

РАДИОГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДРЕВОСТОЕВ

Лесная растительность, как и другие природные объекты, имеет фундаментальное свойство излучения и отражения электромагнитных волн, в т.ч. и в радиодиапазоне, который широко используется для осуществления дистанционного зондирования земной поверхности [11; 13; 14]. Несмотря на то, что эти свойства относятся к "существенным", т.е. к таким, без которых объект не может существовать [8], они, пожалуй, наименее исследованы, особенно в географическом аспекте. Очевидно, что радиоотражательные (излучательные) характеристики древостоев определяются, прежде всего, совокупностью состояний и свойств их самих. В связи с этим возникает необходимость осуществления детальных наземных, географических по сути, исследований лесных массивов с целью нахождения признаков, которые определяют отражательные (излучательные) характеристики древостоев.

Изучение географических механизмов и установление географических закономерностей формирования радиопортрета территории определяют сущность географического подхода к изучению радиофизических полей геосистем [9]. Исследование непосредственных характеристик излучения и отражения, разумеется, является задачей разных отраслей физики, но установление закономерностей пространственно-временной изменчивости параметров географических объектов, определяющих названные радиофизические характеристики, является задачей физической географии.

Как известно [8], основной характеристикой отражения радиоволн является удельная эффективная поверхность рассеивания (УЭПР). Это справедливо и в отношении древостоев, УЭПР которых определяется, в первую очередь, рассеиванием излучения на поверхности крон, а также многократным его переотражением в кроновом пространстве. Указанные два процесса зависят от шероховатости поверхности полога леса, влагосодержания древостоя и концентрации фитомассы. Исследование этих трех (шероховатость, влагосодержание и концентрация) географических характеристик позволяет надеяться на успешное решение задач дистанционного зондирования, поскольку именно они определяют изменчивость параметров отраженного радиосигнала.

Экспериментальные измерительные работы проводились на модельных деревьях, отобранных в Задонецком лесничестве Харьковской области, на территории, относящейся к подрайону свежих и сухих кленово-липовых дубрав, реже суборей и боров на песках, который входит в Харьковский лесорастительный район в составе лесорастительной области свежего гряда [12]. Лесоаккасионные характеристики деревьев и описание экспериментальных исследований, осуществлявшихся по специфическим методикам, приведены в работах [5; 6].

Шероховатость полога леса определяет геометрические свойства древостоя как системы рассеивающей радиоволны и создающей сложную мозаику

переотражения и теневых эффектов, благодаря разнообразию форм и размеров составных элементов растительного покрова. Роль шероховатости изменяется при разных углах зондирования (ϑ). С увеличением шероховатости УЭПР уменьшается при малых углах падения ($\vartheta < 10^\circ$) и возрастает при $\vartheta > 10^\circ$.

При исследованиях лесной растительности выделяют три вида шероховатости полога леса [2]. Макрошероховатость – неровности лесного полога, напрямую связанные с рельефом земной поверхности. Она не рассматривается в данной работе, поскольку может быть легко определена с удовлетворительной точностью при помощи детальных топографических карт. На макрошероховатость накладывается ещё два вида неровностей: 1) шероховатость полога леса (мезошероховатость), которая определяется высотой деревьев, размерами и формами крон, а также расстояниями между ними; и 2) шероховатость верхней кромки полога леса, иначе говоря неровность границы воздух – растительность (микрошероховатость), обусловленная размерами элементарных составляющих кроны дерева (т.е. листьев, веток, ауксисластов и т.д., создающих рассеивающий ансамбль кроны) и расстояниями между ними.

В качестве параметров, характеризующих мезошероховатость, нами взяты: коэффициент шероховатости (К) [10], который в наших исследованиях представляет собой отношение длины кривой, описывающей профиль поверхности кроны (h), к длине её горизонтальной проекции (d). Кроме того вычислены площади: максимального вертикального сечения кроны (S), боковой поверхности (Q), а также объем кроны (V). Три последних параметра рассчитывались нами по методике, заимствованной из работы [1]. Значения параметров мезошероховатости отражены в табл.1.

Таблица 1

Характеристики шероховатости поверхности крон лесообразующих пород

Параметр Порода	Дуб	Клен	Липа	Ясень	Береза	Осина	Ива	Сосна
h, м	23.9	30.8	68.2	15.7	50.9	38.3	15.7	40.8
d, м	6.5	6.3	7.0	4.1	3.9	14.1	5.0	4.5
K	3.67	4.88	9.81	3.83	13.04	8.51	3.14	9.07
S, м ²	49.97	46.5	102.58	19.21	28.24	24	19.76	26.15
Q, м ²	204.51	185.33	388.64	174.62	110.21	103.87	97.53	110.54
V, м ³	173.44	148.54	435.9	55.13	62.84	60.73	58.74	68.72

Значения коэффициента свидетельствуют о том, что кроны деревьев имеют очень шероховатую поверхность. Установлено, что наибольших значений будет достигать УЭПР берёзы, имеющей наибольший коэффициент шероховатости крон (K=13.04), несмотря на в целом пониклую форму её кроны. Близких к ней значений будет достигать УЭПР липы и осины, для которых значения коэффициента шероховатости достигают $K \approx 8-10$. Наименьшее рассеивание радиоволн будет свойственно кронам дуба, клена, ясеня и ивы, у которых значения K лежат в пределах 3–5.

Площадные и объёмные сведения о кроне позволяют получить дополнительное представление о мезошероховатости, однако следует помнить, что они, в отличие от коэффициента шероховатости, сильно зависят от возраста деревьев, эдафических факторов и условий произрастания.

Для оценки микрошероховатости крон основных лесообразующих пород (дуба, клена, липы) нами по аналогии с [2; 10] были взяты такие параметры тонкой структурной организации кроны, как расстояние между центрами листовых пластин (l_n) и расстояние между концами веток 1-го порядка, т.е. конечных в кроне (l_b), значения которых измерены в пространстве и в надир (между проекциями центров листовых пластин (концов веток) на горизонтальную плоскость). Определены длины самых периферийных веток кроны (L), а также их диаметр на проксимальном (d_1) и дистальном (d_2) концах (табл.2).

Таблица 2

**Статистические характеристики
микрошероховатости крон**

Параметр	l_n		l_b		L	d_1	d_2
	в простр.	в надир	в простр.	в надир			
Дуб	8.0	7.5	26.7	22.1	5.8	2.8	2.1
Клен	13.4	8.8	8.6	33.2	5.1	3.3	2.6
Липа	7.4	5.5	27.0	20.6	11.0	3.8	2.13

Проведенные эксперименты позволили выявить степень информативности этого параметра шероховатости для оценки, прогнозирования и моделирования радиолокационных отражений от лесных покровов. Для установления достоверности различий микрошероховатости различных пород деревьев к полученным данным был применен t -критерий Стьюдента и критерий неоднородности дисперсий Фишера. При этом 95%-й уровень принимался достаточным для подтверждения достоверности.

t -критерий показал наличие существенных различий между средними значениями по всем параметрам кроны. Таким образом, установлена достоверная неоднородность у разных древесных пород. Иначе говоря, подтверждено, что микрошероховатость верхней кромки полога лесной растительности, выраженная через средние значения параметров кроновой архитектоники является информативной характеристикой, применимой для идентификации отраженного от земной поверхности радиолокационного сигнала. По дисперсиям и среднеквадратичным отклонениям значимых различий параметров между породами установить не удалось.

Влагосодержание компонентов лесного древостоя является одной из ключевых характеристик, определяющих параметры радиоотражения (излучения). При заданной текстуре и шероховатости УЭПР линейно возрастает с увеличением влажности [8], однако наличие водяной плёнки на поверхности фитоэлементов приводит к заметному снижению УЭПР, которое может достигать 10 дБ [7]. Содержание влаги определялось весовым методом, путем повторного взвешивания исследуемого материала после выдерживания его в термостате на протяжении шести часов при температуре 105°C.

Учитывая широкий диапазон частот дистанционного зондирования, нами на протяжении года было исследовано влагосодержание фитоэлементов разных размерностей (листья, ветки, кора) для лиственных (осина) и хвойных (сосна) пород (табл.3).

Особое значение имеет влажность листовых пластин, которая, при прочих равных условиях, определяет интенсивность отраженного радиосигнала.

Установлено, что содержание влаги в хвое колеблется на протяжении года от 49 до 66%. Такая амплитуда образуется преимущественно за счет существенного повышения влажности в начале июня. Этот максимум связан с интенсивной вегетацией и образованием молодых побегов. В другие месяцы амплитуда составляет около 11%, а влажность, как правило, остаётся в пределах 50-55%. Замечены минимумы, приходящиеся на март-апрель, в целом же существует тенденция некоторого уменьшения содержания влаги к концу осени. Влажность листовых пластин осины от момента распускания до стадии стабилизации существенно уменьшается. Молодые листья имеют повышенную влажность (около 75%), однако в зрелом возрасте становятся менее влажными (60-65%). Пожелтевшие листья осины имеют ещё несколько (на 2%) меньшую влажность.

Таблица 3

**Влажность (%) различных элементов
лесного древостоя по месяцам**

Элемент древостоя	Влажность (%) по месяцам												Средн.	Δ(±)
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII		
СОСНА														
Хвоя	59	51	49	49	51	66	55	57	60	55	50	50	54.3	±17
Ветки	–	51	50	50	58	58	61	50	58	–	–	–	50.75	±11
Кора	50	51	45	48	48	50	51	48	49	48	49	49	48.8	±6
Травостой соснового леса					70	81	76	73	70	72	79	–	74.4	±11
ОСИНА														
Листки	–	–	–	78	75	65	70	63	60	–	–	–	68.5	±18
Ветки	47	50	45	46	50	48	50	50	60	55	50	47	49.8	±15
Кора	50	40	40	41	41	43	40	40	40	40	48	50	42.75	±10
Травостой осинового леса					82	83	80	70	72	74	76	–	76.7	±13

Годовой ход влажности веток сосны отличается относительной стабильностью (амплитуда 6%) в отличие от осины, у которой значения этого показателя достигает 15%. Осине также свойственна тенденция уменьшения влажности веток в зимний период.

Сложный характер влагосодержания имеет кора деревьев. Однако, при усреднении на протяжении месяца, когда влияние отдельных дождей вуализируется, амплитуда годового хода влажности коры является минимальной (6-10%). Т.е. кора имеет наиболее стабильное содержание влаги на протяжении года, которое у сосны несколько выше, чем у осины.

Как сосна, так и осина имеют существенную общую закономерность: наибольшую годовую амплитуду влажности имеют листья (хвоя) – ±17...±18%, а наименьшую – кора ±6...±10%.

Таким образом, при проведении дистанционного зондирования, при прочих равных условиях, изображения осины и сосны будут существенно отличаться лишь в диапазоне длин волн, соответствующих удвоенному размеру листовых пластин (хвои), поскольку влажность последних существенно (на 18%) отличается. На других частотах интенсивность рассеивания радиоволн будет слабо отличаться благодаря практически одинаковому влагосодержанию их веток и коры.

Лесной травостой сравнительно слабо влияет на параметры отраженного радиосигнала. Тем не менее, его влагосодержание также было изучено с учетом того, что благодаря сквозистости крон какая-то часть радиоволн отражается и от нижних ярусов леса. В целом влажность травостоя на 10-20% выше, чем листьев, она имеет сравнительно небольшое пространственное варьирование и находится преимущественно в пределах 70-75% (сосна) и 75-80% (осина). В сосновом лесу максимальная влажность травяного покрова отмечена в начале лета (июнь) и достигает 81%. В осиновом лесу наибольшая влажность наблюдается несколько ранее (в начале вегетации) и достигает 82-83%. На протяжении года отмечается общая тенденция к снижению влагосодержания, прослеживающаяся до сентября, после чего оно вновь возрастает, хотя и не так сильно как при весеннем развитии растительности.

Концентрация фитомассы, при неизменных влажности и частоте зондирующей волны, будет определять степень рассеивания последней, а, соответственно, и интенсивность отраженного радиосигнала. Главным параметром является интегральная концентрация фитомассы (табл.4), поскольку она определяет плотность крон и степень проникновения зондирующей радиоволны в их глубину.

По этому показателю выделяются кроны дуба и берёзы, имеющие наивысшую концентрацию фитомассы и максимальную степень отражения радиоволн. Клён, липа и ясень имеют наименее плотную крону, обеспечивающую относительно свободное прохождение зондирующей волны в кроновое пространство, её многократное переотражение от различных элементов кроны, ослабление и, как следствие, минимальную интенсивность отражения радиоволн. Кроны осины, ивы и сосны по концентрации фитомассы занимают промежуточное положение между двумя вышеназванными группами деревьев, что отразится в адекватном рассеивании радиоволн, интенсивность которого будет ниже относительно первой группы, но выше, нежели у второй.

Таблица 4

Объем кроны и концентрация фитомассы лесообразующих пород

Порода	Объем, м ³	Концентрация фитомассы кг/м ³		
		Всего	в т.ч.листья	в т.ч.ветки
Дуб	173.44	0.61	0.05	0.52
Клен	148.54	0.17	0.03	0.13
Липа	435.9	0.08	0.02	0.05
Ясень	55.13	0.18	0.04	0.12
Береза	62.84	0.87	0.05	0.28
Осина	60.73	0.49	0.14	0.34
Иванченко Н.И.	58.74	0.31	0.05	0.24
Сосна	68.72	0.43	0.10	0.28

Полученные результаты могут быть использованы как входные параметры для электродинамических и математических моделей растительного покрова. Они являются неотъемлемым условием правильного дешифрирования

данных, полученных с помощью дистанционных носителей, поскольку связывают радиофизические свойства древостоев с их реальными географическими характеристиками, благодаря чему позволяют установить географические закономерности формирования собственного и вторичного излучения лесных массивов.

Кроме того, излучение и отражение электромагнитных волн – фундаментальные свойства геосистем, и их изучение открывает новые возможности для географической науки. Установление закономерностей формирования собственного и вторичного излучения природных объектов в СВЧ-диапазоне важно как с точки зрения новейшей отрасли географии – радиофизики ландшафта [3; 4], так и с точки зрения получения информации, необходимой для решения вполне самостоятельных научно-прикладных задач, связанных с изучением природной среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Агеевко А.С., Лебединский В.В.* Морфометрический анализ крон растущих деревьев // Применение аэрофотосъемки при изучении лесного и болотного мелиоративного фондов. – Л.: ГО СССР, 1973. – С.22–28.
2. *Баскакова Л.В.* Радиофизические свойства лесных массивов // Вестн. Харьк. ун-та. – 1998. – №402. – С.133–134.
3. *Берущашвили Н.Л.* Геофизика ландшафта. – М.: Высшая школа, 1990. – 287 с.
4. Дистанционное зондирование земных покровов радиометодами / Тез. докл. Всесоюз. науч.-тех. симпозиума. – М.: Радио и связь, 1985. – 135 с.
5. *Корнус А.О.* Радиоформуоча структура дендрогенних радіогеосистем для цілей дистанційного зондування: Дис... канд. геогр. наук 11.00.11. – Харків, 1998. – 175с.
6. *Корнус А.О.* Географічний аналіз радіоформуочих властивостей лісової рослинності // Географія і сучасність: 36. наук. пр. – Вип.1. – К.: Вид-во Національного педагогічного університету ім.М.П.Драгоманова, 1999. – С.81–88.
7. *Кулёмин Г.П.* Обратное рассеивание сантиметровых и миллиметровых радиоволн от земной поверхности // Распространение и дифракция радиоволн в миллиметровом диапазоне: Сб. науч. тр. – К.: Наук. думка, 1984. – С.17–27.
8. *Некос В.Е.* Методики радиогеографии. – Харьков: ХГУ, 1989. – 88 с.
9. *Некос В.Е., Бутенко В.И.* Теория и методология исследования физических полей геосистем. – К.: УМК ВО, 1988. – 95 с.
10. *Педосенко Н.В.* Географический анализ свойств радиоформирующего слоя открытых почв: Автореф. дис...канд.геогр.наук 11.00.11 / ВНИИВО. – Харьков, 1990. – 17 с.
11. *Сердюков В.М., Патыченко Г.А., Синельников Д.А.* Аэрокосмические методы географических исследований. – К.: Вища школа, 1987. – 223 с.
12. *Степаненко Б.Ф., Федин И.Ф., Улановский М.С.* Лесорастительное районирование типов леса Украинской и Молдавской ССР // Тр. Харьк. с.-х. ин-та. – 1978. – Т.258. – С.6–28.
13. *Hinton J.* The best of both worlds: developing GIS for vector and raster data analysis // GIS Europe. – November, 1994. – Vol.3. – No 9. – P.32–34.
14. *Paloniemi S.* Reliability of satellite imagery in forest inventory by compartments // Surveying science in Finland. – June, 1995. – Vol.13. – No 1. – P.26.