

Мониторинг влажности лесопосадок с помощью сигналов навигационных спутников диапазона L1

Д. В. Харламов¹, Д. С. Макаров¹, В. Г. Подопригора^{2,3}, М. Ю. Реушев^{1,3}

¹ Красноярский научный центр СО РАН, Красноярск, 660036, Россия
E-mail: kharlamov.dv@ksc.krasn.ru

² Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН, Красноярск, 660036, Россия

³ Сибирский федеральный университет, Красноярск, 660041, Россия

Представлены результаты исследований биометрических параметров лесных массивов (влажность леса и влажность подстилающей поверхности) методом радиопросвечивания радиосигналами от навигационных спутников в диапазоне L1 ($\lambda \approx 0,19$ м). В ходе полевых испытаний были выполнены измерения ослабления навигационных сигналов в лесном массиве в период его вегетативной активности с мая по сентябрь 2024 г. Испытания проводились в районе посёлка Памяти 13 Борцов Емельяновского района Красноярского края при разных погодных условиях (без осадков/осадки). Параллельно измерениям мощности навигационных сигналов, выполнялись замеры влажности древостоя с помощью портативного влагомера. Первичная обработка результатов измерений проводилась с помощью облачного сервиса обработки данных. Результаты испытаний представлены в виде амплитудно-временных зависимостей мощности радиосигналов, принимаемых навигационным приёмником, и их амплитудно-частотных характеристик, полученных путём обработки данных с использованием методики быстрого фурье-преобразования. Для анализа полученных экспериментальных результатов в работе представлена диэлектрическая модель леса с учётом влажности лесного полога. Результаты исследований отражают зависимость поглощения мощности навигационных сигналов от влажности древостоя и могут быть использованы для мониторинга состояния лесных массивов.

Ключевые слова: сигналы навигационных спутников, радиопросвечивание, слоистые среды, лес, диэлектрическая модель

Одобрена к печати: 04.03.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-154-162

Введение

Лесные покровы представляются весьма сложным и динамическим объектом исследований. Морфология деревьев изменяется в течение вегетационного периода, что влечёт за собой изменение характерных электродинамических параметров растительного покрова (Кашкин и др., 2023; Sorokin et al., 2020). Одним из таких значимых параметров выступает биометрический показатель, связанный с наличием и количеством влаги в листьях, ветвях, стволах. Он часто включает в себя относительное объёмное влагосодержание (m_v), влагосодержание единицы объёма леса или растительного покрова на единицу площади (W_s), относительную влажность леса (m), $m = W_s/Q$, где Q — фитомасса. Анализ электрофизических характеристик сигналов навигационных спутников (НС), отражённых и прошедших сквозь древостой, даёт возможность оценить его биометрические параметры, в частности, влагосодержание леса и влажность почвы.

Физическая модель объекта исследования

Отражение и пропускание излучения в среде определяется, как известно, величиной её относительной диэлектрической проницаемости ϵ_s . К. Мэтцлером предложена полуэмпирическая формула для ϵ_s листьев (Matzler, 1994), параметрами которой являются: m_d — отношение сухой массы к сырой и комплексная диэлектрическая проницаемость воды ϵ_w . Последнюю

можно вычислить по известным релаксационным формулам Дебая. Результат расчёта ε_s косвенно зависит также от частоты, солёности и температуры воды.

$$\varepsilon_s = 0,522(1 - 1,32m_d)\varepsilon_w + 0,51 + 3,84m_d. \quad (1)$$

Формула (1) применима в частотном диапазоне 1–100 ГГц к зелёным листьям, сухая фракция которых варьируется от 0,1 до 0,5, а плотность составляет около 1 г/см³. Для оценки ε_s используется также аппроксимация в виде (Chukhlantsev, 1992):

$$\varepsilon'_s = (\varepsilon'_w - \varepsilon_b)m_v^2 + \varepsilon_b; \quad \varepsilon''_s = \varepsilon''_w m_v^2, \quad (2)$$

где ε'_s , ε''_s и ε'_w , ε''_w — действительная и мнимая часть диэлектрической проницаемости листьев и воды соответственно; ε_b — диэлектрическая проницаемость основы древесины, $\varepsilon_b = 3,0 + j0$ ($j = \sqrt{-1}$).

Механизм влияния влажности древесины на её диэлектрические свойства ещё недостаточно изучен. Древесное вещество представляет собой смешанный диэлектрик, состоящий из полисахаридов (целлюлоза, гемицеллюлоза; 70–80 %), лигнина (20–30 %) и экстрактивных веществ (2–5 %). Полисахариды и лигнин — полярные полимеры, которым свойственна дипольная, ионная и электронная поляризация, каждая из которых может преобладать в зависимости от частоты зондирующего излучения, температуры, влажности и плотности древесины. По влиянию влажности на диэлектрические параметры древесины можно установить четыре области (Торговников, 1986): 1) от абсолютно сухого состояния до влажности 5 % присутствует мономолекулярная влага; 2) от 5 до 18–23 % — адсорбционная влага; 3) от 18–23 % до предела насыщения клеточных стенок (примерно 30 %) — капиллярно-конденсационная влага; 4) выше 30 % — свободная влага. Первые три области относятся к связанной воде, молекулы которой тесно сцеплены с органической основой древесины посредством физических сил. Поскольку характер взаимодействия с древесиной связанной и свободной воды различен, каждый вид связи по-разному влияет на диэлектрические свойства влажной древесины, а на границах областей происходит существенное изменение диэлектрических параметров.

При увеличении влажности в области адсорбции на высоких частотах действительная часть диэлектрической проницаемости ε' растёт, что связано с увеличением количества диполей и ростом дипольной поляризации. Капиллярно-конденсационная влага повышает ε' в меньшей степени, чем адсорбционная. Увеличение количества свободной воды также пропорционально увеличивает ε' . Очевидно, это происходит из-за того, что в абсолютно сухом состоянии макромолекулы целлюлозы связаны между собой кислородными мостиками, препятствующими смещениям диполей молекулы под действием поля, а при увлажнении молекулы воды проникают между молекулами целлюлозы и ослабляют поперечные связи. Это приводит к увеличению подвижности дипольных групп. При повышении частоты до 2–5 ГГц диэлектрическая проницаемость воды мало меняется, однако при росте температуры она начинает снижаться. Это связано с тем, что при больших частотах поля молекулы не успевают следовать за его изменением, и значение ε' приближается к величине, обусловленной электронной поляризацией.

Для зелёных листьев объёмные доли свободной и связанной воды оказались приблизительно равными. Однако в общем случае большая часть воды находится в связанной форме. В древесине молодых деревьев содержание свободной влаги достигает 51 % объёма, для деревьев старше 40 лет — до 1 %. Содержание же связанной влаги составляет 11–13 % и мало изменяется с возрастом дерева. Для зелёных листьев вклад свободной воды велик, что приводит к увеличению ε''_s с частотой. При низких значениях влагосодержания (например, для ели $m_v = 0,17$) свободная вода практически отсутствует и зависимость ε''_s стволов ельника от частоты близка к таковой для связанной воды (Sellers et al., 1995).

В работе С. Н. Новика с соавторами (2006) приведена экспериментально измеренная зависимость действительной части диэлектрической проницаемости кедрового дерева как для отдельной хвоинки, так и для их совокупности от процентной весовой влажности. На графике линейной

зависимости $\varepsilon'(w)$ имеется излом, точка которого определяется переходом от связанной к свободной влаге в хвое кедр. Поскольку у отдельных хвоинок максимальное содержание связанной воды различается, то в массиве хвои точка излома размывается и лежит в пределах 10–18 % весовой влажности. Рост ε' с увеличением влажности подтверждает, что вода является переносчиком органических ионов, участвующих в формировании тока проводимости.

Зная диэлектрическую проницаемость хвоинок, можно рассчитать ε_{cr} кроны дерева. Диэлектрические свойства хвоинок и тонких веток практически совпадают, поэтому в дециметровом диапазоне длин волн для описания свойств кроны можно использовать среднее значение ε хвои и рассматривать объёмное содержание хвои и веток в кроне целиком. Считая хвою и ветки тонкими хаотично ориентированными стержнями цилиндрической формы, была получена формула (Chukhlantsev et al., 2003):

$$\varepsilon_{cr} = 1 + \frac{(1/3)V_{cr}(\varepsilon_{need} - 1) \cdot ((5 + \varepsilon_{need})/(1 + \varepsilon_{need}))}{1 - V_{cr} + (1/3)V_{cr}((5 + \varepsilon_{need})/(1 + \varepsilon_{need}))}, \quad (3)$$

где ε_{need} — диэлектрическая проницаемость хвоинок; V_{cr} — относительный объём, занимаемый кроной. В реальном лесу влажность составляет примерно 50 %, и тогда объём $V_{cr} = 0,08$ %, а объёмное содержание стволов — 0,12 %.

Понятно, что коэффициенты отражения и ослабления также сильно зависят от влажности элементов леса. Так, в частотном диапазоне 1–10 ГГц величина ослабления радиосигналов лесным пологом для $\varepsilon_s'' \approx 10$ (что соответствует мнимой части диэлектрической проницаемости хвои и древесины ели) записывается с помощью простого соотношения (Sorokin et al., 2020):

$$\gamma = 4,34 \frac{u}{\lambda} W_{fv}, \quad (4)$$

где γ — погонный коэффициент ослабления (в дБ), $u = 2,5 \dots 5$ в зависимости от вида растительности, $\lambda = 0,19$ м — длина волны, W_{fv} — влагосодержание лесной растительности. Оценить зависимость ослабления сигналов НС в лесном массиве от влажности можно, используя выражение:

$$T = \exp\left[-\frac{\gamma H}{\cos \theta}\right], \quad (5)$$

где T — коэффициент пропускания, экспериментально определяемый из отношения энергии на приёмниках, расположенных в лесу и на открытом пространстве; H — высота древостоя; θ — угол падения. Логарифмируя эту формулу, получим:

$$\gamma = -\frac{1}{H} \ln T \cos \theta. \quad (6)$$

Коэффициент пропускания рассчитывается по известной формуле Френеля, в которую входят угол θ и диэлектрическая проницаемость ε , вычисленные при разной влажности древостоя. Модель расчёта коэффициентов пропускания и ослабления навигационных сигналов в древостое с различной степенью влажности (выражения (1)–(6)) даёт лишь приблизительную оценку состояния древостоя в связи со значительной вариативностью параметров исследуемых лесных массивов. Реальную оценку влияния влажности исследуемых лесных массивов на коэффициенты пропускания и отражения сигналов НС могут дать только натурные измерения с учётом специфики исследуемых объектов.

Описание площадки и эксперимента

Эксперименты проводились в районе посёлка Памяти 13 Борцов Емельяновского района Красноярского края. На данном участке расположены лесопосадки разных пород. На *рис. 1а* (см. с. 157) продемонстрировано место проведения серии измерений кедр. Всего было проведено пять сеансов записи ослабленных сигналов. На *рис. 1б* представлена фотогра-

фия тестового участка. Регистрация сигналов НС диапазона L1 проводилась в период с мая по сентябрь 2024 г. при разных погодных условиях (без осадков/осадки) в целях детектирования зависимости амплитуды сигнала от влажности древостоя в разные сезонные циклы.

Запись сигналов, прошедших через лесной массив, осуществлялась с использованием четырёхканального приёмника-регистратора НСРП-04 (ООО «Инжиниринговое бюро Феникс», Красноярск) с частотой дискретизации 1 Гц и антенной с правой круговой поляризацией АМ475 (ООО «НПФ Электрон», Красноярск) (рис. 2а). Приёмная антенна устанавливалась на расстоянии 7 м от границы с лесом. Высота расположения фазового центра антенны 1 м. Диаграмма направленности ориентировалась вертикально вверх. Средняя высота древостоя — 19 м. Так же проводилось измерение влажности древостоя с использованием комбинированного влагомера МС-7825PS (см. рис. 2б).



Рис. 1. Место проведения экспериментов (а) и фотография кедрового массива (б)



Рис. 2. Четырёхканальный приёмник-регистратор НСРП-04 (а) и портативный влагомер МС-7825PS (б)

Исходя из измеренных данных по 40 стволам и вычисления среднего значения, динамика изменений средней влажности лесного массива (W) представлена на рис. 3 (см. с. 158). На графике показано, что с мая по июль процентное содержание влаги в стволах увеличивалось. В настоящей работе было необходимо привязаться к целочисленным значениям, чтобы зафиксировать и показать зависимость амплитуды сигнала от содержания влаги в лесном пологе.

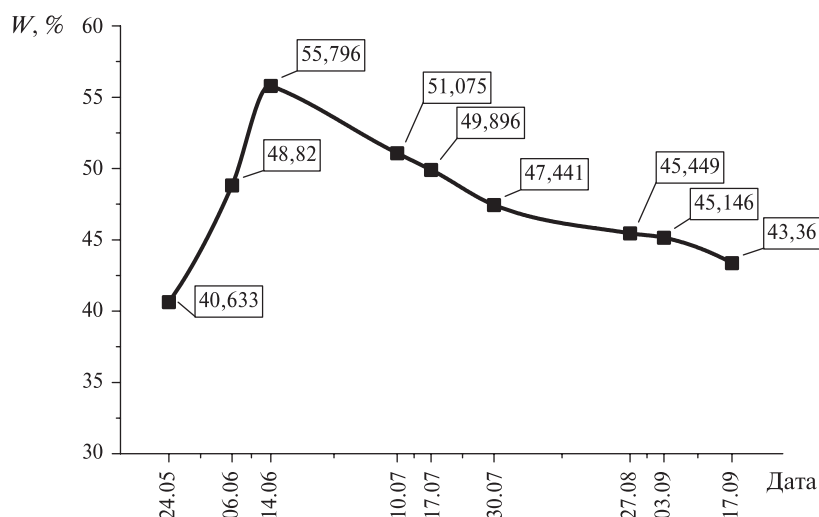


Рис. 3. Динамика изменения влажности в период с мая по сентябрь 2024 г.

Результаты измерений и их обсуждение

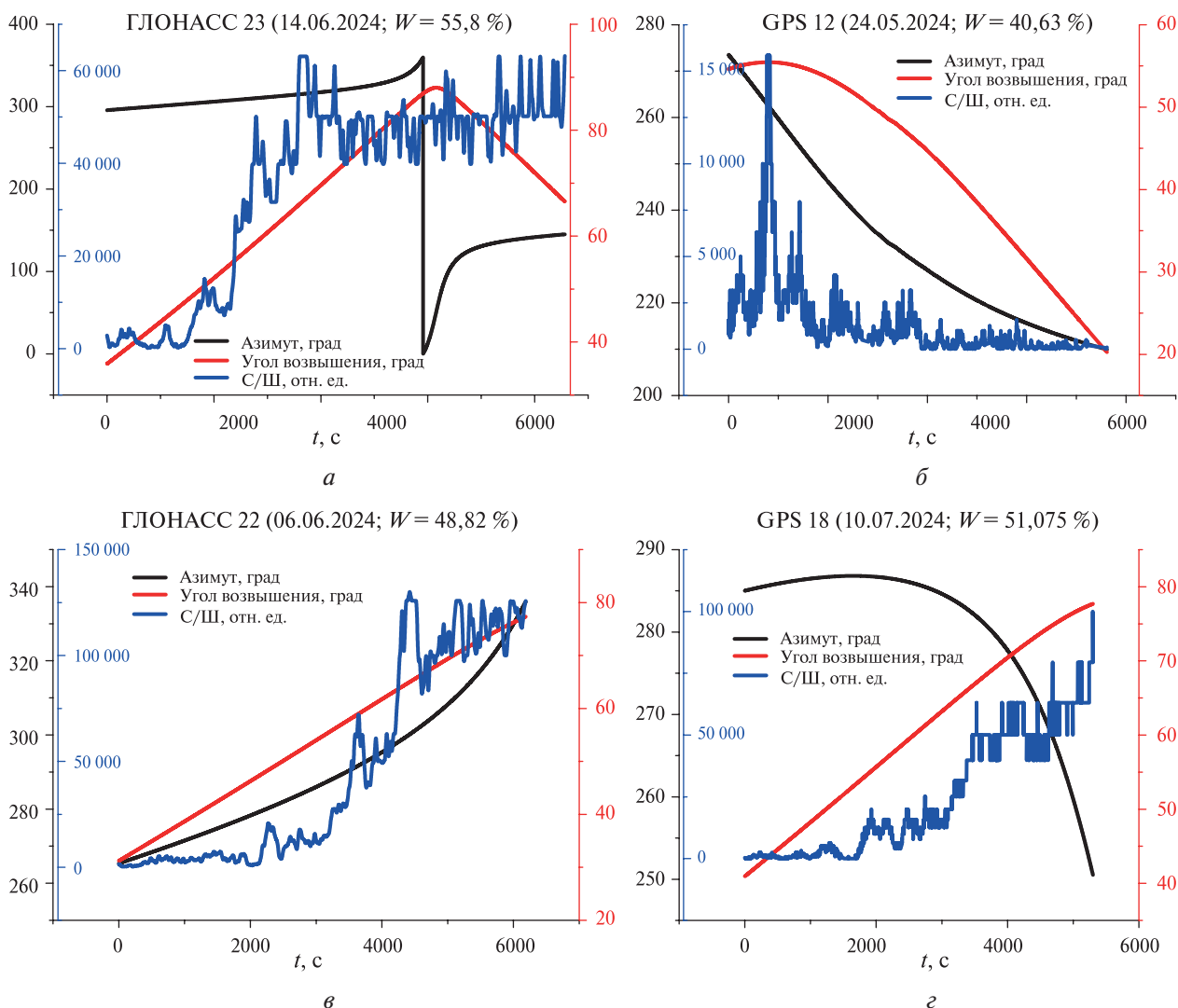


Рис. 4. Примеры АВЗ, полученные при регистрации сигналов НС, в лесном массиве с разной степенью влажности W

Обработка данных проводилась с помощью облачного сервиса первичной обработки данных (Малимонов и др., 2022). Амплитудно-временные зависимости (АВЗ), полученные с каждого сеанса, были отобраны для последующего сравнительного анализа по следующим критериям: а) диапазон азимутов лежит в месте зондируемого объекта (от 180–360°); б) диапазон углов возвышения одинаков для всех спутников и находится в области древостоя (от 30–55°). Примеры АВЗ, полученных при измерениях сигналов от НС в исследуемых лесных массивах, приведены на *рис. 4* (см. с. 158).

Здесь: C/Π — отношение сигнала НС к шуму на выходе приёмника, измеряемое в отн.ед.; азимутальный угол (в град); угол возвышения спутника над горизонтом в точке наблюдения (в град); W — значение средней влажности лесного массива (в %) в той же точке. Как можно видеть из *рис. 4*, АВЗ сигналов имеют сложные для формального описания формы. Тем не менее в радиофизике существует удобный для анализа таких зависимостей способ — фурье-анализ, осуществляющий преобразование вида:

$$A(t) \rightarrow A(\nu),$$

где $A(\nu)$ — спектральная плотность сигналов вида $A(t)$.

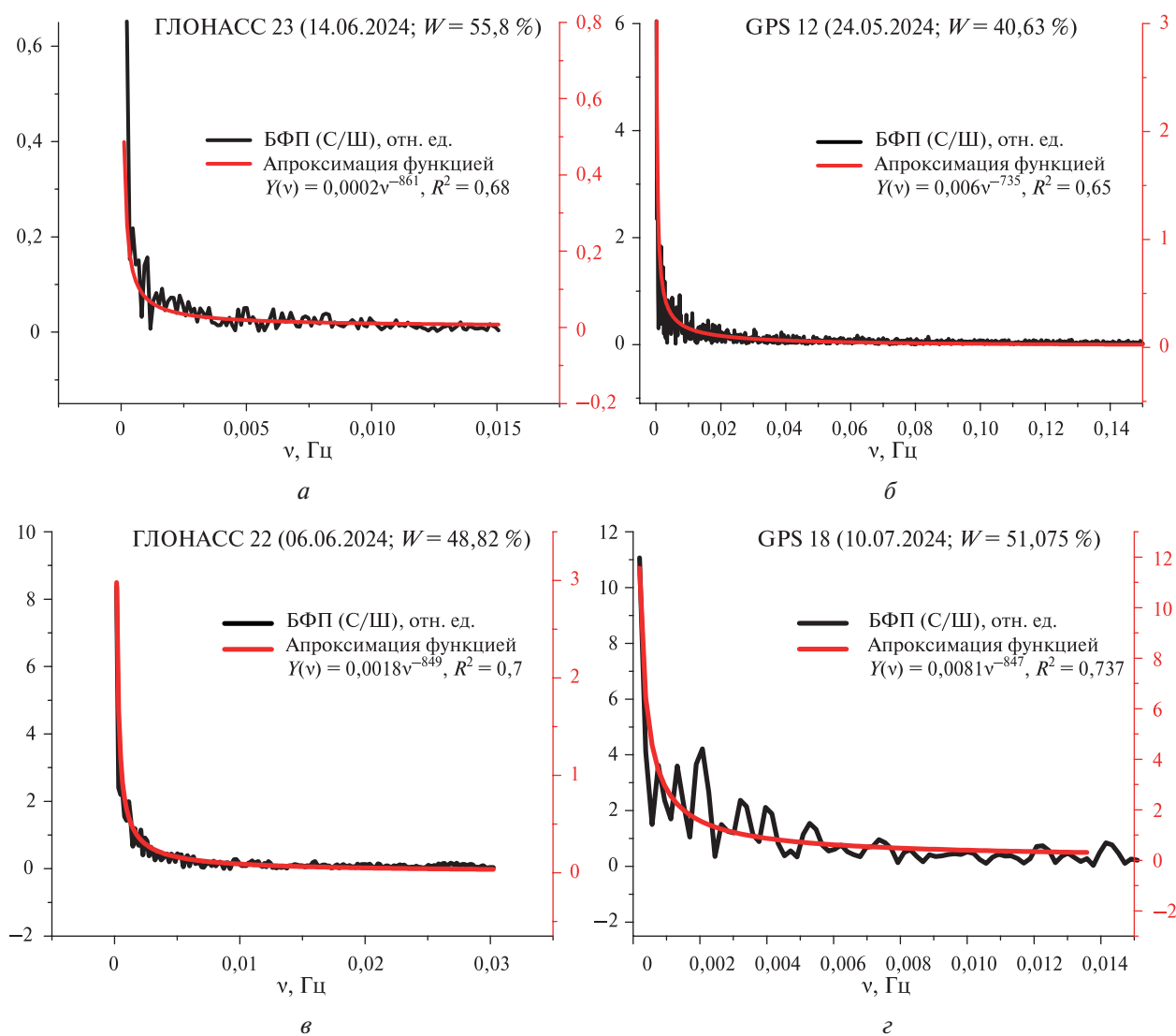


Рис. 5. Результаты обработки АВЗ $A(t)$ с помощью процедуры БФП

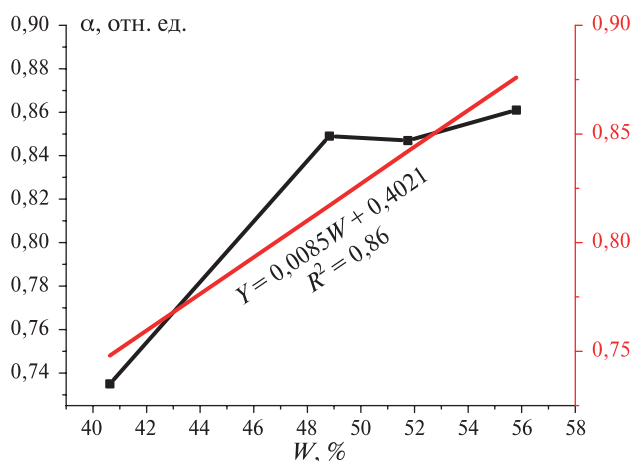


Рис. 6. Зависимость коэффициента α от величины влажности W

В настоящей работе для обработки полученных в ходе измерения АВЗ сигналов НС использовалась процедура быстрого фурье-преобразования (БФП). Интервал дискретизации времени (1 с) при выполнении БФП соответствовал максимальной частоте обновления данных, получаемых приёмником (1 Гц) в течение полного времени измерения (~1,5 ч). На рис. 5 (см. с. 159) приведены результаты примеров обработки АВЗ, изображённых на рис. 4, при помощи БФП.

Как видно из рис. 5, зависимости БФП (С/Ш) представляют собой затухающие функции шумоподобного вида, что обусловлено многолучевой интерференцией при прохождении сигнала НС через лесной массив, а также влиянием влажности и морфологических особенностей отдельных деревьев. Тем не менее зависимости, полученные после БФП АВЗ при прохождении сигнала через лесные массивы с разной влажностью W , отличаются друг от друга. Рекуррентный анализ зависимостей БФП (С/Ш) позволил определить, что их можно аппроксимировать показательной функцией вида:

$$Y(v) = A_1 v^{-\alpha},$$

где A_1 — амплитуда сигнала 1-й гармоники БФП (С/Ш) (в дБ или в отн. ед.); α — коэффициент затухания распределения БФП (С/Ш).

По результатам аппроксимации зависимостей БФП (С/Ш) для АВЗ, приведённых на рис. 4, был построен график зависимости коэффициента α от влажности W (рис. 6).

Из рис. 6 видно, что со значительной достоверностью $R^2 \approx 85\%$ можно наблюдать корреляцию между влажностью и затуханием сигналов от навигационных спутников в виде линейной зависимости.

Выводы

Таким образом, в результате проделанной работы можно сделать вывод о том, что увеличение влажности существенно влияет на электрофизические характеристики древостоя, что в свою очередь сказывается на поведении амплитудно-временной зависимости сигналов, принимаемых навигационными приёмниками. Чем выше влажность, тем больше эффект ослабления сигнала при прохождении через лесной полог.

Важно отметить, что в процессе измерений в течение года зафиксировано, что максимальные показатели влажности приходятся на момент интенсивного сокодвижения. В противоположность этому, в ходе проведения экспериментов существенного влияния осадков на значения влажности и, соответственно, на поглощение сигналов НС в лесном массиве не выявлено.

Результаты модельных и экспериментальных исследований, приведённых в настоящей работе, могут быть использованы для различных видов хозяйственной деятельности на территории Российской Федерации. Например, для противопожарной диагностики лесных массивов, контроля роста лесопосадок и др.

В дальнейшем предполагается проведение дополнительных исследований с целью совершенствования методик мониторинга лесных массивов с использованием сигналов глобальной навигационной системы.

Работа выполнена в рамках проекта государственного задания № FWES-2024-0027 Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН).

Литература

1. *Кашкин В. Б., Рублева Т. В., Симонов К. В., Кашкина Л. В., Перетокин С. А., Дергунов А. В., Кабанов А. А., Одинцов Р. В., Мацулев А. Н., Мальканова А. В., Сорокин А. В., Подопригора В. Г., Реушев М. Ю., Макаров Д. С., Харламов Д. В., Пономарев Е. И., Швецов Е. Г., Зуев Д. В., Миронов В. А., Кругляков А. С.* Прикладные аспекты исследования геосфер с использованием спутниковых технологий: монография. Красноярск: Сибирский федер. ун-т, 2023. 256 с.
2. *Малимонов М. И., Макаров Д. С., Харламов Д. В.* Облачный сервис первичной обработки, визуализации, фильтрации и сохранения данных с четырехканального приемника-регистратора сигналов навигационных спутников в частотном диапазоне L1. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2022667433. Рег. 20.09.2022.
3. *Новик С. Н., Завьялов А. С., Тельпуховский Е. Д.* Электрофизические и рассеивающие свойства элементов хвойного древостоя // Изв. высш. учеб. заведений. Физика. 2006. Т. 49. № 7. С. 57–65.
4. *Торговников Г. И.* Диэлектрические свойства древесины. М.: Лесная промышленность, 1986. 36 с.
5. *Chukhlantsev A. A.* Microwave emission and scattering from vegetation canopies // J. Electromagnetic Waves and Applications. 1992. V. 6. No. 7. P. 1043–1068. DOI: 10.1163/156939392X00490.
6. *Chukhlantsev A. A., Shutko A. M., Golovachev S. P.* Attenuation of electromagnetic waves by vegetation canopies in the 100–10000 MHz frequency band // J. Radio Electronics. 2003. No. 2. Article 3.
7. *Matzler C.* Microwave (1–100 GHz) dielectric model of leaves // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1994. V. 32. No. 4. P. 947–949. DOI: 10.1109/36.298024.
8. *Sellers P., Hall F., Margolis H. et al.* The Boreal Ecosystem-Atmosphere Study (BOREAS): An overview and early results from the 1994 field year // Bull. American Meteorological Soc. 1995. V. 76. No. 9. P. 1549–1577. DOI: 10.1175/1520-0477(1995)076<1549:TBESAO>2.0.CO;2.
9. *Sorokin A. V., Podoprighora V. G., Makarov D. S. et al.* Orientation ordering of tree elements in the dielectric permittivity model of a forest stand // Russian Physics J. 2020. V. 63. No. 2. P. 238–243. DOI: 10.1007/s11182-020-02026-2.

Monitoring forest plant moisture using L1-band navigation satellite signals

D. V. Kharlamov¹, D. S. Makarov¹, V. G. Podoprighora^{2,3}, M. Yu. Reushev^{1,3}

¹ *Krasnoyarsk Science Center SB RAS, Krasnoyarsk 660036, Russia
E-mail: kharlamov.dv@ksc.krasn.ru*

² *Kirensky Institute of Physics SB RAS, Krasnoyarsk 660036, Russia*

³ *Siberian Federal University, Krasnoyarsk 660041, Russia*

This paper presents the results of a research on biometric characteristics of woodlands, namely moisture content of forest and moisture content of underlying surface. The research has been carried out using the radio illumination method that uses signals from navigation satellites operating in the L1 band ($\lambda \approx 0.19$ m). During field tests, measurements were made of the attenuation of navigation signals in the forest area during its vegetative activity from May to September 2024. The tests were conducted in the area of the village of Pamyati 13 Bortsov, Yemelyanovsky District, Krasnoyarsk Krai, under different weather conditions (no precipitation/precipitation). In parallel with the measurements of the power of navigation signals, measurements of stand moisture were carried out using a portable moisture meter. The primary processing of the measurement results was performed using a cloud-based data processing service. The test results are presented in the form of amplitude-time dependences of the power of radio signals received by the navigation receiver and their amplitude-frequency characteristics obtained by data processing using the fast Fourier transform technique. To analyze the exper-

imental results obtained, the paper presents a dielectric model of the forest, with moisture of forest canopy taken into account. The studies show that the absorption of navigation signal power depends on moisture content of trees, and these data can be useful in tracking the state of forests.

Keywords: navigation satellite signals, radio transmission, layered media, forest, dielectric model, moisture

Accepted: 04.03.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-154-162

References

1. Kashkin V. B., Rubleva T. V., Simonov K. V., Kashkina L. V., Peretokin S. A., Dergunov A. V., Kabanov A. A., Odintsov R. V., Matsulev A. N., Malkanova A. V., Sorokin A. V., Podoprighora V. G., Reushev M. Yu., Makarov D. S., Kharlamov D. V., Ponomarev E. I., Shvetsov E. G., Zuev D. V., Mironov V. A., Kruglyakov A. S., *Prikladnye aspekty issledovaniya geosfer s ispol'zovaniem sputnikovykh tekhnologii: monografiya* (Applied aspects of geosphere research using satellite technologies: monograph), Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2023, 256 p. (in Russian).
2. Malimonov M. I., Makarov D. S., Kharlamov D. V., *Oblachnyi servis pervichnoi obrabotki, vizualizatsii, fil'tratsii i sokhraneniya dannykh s chetyrekhkanal'nogo priemnika-registratora signalov navigatsionnykh sputnikov v chastotnom diapazone L1* (Cloud service for primary processing, visualization, filtering and saving data from a four-channel receiver-recorder of navigation satellite signals in the L1 frequency range), Certificate of state registration of software No. 2022667433 (RU), Reg. 20.09.2022 (in Russian).
3. Novik S. N., Zav'yalov A. S., Tel'pukhovskiy Ye. D., Electrophysical and scattering properties of elements of coniferous stands, *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika*, 2006, V. 49, No. 7, pp. 57–65 (in Russian).
4. Torgovnikov G. I., *Dielektricheskie svoystva drevesiny* (Dielectric properties of wood), Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1986, 36 p. (in Russian).
5. Chukhlantsev A. A., Microwave emission and scattering from vegetation canopies, *J. Electromagnetic Waves and Applications*, 1992, V. 6, No. 7, pp. 1043–1068, DOI: 10.1163/156939392X00490.
6. Chukhlantsev A. A., Shutko A. M., Golovachev S. P., Attenuation of electromagnetic waves by vegetation canopies in the 100–10000 MHz frequency band, *J. Radio Electronics*, 2003, No. 2, Article 3.
7. Matzler C., Microwave (1–100 GHz) dielectric model of leaves, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1994, V. 32, No. 4, pp. 947–949, DOI: 10.1109/36.298024.
8. Sellers P., Hall F., Margolis H. et al., The Boreal Ecosystem-Atmosphere Study (BOREAS): An overview and early results from the 1994 field year, *Bull. American Meteorological Soc.*, 1995, V. 76, No. 9, pp. 1549–1577, DOI: 10.1175/1520-0477(1995)076<1549:TBESAO>2.0.CO;2.
9. Sorokin A. V., Podoprighora V. G., Makarov D. S. et al., Orientation ordering of tree elements in the dielectric permittivity model of a forest stand, *Russian Physics J.*, 2020, V. 63, No. 2, pp. 238–243, DOI: 10.1007/s11182-020-02026-2.