



ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ, МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

УДК 523.874.34

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАДИОТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЛЕСА В L-ДИАПАЗОНЕ

© 2000 г. А. А. Мильшин, А. Г. Гранков

Институт радиотехники и электроники РАН, Фрязино Московской обл.

Тел.: 526-91-50; e-mail: AMILSHIN@MS.IRE.RSSI.RU

Поступила в редакцию 10.11.99 г.

Представлены результаты анализа экспериментальных данных характеристик радиоизлучения (комплексная диэлектрическая проницаемость хвои, листвы, веток, стволов и полога; коэффициент пропускания кроной; интегральное ослабление пологом; радиояркая температура и коэффициент излучения полога и системы лес-поверхность) леса или отдельных компонентов древостоя в L-диапазоне, полученных при наземных и самолетных измерениях.

ВВЕДЕНИЕ

СВЧ-радиометрия L-диапазона (15.8-63 см) весьма привлекательна для дистанционного исследования лесов в качестве потенциального метода глобального наблюдения за состоянием фитомассы леса, а также влажности лесных почв как составляющей глобального и регионального мониторинга влажности почв. Эти направления - ключевые звенья в исследованиях цикла углерода и круговорота воды в биосфере при изучении климата и планетарных изменений [1,2].

Дециметровый диапазон волн, в котором лес является полупрозрачной средой, наиболее подходит для определения влажности под пологом леса. Лес - наиболее сложный объект среди растительных сообществ с точки зрения построения модели излучения и рассеяния волн. Это объясняется его сложной эколого-морфологической структурой, имеющей мозаичную горизонтальную структуру и выраженную вертикальную стратификацию (по ярусам: древесный, кустарниковый, травяно-кустарничковый и мохово-лишайниковый), где вклад каждой части яруса в интегральное излучение и рассеяние определяется его биометрическими (густота, высота, вес зеленой массы с единицы площади, влажность и влагозапас растительности) и электрофизическими (комплексная диэлектрическая проницаемость - КДП) показателями. К недостаткам дециметрового диапазона относится низкое пространственное разрешение, которое составляет единицы километров при самолетной съемке и десятки-сотни километров при спутниковых наблюдениях. При таких размерах элемента разрешения и значительной пространственной изменчивости типов лесной растительности и биометрических параметров леса использование расчетных методов оценки характеристик излучения вызывает

затруднения, что актуализирует задачу развития экспериментальных исследований.

Экспериментальные данные о характеристиках радиоизлучения леса в дециметровом диапазоне крайне ограничены, что обусловлено развитием в последние три десятилетия спутниковой радиометрии миллиметрового и сантиметрового диапазонов. Исследование характеристик излучения леса в L-диапазоне США и Европе стимулировал запуск кораблей многоразового использования "Shuttle", на борту которых установлен радар серии SIR с синтезированной апертурой L-диапазона [3, 4]. В России наибольший вклад в исследование леса СВЧ-радиометрическими методами внесли Институт радиотехники и электроники РАН и Институт леса и древесины им. В.Н. Сукачева СО РАН [5-10]. В 1970-е годы исследования леса проводились в миллиметровом и сантиметровом диапазонах, в конце 1980-х и в 1990-х годах исследователи начали осваивать дециметровый диапазон.

В данной работе анализируются экспериментальные характеристики радиоизлучения лесного полога и системы "почва-лес" в дециметровом диапазоне.

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Древесная растительность состоит из смеси воздуха, сухой древесины, связанной и свободной воды. Комплексная диэлектрическая проницаемость растительности ϵ_v в соответствии с теорией диэлектрических свойств смеси определяется как $\epsilon_v = \epsilon_d + \epsilon_{bw} v_{bw} + \epsilon_{fw} v_{fw}$ [11], где v_{bw}, v_{fw} - плотности заполнения единицы объема соответственно связанной и свободной водой; $\epsilon_{bw}, \epsilon_{fw}$ - КДП связанной и свободной воды; $\epsilon_d = \epsilon'_d + j\epsilon''_d$ - диэлектрическая проницаемость сухой растительности.



Величина $\varepsilon'_d = 1.5-3$, а ε''_d не превышает 0.01, и ею можно пренебречь. Диэлектрические свойства связанной воды подобны диэлектрическим свойствам льда, величина ε_{nw} составляет $3+j0$ [12]. Поскольку доля связанной воды в растительности не превышает единиц процентов от свободной воды, то влиянием связанной воды в выражении для ε_v можно пренебречь. Существуют различные модели, описывающие диэлектрические свойства растительности [12]. В дециметровом диапазоне КДП растительности удовлетворительно описывается соотношением [9]

$$\varepsilon_v = \varepsilon'_{fv} - j\varepsilon''_{fv} \approx m_v \varepsilon_{fv} \quad (1)$$

где m_v - относительное объемное влагосодержание растительности.

В табл. 1 представлены экспериментальные данные КДП компонентов соснового и орехового деревьев. Измерения КДП хвойного дерева выполнены в ходе проведения эксперимента BOREAS [13] в бо-реальных лесах Канады в августе 1993 г. Деревья древостоя молодой сосны имели характерный диаметр стволов около 6.7 см и высоту 5.7 м, для древостоя старой сосны эти величины составили соответственно 12.6 см и 9.6 м. КДП зависит от возраста дерева, типа растительного элемента (РЭ - иголки, ветви, стволы) и структуры растительного элемента (кора, древесина). Поскольку КДП элементов растительности зависит главным образом от относительного объемного влагосодержания, то различия в ε_v однотипных РЭ можно объяснить различным влагосодержанием.

Измерения КДП компонентов орехового дерева проводились *in situ* в ходе подспутникового эксперимента в Калифорнии в августе 1987 г. на плантации грецкого ореха [14]. Экспериментальные данные показывают, что действительные и мнимые части диэлектрической проницаемости для стволов, основных и вспомогательных ветвей различаются незначительно, а для оболочки зеленого и спелого ореха значения КДП различаются в несколько раз, что обусловлено различием не только влажности оболочки, но и ее структуры. В работе исследовалась зависимость КДП от толщины внешнего слоя ствола. Измерения выполнялись для пяти слоев - коры ствола и слоев толщиной 1, 2, 4 и 7.5 см (включая кору) при диаметре ствола 15 см. Величина ε_v для коры составила около $5-j1.5$, для слоев 1, 2, 4 и 7.5 см соответственно $-20-j6$, $60-j15$, $35-j7.5$, $20-j5$. Синхронно с измерениями КДП проводились измерения метеорологических и биохимических характеристик среды, включая и измерения водного потенциала листьев в пологе на участках плантации со 100%-ной потенциальной эвапотранспирацией для исследования суточной динамики зависимости КДП ствола и водного потенциала полога. При суточных колебаниях водного потенциала от 0.5

Таблица 1. Экспериментальные значения КДП деревьев в L-диапазоне

Вид растительности	i EV	<
Старая сосна		
Наружная часть ствола	38.5	13.7
Внутренняя часть ствола	3.9	2.3
Ветки снаружи	20.9	7.5
Ветки внутри	5.7	2.7
Иголки	20.1	9.1
Молодая сосна		
Наружная часть ствола	42.2	11.0
Внутренняя часть ствола	13.3	4.8
Ветки снаружи	29.2	9.0
Ветки внутри	10.7	3.9
Иголки	29.2	8.7
Внешняя оболочка ореха		
Зеленого	35	12.9
Сухого	7	4.4
Ореховое дерево		
Зеленый ствол	28	8.5
Основные ветки	34	8.5
Вспомогательные ветки	30	7.5

(после полуночи) до -1.5 (после полудня, когда потери на транспирацию максимальны) МПа КДП слоев синхронно уменьшалась до значений, близких к КДП коры. Величина суточных вариаций КДП уменьшалась с увеличением толщины слоя ствола; наибольшие изменения наблюдались в 2-см слое.

При расчетах ε_{fv} по релаксационной формуле Дебая необходимо учитывать ионную составляющую проводимости воды σ_0 , обусловленную минерализацией растительной влаги. Прямые измерения минерализации водного раствора в стеблях и листьях кукурузы, выполненные в работе [12], показали, что величина минерализации эквивалентного NaCl раствора составляет 9.7‰ для стеблей и 12.7‰ для листьев. По данным волноводных измерений затухания для образцов хвойного и лиственного лесов в работе [15] получены оценки величины σ_0 при температуре 0°C, которая составила 0.4-0.5 См/м соответственно для редкого и густого лесов. Пересчет проводимости на минерализацию 5 дает диапазон солёности 4.7-5.9‰.

Используя экспериментальные значения ε''_d для сосны из табл. 1, данные о геометрических размерах и плотности РЭ и модель КДП (1), оценим величину солёности растительной влаги. Полагаем, что влажность хвои и веток равны соответственно 115 и 110% [16]. Для расчета параметров ди-



Таблица 2. Экспериментальные значения коэффициента пропускания и интегрального ослабления кронами деревьев в L-диапазоне

Тип дерева	Возраст, годы	Высота, м	Листовой индекс	Коэффициент пропускания		Интегральное ослабление, Нп	
				март	июнь	ветки	листья
Красный дуб	35	12	2	0.67	0.5	0.36	0.15
	-	-	-	0.7	0.6	0.4	0.29
Вишня	25	5	2.7	0.62	0.54	0.48	0.14
Клен	40	12	3.5	0.62	0.49	0.48	0.24
Липа	40	13	6	0.62	0.46	0.48	0.3

электрической проницаемости минерализованной воды использовались аппроксимации Стогрин [17]. Величина солёности для хвои молодой сосны составила 9.6 ‰. Оценка солёности для веток выполнена для среднеарифметического значения диэлектрической проницаемости наружной и внутренней частей веток $\epsilon_v'' = 6.5$ и составила 12.2 ‰.

Расчет эффективной диэлектрической проницаемости лесного полога ϵ_c может быть выполнен в квазистатическом приближении с помощью выражения [11]

$$\epsilon_c^\beta = 1 + V_v (\epsilon_v^\beta - 1), \quad (2)$$

где V_v - плотность заполнения единицы объема растительностью; ϵ_v - диэлектрическая проницаемость растительности; β - параметр. При $\beta = 1$ соотношение (2) известно как линейная модель, при $\beta = 0.5$ - как рефракционная модель и при $\beta = 0.33$ - как кубическая модель. Мнимая часть ϵ_c , характеризующая тепловые потери электромагнитной волны в растительных элементах, определяется из (2) как $\epsilon_c'' = V_v \epsilon_v''$. Учет формы рассеивающих макрочастиц (иголок, листьев, веток) осуществляется в теории диэлектрических свойств матричных систем с помощью форм-фактора A_p для поляризации p . В этом случае выражение для мнимой части имеет вид [11, 15] $\epsilon_c'' = V_v A_p \epsilon_v''$.

Используя экспериментальные данные о проводимости, весе рассеивающих элементов в единице объема, относительном весовом влагосодержании растительного элемента, относительной доли хвойных и лиственных пород из работы [15], нетрудно получить оценки эффективной КДП леса с использованием линейной модели на волне 21 см. Вещественная часть КДП варьирует в пределах 1.00095-1.071 и 1.0028-1.19 соответственно для хвойного и лиственного лесов. Аналогично для мнимой части диапазон изменений составляет 0.00019-0.014 и 0.00058-0.038 [18].

Эффективные значения КДП системы почва-лес могут существенно отличаться от КДП лесного полога в дециметровом диапазоне из-за влияния излучения почвы; значение КДП густого леса, по

данным измерений на волне 70 см, в направлении, близком к надиру, составило около 5 [19].

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОГЛОЩЕНИЯ

Интегральное ослабление τ_c лесным пологом высотой h определяется через мнимую часть КДП полога [11]: $\tau_c = 4\pi h / \lambda \text{Im}(\sqrt{\epsilon_c})$, а с учетом $\epsilon_c'' \ll 1$ имеет вид $\tau_c \approx 2\pi h / \lambda \epsilon_c''$. Используя соотношение $Q = h v_v \rho_v$, где Q - удельное количество фитомассы на единицу площади; ρ_v - удельная плотность сырой растительности, выражение для интегрального ослабления можно преобразовать к виду [20]

$$\tau_c \approx A_p 2\pi / \lambda Q / \rho_v \epsilon_v''$$

Для экспериментального определения интегрального ослабления обычно выполняют измерения коэффициента прохождения растительного слоя t , который связан с τ_c простым соотношением $t = \exp(-\tau_c)$. В работе [21] исследовалась сезонная динамика коэффициента прохождения для крон различных деревьев. Измерения проводились с помощью направленного в зенит радиометра с волной 21 см в 1994 г. в Vrana Park недалеко от г. София, Болгария. Характеристики исследуемых деревьев и значения измеренного коэффициента прохождения за март и июнь приведены в табл. 2, данные для дуба во второй строке получены по результатам измерений в 1993 г. для другой группы деревьев. Благодаря измерениям в весенний и летний сезоны можно разделить вклад листьев τ_L ; и ветвей τ_B в интегральное поглощение кроны $\tau_c = \tau_L + \tau_B$, лиственных пород деревьев.

Результаты выполненных оценок представлены в табл. 2; они показывают, что для исследуемых пород деревьев на долю листвы приходится 22-39% интегрального ослабления кронами. В работе [18] выполнены измерения интегрального поглощения густой кроной 35-летней ели на волне 43 см. Диаграмма направленности радиометра полностью перекрывалась кроной, величина поглощения составила 0.52 Нп.



НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Таблица 3. Характеристики радиоизлучения веток березы, ели и сосны в процессе высыхания на волне 18 см

Тип дерева, ветки	Высота слоя, см	Фитомасса, кг	Плотность, г/см ³	ЯТ, К	Коэффициент излучения	Интегральное ослабление, Нп
Береза	51	66	0.0324	164	0.577	0.403
	33	38	-	148.5	0.504	0.351
	33	38	0.0286	135	0.461	0.309
	33	25	0.0254	129.5	0.442	0.292
	32	22	0.0262	133.5	0.462	0.31
Сосна	29	38	0.0332	153	0.52	0.412
	30	38	0.0313	162	0.551	0.40
	28	38	0.0334	162	0.559	0.409
Ель	35	100	0.0396	167	0.571	0.423
	-	50	0.0396	163	0.557	0.407
	-	30	0.0396	136	0.465	0.313
	-	20	0.0396	97	0.332	0.202
	-	12	0.0396	65	0.222	0.126

В работе [22] исследовались изменения яркостной температуры (ЯТ) и коэффициента излучения свеженарубленных веток березы и сосны в процессе высыхания образцов и образцов веток ели при изменении фитомассы. Измерения ЯТ проводились радиометром "Омега" на волне 18 см, образцы размещались на металлическом листе. В процессе измерений контролировались высота слоя растительности, его фитомасса и удельная плотность. Выполним оценки интегрального ослабления, используя для расчета коэффициента излучения χ и интегрального ослабления слоем растительности следующее соотношение:

$$T_c^{BT} = \chi T_c = T_c (1 - \text{Re}xp(-2\tau_c)),$$

где T_c^{BT} - измеренная яркостная температура; $R = 1$ - коэффициент отражения металлического листа; T_c - температура слоя растительности. Результаты оценок τ_c представлены в табл. 3. Для ели получена линейная зависимость между ослаблением и фитомассой M , кг: $\tau_c = 0.008M$ для $M < 50$ кг.

При разработке дистанционных методов изучения леса наибольший интерес представляют оценки характеристик излучения, полученные по результатам дистанционных измерений. Выполненные многоволновые измерения с пространственным разрешением в десятки метров с борта самолета-лаборатории ИЛ-18 над участком подтопленного леса, 60—80% площади которого было залито водой, позволили оценить спектр интегрального ослабления пологом [9]. Величина τ_c составила 1.5, 1 и 0.5 Нп соответственно на волнах 10, 20 и 30 см. В работе [6] проводились прямые измерения влажности почв под пологом лиственного леса для изучения зависимости абсолютной ошибки определения влажности по данным

СВЧ-радиометрических измерений от степени залесенности. Исследования выполнялись с борта самолета АН-2 в июле 1984 г. вблизи г. Мурома с помощью надирно-го радиометра на волне 30 см с пространственным разрешением 35 и 100 м на трассе протяженностью 4.5 км. Наземные измерения влажности почв выполнялись на девяти контрольных площадках трассы с различной степенью залесенности от 0 до 70% и разным гидрологическим режимом - величина объемного влагосодержания изменялась от 0.14 до 0.35 г/см³. На основании данных о ЯТ системы почва-лес и ЯТ почвы в контрольных точках вычислялась величина интегрального ослабления пологом леса. По результатам обработки получена регрессионная зависимость эффективного интегрального ослабления пологом лиственного леса от степени залесенности ξ : $\tau_c = -0.6606 + 1.280524\xi$ с коэффициентом корреляции 0.94.

В работе [23] выполнена оценка эффективного интегрального ослабления излучения пологом леса по данным самолетных измерений с помощью СВЧ-радиометра на волне 21 см с пространственным разрешением около 2 км. Измерения выполнялись над лесным полигоном площадью 540 км². Около 60% полигона составляют залесенные участки местности с мелколиственными (береза, осина, ольха) и хвойными (ель, сосна) породами деревьев. Оценки показали, что наиболее вероятный диапазон изменения величины коэффициента передачи полога $\beta = \exp(-\tau_c)$ составляет 0.59-0.8, что соответствует изменению интегрального поглощения лесным пологом 0.115-0.265 Нп. Следует отметить, что речь идет об эффективных значениях поглощения и пропускания пологом, осредненных по площади 2x2 км; при меньших размерах элемента разрешения диапазон величин расширяется



МИЛЬШИН, ГРАНКОВ

Таблица 4. Экспериментальные характеристики излучения лесов в L-диапазоне

Районы измерений, тип леса, носитель	Дата съемки	λ , см	Разрешение на местности, м	χ	T_{sc}^{BT} , К
Красноярский край, хвойный лес, самолет ИЛ-18	1974-1976	10, 20, 30	100-200	0.93, 0.9, 0.84	-
Владимирская обл., район Муром, лиственный лес, самолет АН-2	4.07.84	30	35-100	0.85-0.92	248-259
Калужская обл., район Калуги, смешанный лес, вертолет КА-26	10.10.90	27	140	0.81-0.91	224-251
Беларусь, район Солегорска, смешанный лес, вертолет МИ-2	5.09.91	27	70	0.87-0.92	250-264
Германия, Бавария, смешанные леса, самолет D-228	6.11.92	21	200	0.83-0.91	229-252
Тверская обл., район Ржева, смешанный лес, самолет АН-2	14.05.93	21	2000	0.81-0.90	235-260
Московская обл., район Шатуры, смешанный лес, самолет АН-2	23.09.94	21	150	0.83-0.93	240-273

в сторону уменьшения β и увеличения τ_c . Средние значения $\beta = 0.68$, $\tau_c = 0.19$. Анализ погрешности оценки влажности лесных почв под пологом, выполненный в [23], показал, что погрешность определения коэффициента передачи полога $\delta\beta$ доминирует в определении $\delta\rho_w$ и составляет около $\delta\rho_w = 0.06$ г/см*.

В практических приложениях при оценке фитомассы кроны удобна следующая форма представления интегрального ослабления: $\tau_c = \eta Q$, где η - коэффициент удельного поглощения. Используя данные локальных измерений фитомассы, полученные в Центральном биосферном заповеднике [24], расположенном в нескольких километрах от района съемки, оценим η . Величина фитомассы кроны на площадках 20 x 20 м колебалась от 14.5 т/га для хвойного леса до 30.4 т/га для смешанного леса, содержащего 40% лиственных пород деревьев. Этому диапазону соответствует коэффициент удельного поглощения $\eta = 0.079-0.087$ Нп м²/кг. В общем случае для леса предпочтительнее использовать другую запись для τ_c : $\tau_c = \eta W$, где W - удельное содержание влаги в растительности, кг/м², поскольку зависимость Q от W в общем случае нелинейна [8, 16].

ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

Интенсивность излучения лесного полога T_c^{BT} определяется температурой полога T_c , коэффициентами прохождения t и отражения растительности r :

$$T_c^{BT} = \chi T_c = T_c(1 - t - r) = T_c(1 - \exp(-\tau_c) - r_0(1 - \exp(-\tau_c))),$$

где χ - коэффициент излучения полога; r_0 - альbedo полубесконечного слоя растительности, в

дециметровом диапазоне для леса не превышает 0.05 и им можно пренебречь. Экспериментальные исследования излучения полога в СВЧ-диапазоне [6, 8, 21, 25] показывают, что излучательными элементами полога являются листья, хвоя и ветки. Интенсивность излучения зависит от фитомассы кроны, геометрии растительных элементов, их объемного влагосодержания, плотности и температуры. Величина коэффициента излучения и ЯТ кроны лиственных деревьев с учетом данных о $1 - t$ [12] составляет в марте: $\chi = 0.3-0.38$, $T_c^{BT} = 85-108$ К и увеличивается в июне: $\chi = 0.4-0.54$, $T_c^{BT} = 117-58$ К. Исследования соснового полога на радиопрозрачность в диапазоне 2.25-28 см, выполненные в работе [25], показали, что 3-метровый полог в дециметровом диапазоне является полупрозрачным; наименьшее излучение полога приходится на длину волны 10-7 см; излучательная способность полога растет пропорционально его сомкнутости; при сомкнутости полога 0.7 и более коэффициент излучения полога близок к единице. Величина измеренной яркостной температуры густой кроны 35-летней ели на волне 43 см составила в августе 117.5 К [18].

ЯТ системы почва-лес-атмосфера при зондировании в надир для дециметрового диапазона волн определяется выражением

$$T_{sc}^{BT} = T_s^{BT} t + T_c^{BT} (1 + r_s t) + T_{sky}^{BT}$$

где первое слагаемое характеризует радиоизлучение почвы, ослабленное лесным пологом; второе слагаемое определяет прямое и переотраженное от почвы с коэффициентом отражения r_s излучение лесного полога; третье слагаемое определяет

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

вклад прямого и переотраженного излучения атмосферы и космоса.

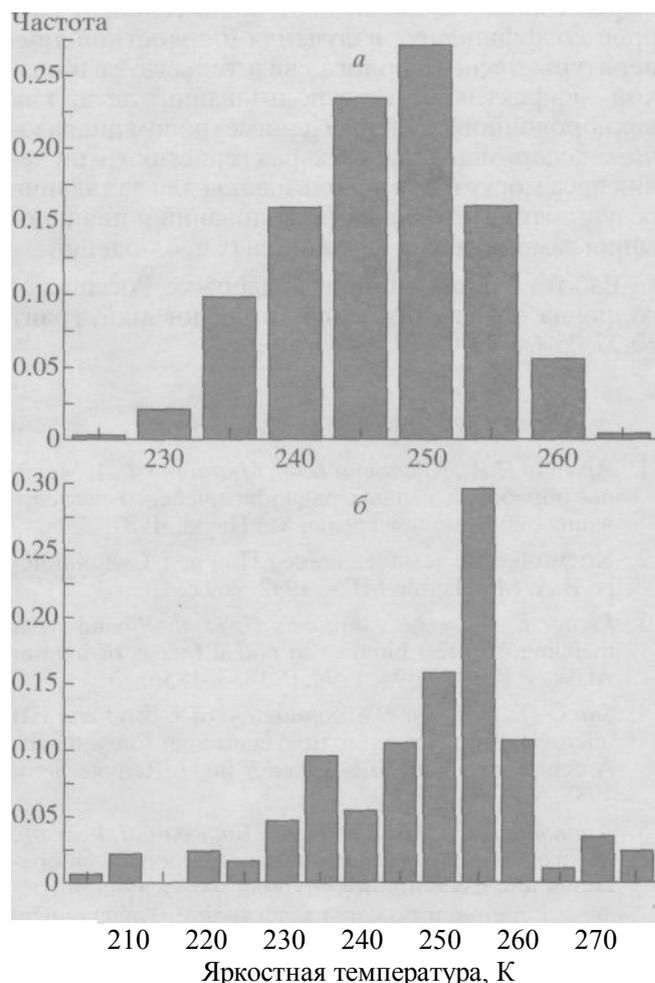
При обработке СВЧ-данных необходимо учитывать горизонтальную неоднородность зондируемой поверхности (мозаичность) в пределах элемента разрешения антенны. Практический учет мозаичности ограничивается рассмотрением ситуации с двумя элементами в антенном пятне, один из которых - почва без леса, другой - залесенные участки ландшафта. Выражение для ЯТ элемента

разрешения T_p^{BT} имеет вид

$$T_p^{BT} = T_s^{BT} (1 - \zeta) + \zeta T_{sc}^{BT},$$

где ζ , - относительная площадь залесенного участка в элементе разрешения антенны. Коэффициент ζ может быть определен по данным фото или видеосъемки либо с использованием топографических карт [23].

Экспериментальные значения коэффициента излучения χ и ЯТ системы почва-лес T_{sc}^{BT} при зондировании в надир с пространственным разрешением от 35 м до 2 км для хвойных, лиственных и смешанных лесов, полученные в ходе проведения шести летних экспериментов, представлены в табл. 4 [9, 10, 23, 25-27]. Рассмотрим более детально статистические характеристики ЯТ лесных районов в Тверской и Московской областях. Как следует из табл. 4, пространственное разрешение радиометров в этих экспериментах различалось более чем на порядок. Анализ данных по Тверской обл. показал, что величина ЯТ изменяется от 226 до 260 К, среднее значение составило 244.5 К, медиана - 245.5 К, среднеквадратичное отклонение (СКО) - 6.64 К. Гистограмма распределения ЯТ, представленная на рисунке *а*, имеет асимметричную форму, что обусловлено попаданием в поле зрения антенны элементов ландшафта без леса ($T_{sc}^{BT} < 235$ К) и с различной степенью залесенности ($T_{sc}^{BT} \Rightarrow 235$ К). Для Московского лесного района диапазон ЯТ составил (К): 201-273, среднее значение - 245.6; СКО - 13.1. Гистограмма распределения ЯТ (рисунок *б*), как и в случае с Тверским полигоном, имеет асимметричную форму. Распределение ЯТ можно разделить на три области: значениям $T_{sc}^{BT} < 215$ К соответствуют участки почвы без леса с высоким увлажнением; во вторую область 220-265 К попадают участки с различной степенью залесенности; третью область составляют лесные участки с $T_{sc}^{BT} > 265$ К. Дополнительный анализ с привлечением измерений на волне 2.25 см и карты природной пожарной опасности леса показал, что участки леса второй области соответствуют первому классу пожарной



Гистограмма ЯТ лесного полигона по данным измерений на волне 21 см: *а* - низкое пространственное разрешение, Тверская обл.; *б* - высокое пространственное разрешение, Московская обл.

опасности, а лес третьей области - второму, более пожароопасному классу [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнена систематизация экспериментальных данных характеристик радиотеплового излучения леса. Проведен анализ данных диэлектрической проницаемости компонентов лесного полога, интегрального ослабления пологом и ЯТ леса, полученных при лабораторных, полевых и самолетных измерениях в ограниченном спектре условий наблюдения (диапазон волн от 21 до 43 см; угол визирования в надир; разрешение на местности от 35 м до 2 км; сезоны - весна, лето, осень). Экспериментальные значения коэффициента излучения и ЯТ системы почва-лес для хвойных, лиственных и смешанных лесов европейской части России, полученные в весенне-летне-осенний период в диапазоне волн 21-30 см, варьируют в широком диапазоне 0.81-0.93 и 224-273 К и имеют



МИЛЬШИН, ГРАНКОВ

выраженный сезонный ход. Значительный разброс коэффициента излучения и яркостной температуры лесного полога свидетельствует о низкой эффективности использования леса как калибровочного репера в дециметровом диапазоне. Экспериментальные характеристики излучения леса могут быть использованы для валидации результатов модельных исследований и планирования самолетных и спутниковых наблюдений.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 97-05-64793.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арманд Н.А., Крапивин В.Ф., Мкртчян Ф.А. Методы обработки данных радиофизического исследования окружающей среды. М.: Наука. 1987. 270 с.
2. Космическое земледелие / Под ред. Садовниченко В.А. М.: Изд-во МГУ, 1992. 269 с.
3. Rignot E., Way J.B., Williams C. et al. P-band radar mapping of forest biomass in boreal forests of interior Alaska//IGARSS'94. 1994. P. 1853-1855.
4. Sun G.Q., Simonett D.S. Simulation of L-band and HH microwave backscattering from coniferous forest stands: A comparison with SIR-B data // Int. J. Remote Sens. 1988. V. 9. № 5. P. 907-925.
5. Аблязов В.С., Арманд Н.А., Бородин Л.Ф. и др. Многоцелевая радиофизическая летающая лаборатория для изучения и контроля окружающей среды // Горение и пожары в лесу. Ч. 2. Красноярск, 1979. С. 144-157.
6. Батурич В.Е., Гранков А.Г. и др. Результаты экспериментального исследования влияния растительности на эффективность СВЧ-радиометрического метода определения влажности почвогрунтов // Тез. докл. 1-го Всесоюз. симпоз. "Исследование сельскохозяйственных полей радиофизическими методами". Иркутск, 1985. С. 29.
7. Валендик Э.Н., Кисляхов Е.К., Сухонин А.И. Оценка пожарной опасности таежных лесов по радиотепловому излучению // Исслед. Земли из космоса. 1980. № 3. С. 14-19.
8. Мильшин А.А., Гранков А.Г., Шелобанова Н.К. Исследование сезонной динамики характеристик излучения системы поверхность-лес-атмосфера в СВЧ-диапазоне: Препринт № 3 (624). М.: ИРЭ РАН, 1998. 62 с.
9. Чухланцев А.А., Курдюшев К.П., Шутко А.М. СВЧ-излучение земной поверхности при наличии растительного покрова // Радиотехника и электроника. 1979. Т. 24. № 2. С. 256-264.
10. Liberman B., Grankov A., Milshin A. et al. Experimental study of fire risk by means of passive microwave and infrared remote sensing methods//IGARSS'96.27-31 May 1996. Lincoln, Nebraska USA, 1996. V. 1. P. 175-177.
11. Kerr Y.H., Wigneron J.P. Vegetation model and observations. A review // ESA/NASA Int. Workshop. VSP, B.J. Choudhury, J.H. Kerr, E.G. Njoku, and P. Pampaloni. 1994. P. 317-344.
12. Ulaby F.T., Jedlicka R.P. Microwave Dielectric Properties of Plant Materials // IEEE Trans. Geos. Rem. Sens. 1984. V. GE-22. № 4. P. 406-415.
13. Chauhan N., Lang R., Ranson J., Kilic O. Multy-Stand Radar Modeling from a Boreal Forest: Results from the Boreas Intensive Field Campaign - 1993 // IGARSS'95, 10-14 July 1995, Firenze, Italy, 1995. V. 2. P. 981-983.
14. Way J., Paris J., Dobson M.C. et al. Diurnal Change in Trees as Observed by Optical and Microwave Sensors: The EOS Synegrism Study // IEEE Trans. Geos. Rem. Sens. 1991. V. 29. № 6. P. 807-821.
15. Редькин Б.А., Клочка В.В. Расчет усредненного тензора комплексной диэлектрической проницаемости растительных сред // Радиотехника и электроника. 1977. № 8. С. 1596-1599.
16. Смирнов В.В. Органическая масса в некоторых лесных фитоценозах европейской части СССР. М.: Наука, 1971. 362с.
17. Райзер В.Ю., Черный И.В. Микроволновая диагностика поверхностного слоя океана. СПб.: Гидрометеиздат, 1994. 231 с.
18. Гранков А.Г., Мильшин А.А. Экспериментальные характеристики радиоизлучения леса в L-диапазоне // Применение дистанционных радиофизических методов в исследованиях природной среды. III всерос. науч. конф., Муром. 17-18 июня 1999 г. С. 110-111.
19. Edison A.R., Moore R.K., Warner B.D. Radar terrain return, measured at near-vertical incidence // IRE Trans. 1960. AP-8. № 3.
20. Wegmuller U., Matzler C., Njoku E. Canopy opacity models // ESA/NASA Int. Workshop. VSP, B.J. Choudhury, J.H. Kerr, E.G. Njoku and P. Pampaloni. 1994. P. 375-387.
21. Vichev B., Krasteva E., Rostov K. Study of Seasonal Evolution of Tree Emission Using Zenith-Looking Microwave Radiometers // IGARSS'95, 10-14 July 1995. Firenze, Italy, 1995. V. 2. P. 981-983.
22. Кондратьев К.Я., Мелентьев В.В., Назаркин В.А. Космическая дистанционная индикация акваторий и водосборов. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 247 с.
23. Мильшин А.А., Гранков А.Г., Мишанин В.Г. Картирование температурно-влажностного режима лесных систем по данным самолетной фотосъемки, ИК-измерений и СВЧ-радиометрических измерений в L-диапазоне // Исслед. Земли из космоса. 1999. № 5. С. 85-93.
24. Косолапов В.В., Козодеров В.С. Новые приложения аэрокосмических измерений к исследованиям лесных экосистем // Исслед. Земли из космоса. 1994. №4. С. 68-80.
25. Амбарников В.Н., Елагин А.Н. Использование радиометрического метода для исследования дровяного полога на радиопрозрачности в лабораторных условиях // Матер. 2-го всесоюз. симпоз. "Дистанционное зондирование земных покровов радиометодами". Экспресс-информ. 7-89. Л., 1989. С. 50-51.
26. Liberman B.M., Grankov A.G., Mil'shin A.A. et al. Application of microwave remote sensing methods for estimation of grounds and waters states in southern Bavaria region // Proc. 7th British Electromagnetic Measure-



ments Conference, The Winter Gardens Malvern, UK.
1995. P. 33.

27. Гранков А.Г., Драгун В.С. и др. Использование
дистанционных СВЧ-радиометрических методов в

экологическом мониторинге Беларуси: Препринт
№ 10. Минск: РНТЦ дистанционной диагностики
природной среды "Экомир" АНБ и ГК Беларуси
по экологии, 1992. 30 с.

Some Experimental Results of Microwave Emission of Forest in L-Band

A. A. Mil'shin and A. G. Grankov

Institute of Radioengineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, Fryazino, Moscow Region

Abstract—Some results of the analysis of experimental ground and aircraft data of characteristics of microwave radiation (a complex dielectric constant of needles, leaves, branches, trunks and canopy; a transmissivity of crowns; an opacity of a canopy; a brightness temperature and emissivity of a forest canopy and a forest-surface system) of a forest of stand components in L-band are submitted.