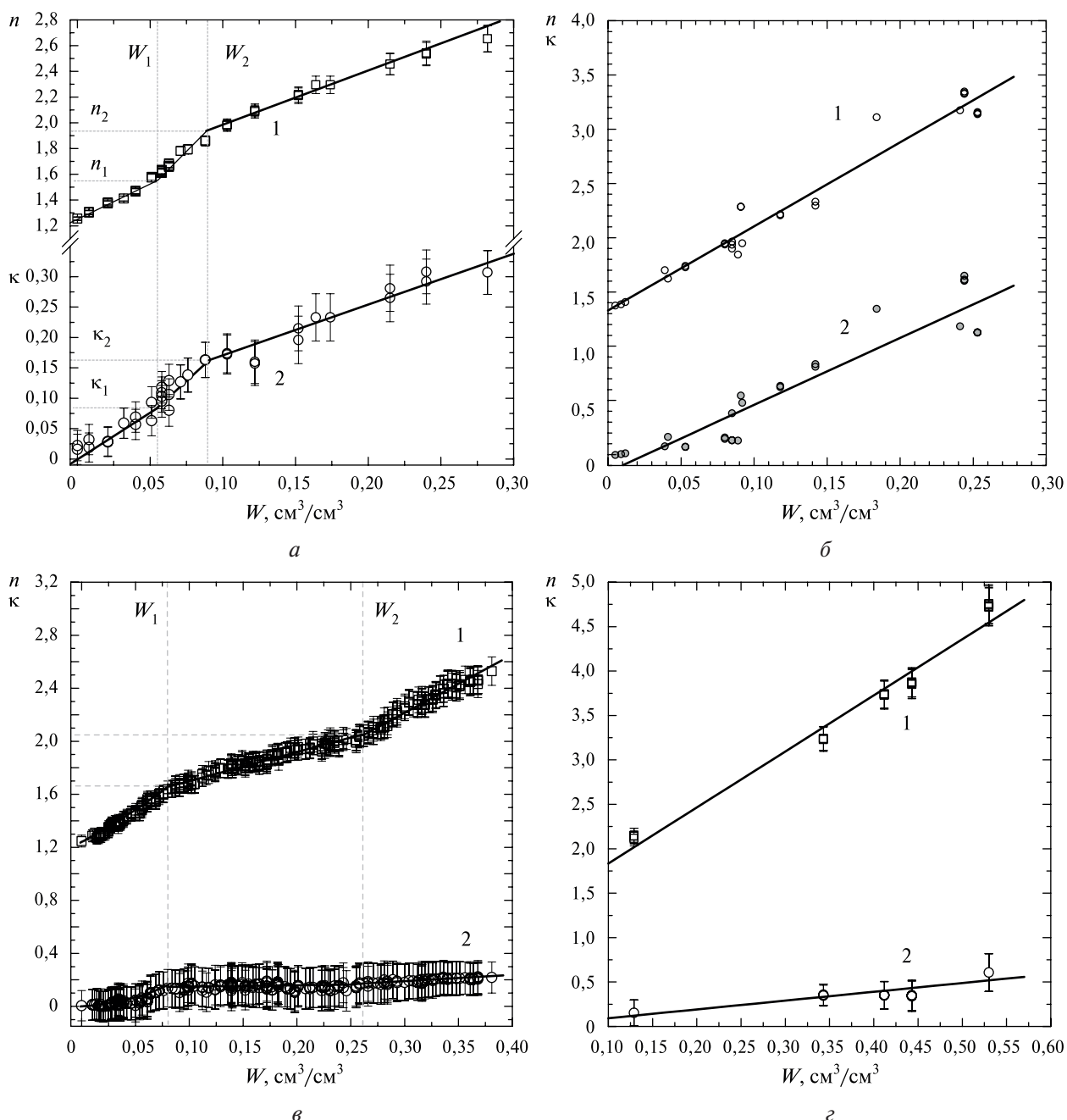


Рис. 5. Зависимости показателей преломления n (1) и поглощения κ (2) от W для веток (а) и хвои (б) сосны, веток (в) и листьев (г) берёзы

Видно, что n и κ хвои и листьев возрастают линейно с увеличением W , в то время как на зависимостях $n(W)$ и $\kappa(W)$ для веток наблюдаются два излома при $W = W_1$ и $W = W_2$, означающих изменение диэлектрических характеристик воды в дереве. Существование изломов на зависимостях $n(W)$ и $\kappa(W)$ связано с тем, что вода в древесине в результате взаимодействия с древесинным веществом оказывается неодинаковой по своим диэлектрическим свойствам, что позволяет выделить в ней отдельные фазы.

Для примера приведём зависимости $n(W)$ и $\kappa(W)$, имеющие следующий вид: для веток сосны —

$$n = \begin{cases} 1,255 + 5,66W, & R = 0,99, & \sigma = 0,85, & W \leq W_1, \\ 1,10 + 9,11W, & R = 0,97, & \sigma = 0,66, & W_1 \leq W \leq W_2, \\ 1,55 + 4,23W, & R = 0,98, & \sigma = 0,73, & W_2 \leq W \leq W_3, \end{cases}$$

$$\kappa = \begin{cases} 0,015 + 1,21W, & R = 0,92, & \sigma = 0,4, & W \leq W_1, \\ -0,01 + 1,90W, & R = 0,81, & \sigma = 0,5, & W_1 \leq W \leq W_2, \\ 0,83 + 0,86W, & R = 0,92, & \sigma = 0,4, & W_2 \leq W \leq W_3, \end{cases}$$

где R — коэффициент корреляции; σ — среднеквадратическая погрешность; $W_1 = 0,047$, $W_2 = 0,094$, $W_3 = 0,30$;

для хвои —

$$n = 1,13878 + 5,37713W, \quad R = 0,994, \quad \sigma = 0,06,$$

$$\kappa = 0,89231W, \quad R = 0,92, \quad \sigma = 0,04.$$

На рис. 6 приведены зависимости скин-слоя $L(W)$ для веток и хвои сосны, построенные по данным лабораторных измерений их диэлектрических характеристик при полном заполнении измерительного контейнера исследуемым образцом. Расчёт проводили по формуле $L = \lambda / (4\pi\sqrt{\epsilon} \cdot \text{tg}\delta)$, где $\lambda = 21$ см — длина волны; δ — угол диэлектрических потерь. Зависимости $L(W)$ имеют вид:

для веток —

$$L [\text{см}] = 4,06581 + 41,30567 \exp(-W/0,0301), \quad R^2 = 0,91578,$$

для хвои —

$$L [\text{см}] = 139,54351 \exp(-W/0,01753) + 7,38335 \exp(-W/0,47949), \quad R^2 = 0,997,$$

где R^2 — коэффициент детерминации.

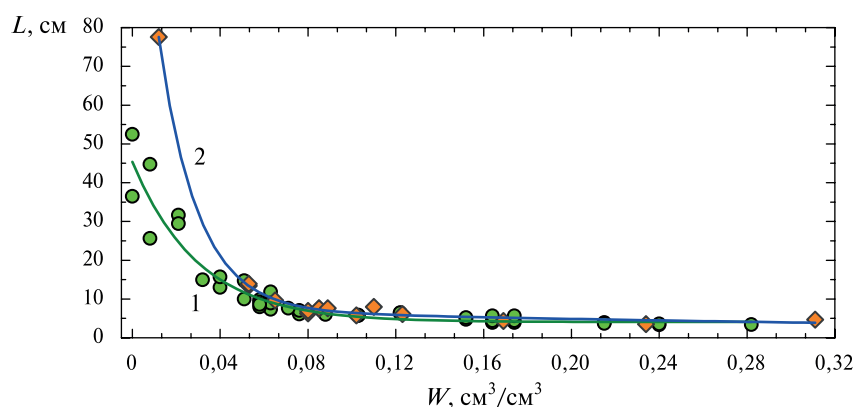


Рис. 6. Зависимость толщины скин-слоя L от W для веток (1) и хвои (2) сосны

Из графиков следует, что толщина скин-слоя $L(W)$ изменяется следующим образом: при полном заполнении объёма ветками — от 0,05 до 0,55 м, хвоей — от 0,05 до 0,78 м. В условиях

леса относительный объём элементов дерева $p < 0,03$ (Чухланцев, Головачев, 2002). Соответственно, в лесу толщина скин-слоя $L_{\text{л}}(W) = L(W)/V_p$ с учётом только веток и стволов будет изменяться от 1,66 до 18,3 м (при уменьшении W от 0,30 до 0 см³/см³). 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.

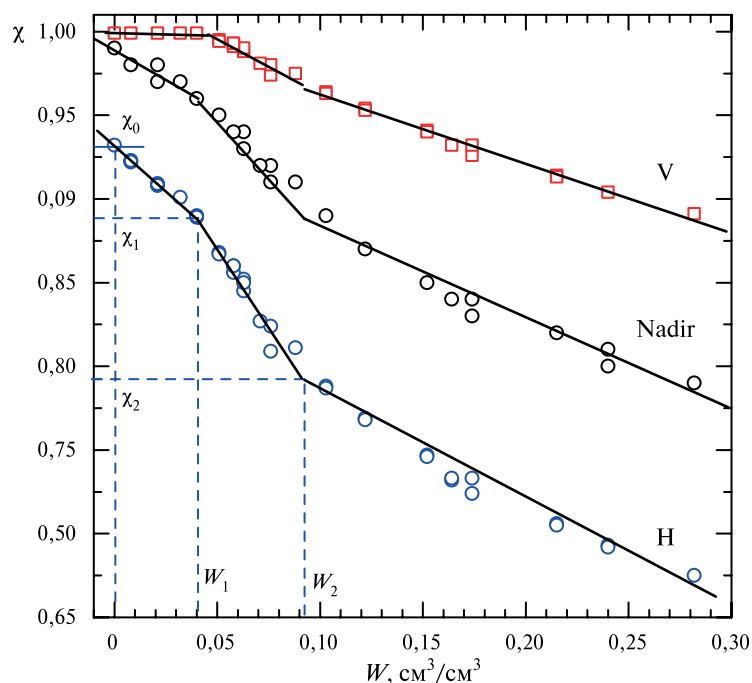


Рис. 7. Зависимость $\chi(W)$ для веток сосны для углов зондирования $\theta = 0$ (надир) и $\theta = 42,5^\circ$ на вертикальной (V) и горизонтальной (H) поляризации (лабораторный эксперимент)

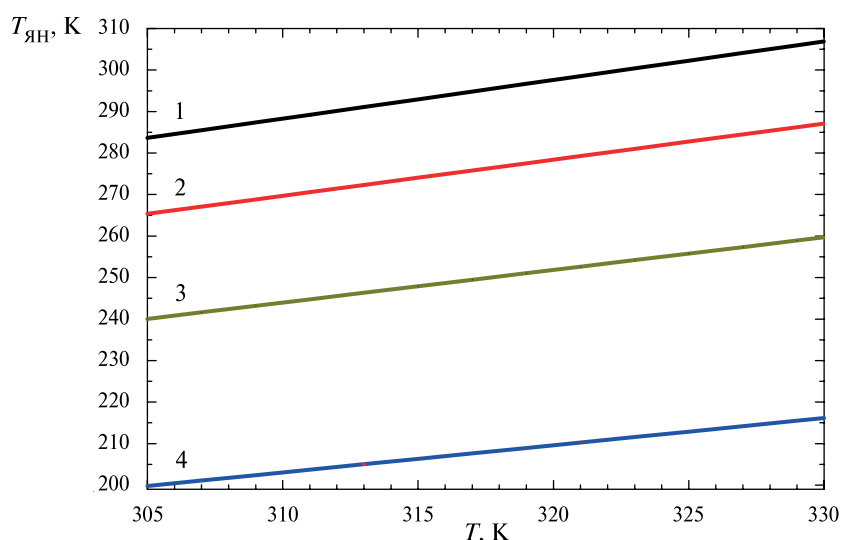


Рис. 8. Зависимость $T_{\text{ян}}(T)$ для веток сосны при угле зондирования $\theta = 42,5^\circ$ и $W = 0$ (1), $W_1 = 0,047$ см³/см³ (2), $W_2 = 0,094$ см³/см³ (3), $W_2 = 0,30$ см³/см³ (4) (модельный эксперимент)

На рис. 7 приведена зависимость коэффициента излучения, построенная по формуле $\chi = 4n / ((n+1)^2 + \kappa^2) = T_{\text{я}}/T$ на основе лабораторных измерений диэлектрических характеристик веток сосны. Видно, что поведение $\chi(W)$ в разных диапазонах влажности различается. Это связано с неодинаковым фазовым составом древесной воды в дереве и различием их

диэлектрических характеристик. Значения $\chi_0, \chi_1, \chi_2, \chi_3$, соответствующие $W=0; W_1; W_2; 0,30 \text{ см}^3/\text{см}^3$, и рассчитанные на их основе $T_{\text{я}}(T)$ 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 (рис. 8, см. с. 205).

Наличие в живом дереве разных категорий воды соответствует разным уровням сухости леса и разным уровням потенциальной пожарной опасности. Для дистанционной оценки пожарной опасности леса может быть использована сезонная динамика радиояркостной температуры леса, зависящая от фазового состава воды в древесной растительности и диэлектрических характеристик разных фаз древесной воды в элементах живого дерева.

Согласно исследованиям (Чудинов, 1984; Pissis et al., 1987) в древесине существует три категории воды. Как видно из приведённых экспериментальных данных (см. рис. 5 и 7), в живом дереве также выделяются три категории древесной воды с разными диэлектрическими параметрами: 1) диапазон $W=0 - W_1$ — в древесине присутствует водный раствор минеральных и органических веществ, находящийся внутри древесной клетки; 2) диапазон $W=W_1 - W_2$ — в древесине, помимо указанной категории воды, присутствует связанная вода, запасённая в стенках (мембранах) древесной клетки; 3) диапазон $W > W_2$ — в древесине, кроме указанных категорий, появляется свободная вода в крупных капиллярах и проводящих каналах дерева.

Из существования в живом дереве трёх категорий древесной воды появляется возможность разработки трёхуровневого индекса сухости леса: 1) $T_{\text{я}}(W > W_2)$ — в элементах живого дерева присутствуют все категории древесной воды; 2) $T_{\text{я}}(W_1 < W \leq W_2)$ — в элементах живого дерева отсутствует свободная вода; 3) $T_{\text{я}}(0 < W \leq W_1)$ — в элементах живого дерева отсутствует свободная и связанная вода, но остаётся вода внутри древесной клетки.

Заключение

Исследование диэлектрических свойств древесины в микроволновом диапазоне является основой для разработки высокоэффективных технологий дистанционного зондирования лесных и растительных покровов с целью оценки их физических и биологических параметров и получения информации о состоянии живого дерева как важнейшего компонента биосферы.

В настоящей работе сделана попытка учесть фазовый состав и диэлектрические свойства воды в ветках, хвое, листьях деревьев для интерпретации и уточнения спутниковых данных при дистанционном микроволновом мониторинге леса.

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

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 22-17-20041 (<https://rscf.ru/project/22-17-20041>).

Литература

1. Брушлинский Н. Н., Соколов С. В., Григорьева М. П. Сравнительный анализ обстановки с пожарами в странах мира // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2022. № 4. С. 5–12. DOI: 10.25257/FE.2022.4.5-12.
2. Гусев В. Г. О методе оценки возможности возникновения и распространения пожаров в лесах по их фактической горимости // Тр. Санкт-Петербургского научно-исслед. ин-та лесного хоз-ва. 2018. № 2. С. 40–52. DOI: 10.21178/2079-6080.2018.2.40.

3. 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.
4. 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. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-75-87.
5. Лозин Д. В., Лупян Е. А., Балашов И. В. и др. 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. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-292-301.
6. Лупян Е. А., Лозин Д. В., Балашов И. В. и др. 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. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-217-232.
7. Романов Д. А., Рябинин И. В., Романов А. Н. Сезонные изменения температуры в стволе живого дерева (на примере сосны) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 142–154. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-142-154.
8. Саворский В. П., Каевицер В. И., Кибардина И. Н. и др. СВЧ-радиометрическая модель очага возгорания лесного пожара // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 137–144.
9. Чудинов Б. С. Вода в древесине. Новосибирск: Наука, 1984. 267 с.
10. Чухланцев А. А., Головачев С. П. Оценки затухания радиоволн диапазона 3–300 см в растительных покровах // Лесной вестн. (1997–2002). 2002. № 1. С. 112–117.
11. Чухланцев А. А., Шутко А. М. Особенности определения влажности почвы СВЧ-радиометрическим методом в лесных районах // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 2. С. 3–10.
12. Чухланцев А. А., Шутко А. М., Головачев С. П. Ослабление электромагнитных волн растительными покровами // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48. № 11. С. 1285–1311.
13. Шарков Е. А. Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы. В 2-х т. М.: ИКИ РАН, 2014. Т. 1. 544 с.
14. Arroyo L. A., Pascual C., Manzanera J. A. Fire models and methods to map fuel types: The role of remote sensing // Forest Ecology and Management. 2008. V. 256. Iss. 6. P. 1239–1252. DOI: 10.1016/j.foreco.2008.06.048.
15. Gale M. G., Cary G. J., van Dijk A. I. J. M., Yebra M. Forest fire fuel through the lens of remote sensing: Review of approaches, challenges and future directions in the remote sensing of biotic determinants of fire behaviour // Remote Sensing of Environment. 2021. V. 255. Article 112282. DOI: 10.1016/j.rse.2020.112282.
16. Jones M. O., Jones L. A., Kimball J. S. et al. Satellite passive microwave remote sensing for monitoring global land surface phenology // Remote Sensing of Environment. 2011. V. 115. No. 4. P. 1102–1114. DOI: 10.1016/j.rse.2010.12.015.
17. Kerr Y. H., Waldteufel Ph., Richaume Ph. et al. The SMOS Soil Moisture Retrieval Algorithm // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2012. V. 50. No. 5. P. 1384–1403. DOI: 10.1109/TGRS.2012.2184548.
18. Macelloni G., Paloscia S., Pampaloni P. et al. Airborne multifrequency L- to Ka-band radiometric measurements over forests // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2001. V. 39. No. 11. P. 2507–2513. DOI: 10.1109/36.964988.
19. Owe M., de Jeu R., Walker J. A methodology for surface soil moisture and vegetation optical depth retrieval using the microwave polarization difference index // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2001. V. 39. No. 8. P. 1643–1654. DOI: 10.1109/36.942542.
20. Pissis P., Angnostopoulou-Konsta A., Apekis L. A dielectric study of the state of water in plant stems // J. Experimental Botany. 1987. V. 38. No. 9. pp. 1528–1540. DOI: 10.1093/jxb/38.9.1528.
21. Romanov A. N. Some Behavior Features of Dielectric Properties of Water in Birch Wood at a Frequency of 1.41 GHz // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2022. V. 60. Article 4409208. 8 p. DOI: 10.1109/TGRS.2022.3157642.
22. Schmugge T. J., Jackson T. J. A dielectric model of the vegetation effects on the microwave emission from soils // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1992. V. 30. No. 4. P. 757–760. DOI: 10.1109/36.158870.

Remote microwave indicators of forest dryness

A. N. Romanov, I. V. Khvostov, I. V. Ryabinin, D. A. Romanov, D. N. Troshkin

Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul 656038, Russia
E-mail: ran@iwep.ru

Using the example of test areas of pine forests (Altai Territory, Russian Federation; Abay Region, Republic of Kazakhstan), the dynamics of brightness temperatures of coniferous forests measured from the SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) satellite during the period of large forest fires was studied. The impact of forest fires on forest microwave radiation has been assessed. The dielectric characteristics of pine branches and needles, birch branches and leaves at a frequency of 1.41 GHz were studied. We used a bridge-type laboratory setup based on an FK2-18 industrial phase meter, which makes it possible to measure the dielectric characteristics of dispersed mixtures and aqueous solutions using the bridge method in the frequency range from 0.3 to 10.0 GHz. The dependences of the refractive index and absorption indices of pine branches and needles, birch branches and leaves on the volume fraction of water in a living tree have been established. To assess the fire danger of forests, it is proposed to use a new approach based on a comprehensive analysis of the results of remote sensing, field and laboratory studies. New remote microwave indicators of forest dryness/wetness are proposed based on the use of satellite measurements of brightness temperatures in the microwave range and laboratory measurements of dielectric characteristics of a living tree, which allow taking into account the phase composition and dielectric properties of wood water and dry wood.

Keywords: birch, pine, branch, needles, leaves, temperature, moisture, forest fire, refractive index, absorption factor, complex permittivity, microwave range

Accepted: 08.12.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-197-209

References

1. Brushlinsky N. N., Sokolov S. V., Grigorieva M. P., Comparative analysis of the situation with fires in the countries around the world, *Fire and emergencies: prevention, elimination*, 2022, No. 4, pp. 5–12 (in Russian), DOI: 10.25257/FE.2022.4.5-12.
2. Gusev V. G., On the method for assessing the possibility of occurrence and spread of fires in forests according to their actual burning, *Proc. Saint Petersburg Forestry Research Institute*, 2018, No. 2, pp. 40–52 (in Russian), DOI: 10.21178/2079-6080.2018.2.40.
3. Kibardina I. N., Savorsky V. P., Kuznetsov O. O., Maklakov S. M., Panova O. Yu., Chukhlantsev A. A., Development of a microwave radiometric model of a forest fire flame source, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 4, pp. 79–88 (in Russian).
4. Kotelnikov R. V., Loupian E. A., Features of remotely estimated distributions of forest fire areas for territories with different levels of fire protection, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 4, pp. 75–87 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-75-87.
5. Lozin D. V., Loupian E. A., Balashov I. V. et al., Estimation of northern burnt forests mortality in the XXI century based on MODIS data on fire intensity, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 2, pp. 292–301 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-292-301.
6. Loupian E. A., Lozin D. V., Balashov I. V. et al., Study of the dependence of forest fire damage degree on burning intensity based on satellite monitoring data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 3, pp. 217–232 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-217-232.
7. Romanov D. A., Ryabinin I. V., Romanov A. N., Seasonal changes in temperature in the trunks of a living tree (by the example of pine), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 2, pp. 142–154 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-142-154.
8. Savorskiy V. P., Kaevitser V. I., Kibardina I. N. et al., Microwave radiometric model of forest fire hearth, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 1, pp. 137–144 (in Russian).
9. Chudinov B. S., *Voda v drevesine* (Moisture in Timber), Novosibirsk: Nauka Publ., 1984, 267 p. (in Russian).

10. Chukhlantsev A. A., Golovachev S. P., Estimates of the attenuation of radio waves in the 3–300 cm range in vegetation, *Lesnoi vestnik (1997–2002)*, 2002, No. 1, pp. 112–117 (in Russian).
11. Chukhlantsev A. A., Shutko A. M., Some aspects of microwave radiometry of soil moisture in forested areas, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2012, No. 2, pp. 3–10 (in Russian).
12. Chukhlantsev A. A., Shutko A. M., Golovachev S. P., Attenuation of electromagnetic waves by vegetation, *Radiotekhnika i elektronika*, 2003, Vol. 48, No. 11, pp. 1285–1311 (in Russian).
13. Sharkov E. A., *Radioteplovoe distantsionnoe zondirovanie Zemli: fizicheskie osnovy. V 2 t.* (Radiothermal Remote Sensing of the Earth: Physical Foundations, In 2 vol.), Moscow: IKI RAN, 2014, Vol. 1, 544 p. (in Russian).
14. Arroyo L. A., Pascual C., Manzanera J. A., Fire models and methods to map fuel types: The role of remote sensing, *Forest Ecology and Management*, 2008, Vol. 256, Issue 6, pp. 1239–1252, DOI: 10.1016/j.foreco.2008.06.048.
15. Gale M. G., Cary G. J., van Dijk A. I. J. M., Yebra M., Forest fire fuel through the lens of remote sensing: Review of approaches, challenges and future directions in the remote sensing of biotic determinants of fire behaviour, *Remote Sensing of Environment*, 2021, Vol. 255, Article 112282, DOI: 10.1016/j.rse.2020.112282.
16. Jones M. O., Jones L. A., Kimball J. S. et al., Satellite passive microwave remote sensing for monitoring global land surface phenology, *Remote Sensing of Environment*, 2011, Vol. 115, No. 4, pp. 1102–1114, DOI: 10.1016/j.rse.2010.12.015.
17. Kerr Y. H., Waldteufel Ph., Richaume Ph. et al., The SMOS Soil Moisture Retrieval Algorithm, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2012, Vol. 50, No. 5, pp. 1384–1403, DOI: 10.1109/TGRS.2012.2184548.
18. Macelloni G., Paloscia S., Pampaloni P. et al., Airborne multifrequency L- to Ka-band radiometric measurements over forests, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2001, Vol. 39, No. 11, pp. 2507–2513, DOI: 10.1109/36.964988.
19. Owe M., de Jeu R., Walker J., A methodology for surface soil moisture and vegetation optical depth retrieval using the microwave polarization difference index, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2001, Vol. 39, No. 8, pp. 1643–1654, DOI: 10.1109/36.942542.
20. Pissis P., Angnostopoulou-Konsta A., Apekis L., A dielectric study of the state of water in plant stems, *J. Experimental Botany*, 1987, Vol. 38, No. 9, pp. 1528–1540, DOI: 10.1093/jxb/38.9.1528.
21. Romanov A. N., Some Behavior Features of Dielectric Properties of Water in Birch Wood at a Frequency of 1.41 GHz, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2022, Vol. 60, Article 4409208, 8 p., DOI: 10.1109/TGRS.2022.3157642.
22. Schmugge T. J., Jackson T. J., A dielectric model of the vegetation effects on the microwave emission from soils, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1992, Vol. 30, No. 4, pp. 757–760, DOI: 10.1109/36.158870.