

# Методики описания лесных территорий в целях обеспечения эффективного дешифрирования спутниковой информации РСА

Л.М. Атрошенко<sup>2</sup>, В.Н. Горобец<sup>1</sup>, Н.Н. Горобец<sup>1</sup>,  
С.И. Костяшкин<sup>3</sup>, Л.П. Сафронова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина  
61077 Украина, г. Харьков, пл. Свободы, 4  
E-mail: [Nikolay.N.Gorobets@univer.kharkov.ua](mailto:Nikolay.N.Gorobets@univer.kharkov.ua)

<sup>2</sup> Научно-производственное объединение «КВ-А-НТ»  
61183 Украина, г. Харьков, ул. Дружбы Народов, 244  
E-mail: [cw-a-nt@max.net.ua](mailto:cw-a-nt@max.net.ua)

<sup>3</sup> Харьковская государственная лесоустроительная экспедиция  
62458 Украина, Харьковская обл., пос. Покотиловка, ул. Железнодорожная, 11  
E-mail: [XDLE@vilcom.net](mailto:XDLE@vilcom.net)

Излагаются методики описания древостоев, направленные на априорное наземное получение связующих параметров между результатами ДЗЗ с использованием РСА и лесохозяйственными характеристиками. Сформулирован перечень актуальных для лесного хозяйства задач. С использованием полученных параметров удастся значительно повысить эффективность дешифрирования результатов зондирования лесопокрытых территорий. Эти параметры могут также использоваться для решения задач распространения в лесных массивах радиоволн системы GPS и мобильной связи.

## Введение

Использование в целях зондирования Земли из космоса радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) в последние годы получает все большее распространение. Рентабельность их применени во многом зависит от круга задач, технологии решения которых отработаны до практического уровня. Расширение этого круга невозможно без развития методик адекватного для данного метода ДЗЗ описания подстилающих поверхностей, синтеза пространства признаков результатов ДЗЗ и характеристик лоцируемого объекта, соответствие которых однозначно определяет не только сам объект, но и его состояние в тех или иных условиях. Изложению некоторых методик такого описания древостоев и посвящена данная работа.

## 1. Задачи дистанционного зондирования лесопокрытых территорий

Радиолокационные данные высокого разрешения, полученные РСА, базировавшемся на КА «Алмаз», позволили нам для исследуемых лесопокрытых территорий уточнить границы выделов до  $p > 98\%$ . Как в хвойных, так и в лиственных лесонасаждениях достигается хорошее разрешение монопородных выделов с различной высотой, выделов, отличающихся только по бонитету. Четко оконтуриваются осиново-березовые «блюдца», возникающие вследствие подтопления сосняков близкостоящими грунтовыми водами. Надежно диагностируются и оконтуриваются территории негативного влияния на продуктивность лесов техногенных загрязнений воздуха в районах влияния химических и т.п. предприятий. Дешифрирование данных РСА с привлечением результатов априорных специальных наземных исследований инфраструктуры отдельных лесных пород позволило с высокой степенью точности дистанционно оценивать таксационные параметры выделов и количество деловой древесины [1].

Полученные результаты дают основание для разработки полноценных практических методик. К ним относятся методики решения таких лесохозяйственных задач как уточнение границ кварталов и выделов, их площадей; создание автоматизированной системы непрерывной лесотаксации,

в том числе контроля эффективности мероприятий по качественному состоянию лесов и непрерывности их использования, лесовосстановления; контроля проведения рубок ухода, санрубок, оценки текущего среднего прироста древесины на 1 га, оценки количества деловой древесины. Открывается возможность более точной кадастровой оценки, а также оценки экологического состояния лесов.

Другой класс задач составляют задачи прогнозирования и оконтуривания территорий вспышек вредителей и болезней леса, оперативной и точной оценки ущерба от таких явлений, оконтуривания территорий произрастания особо ценных лесных пород, территорий, зараженных растениями – паразитами (омела). Важны также задачи экологического мониторинга и оценки характеристик жизнедеятельности лесных экосистем: их многообразия, расчета депонирования углерода (в соответствии с Киотским соглашением), оценки количества выделяемого лесами кислорода, количества биомассы (опад), принимающей участие в почвообразовании, и многие другие научные и практические задачи.

В особом ряду стоят задачи прогнозирования чрезвычайных ситуаций (например, путем оконтуривания территорий с повышенной пожароопасностью, территорий будущего паводка), ускорения их ликвидации (координатная привязка очагов горения в условиях сильной задымленности), оперативной и точной оценки нанесенного ущерба и затрат на ликвидацию последствий ЧС. Большую практическую значимость представляет разработка методик наблюдения и дешифрирования данных ДЗЗ в целях обеспечения оценки ущерба от нарушения режима хозяйствования (несанкционированные рубки, перерубы), обнаружения, оконтуривания и оценки ущерба от природных катаклизмов (ветролом, ветровал, снеголом).

Перечень актуальных задач лесного хозяйства названными методиками далеко не исчерпывается. Для практического использования таких методик в качестве технологий на заключительном этапе их создания необходимо обеспечение соответствующей нормативной базы. На начальной же стадии исследования прежде всего необходима детальная отработка методик априорных и сопутствующих наземных наблюдений, адекватных задачам описания лесных территорий для обеспечения продуктивности дешифрирования данных ДЗЗ.

## 2. Методы изучения параметров инфраструктуры древостоев

Таксационные характеристики древостоев (возраст, высота, бонитет) плохо коррелируют с данными ДЗЗ. Как следствие, зачастую с использованием РСА дистанционно удается различить их только по породному составу. Для решения же обширного круга задач дистанционного исследования лесопокрываемых территорий требуется разработка методик описания древостоев, которые давали бы с одной стороны характеристики, коррелирующие с параметрами результатов ДЗЗ, а с другой – имели бы четкую и понятную взаимосвязь с таксационными и другими характеристиками древостоев.

Рассмотрим методы изучения распределения элементов древостоя по площади.

Элементам древесной растительности присваивается порядок: листья и хвоя – элементы нулевого порядка; ауксибласты (побеги этого года) – элементы первого порядка; ветви, на которых растут ауксибласты – элементы второго порядка и т.д. Таким образом, ствол в зависимости от породы и возраста дерева является элементом 3-8 порядка. Древостой в целом характеризуется как древостой  $n$ -го порядка – по модальному порядку лесообразующей растительности. Порядок древостоя в целом фактически отражает его возрастную группу: подрост (3), молодняк (4), средневозрастной (5), приспевающий (6), спелый (7), перестойный (8).

На тестовом участке с однородными таксационными характеристиками (выдел) организуется регулярная выборка: отбирается количество ветвей различной ориентации по сторонам света и высоте, пропорциональное общему количеству ветвей аналогичной ориентации и высоты. Производится подсчет количества элементов  $n-1$ -го порядка на  $n$ -ом, строятся соответствующие распределения плотности вероятности (распределения  $(n-1) - n$ ; см., например, рис. 1).

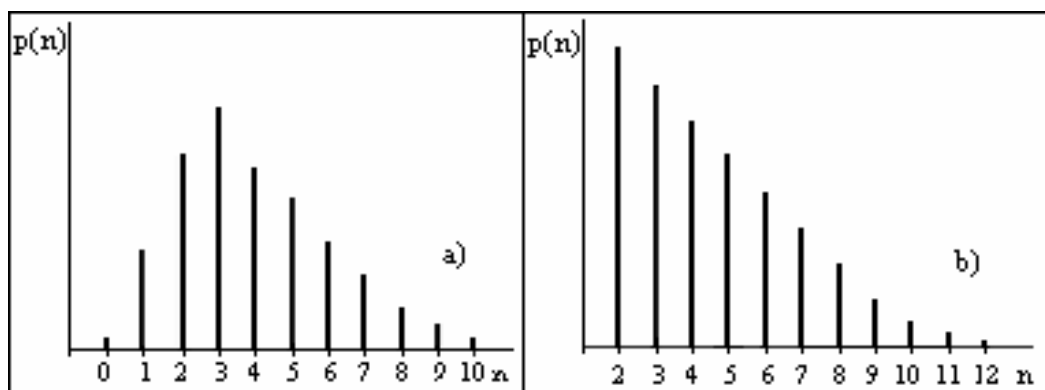


Рис. 1. Плотность вероятности распределения количества элементов: а) листьев на ауксибластах; б) ауксибластов на ветвях

В основном параметры полученных распределений являются видоспецифическими. Возрастная специфика наблюдается лишь у подростка (модальные значения распределений 0 – 1 и 1 – 2 сдвинуты вправо, что соответствует факту повышенного обмена веществ у деревьев молодого возраста), у спелых и в большей степени у перестойных деревьев (модальные значения распределения 0 - 1 сдвинуты влево, а модальные значения распределения самого старшего порядка – вправо, что хорошо согласуется с представлением о замедлении накопления древостоями биомассы после наступления спелости). У лиственных деревьев элементы 0-го порядка (листовые пластины) располагаются только на элементах 1-го порядка (рис. 2). Очень важно, что параметры этих распределений не меняются даже под воздействием экстремальных влияний. Так, например, в 1991 г. на одной из тестовых площадок Спиваковского полигона - стационара в середине мая были получены распределения для средневозрастного дуба черешчатого. В III декаде мая на этом участке леса наблюдалась вспышка дубового шелкопряда, что привело к полному оголению деревьев. Однако уже в середине июня того же года вновь выросшие листья и ауксибласты имели те же характеристики распределений 0 - 1 и 1 - 2, что и до поражения древостоя насекомыми.

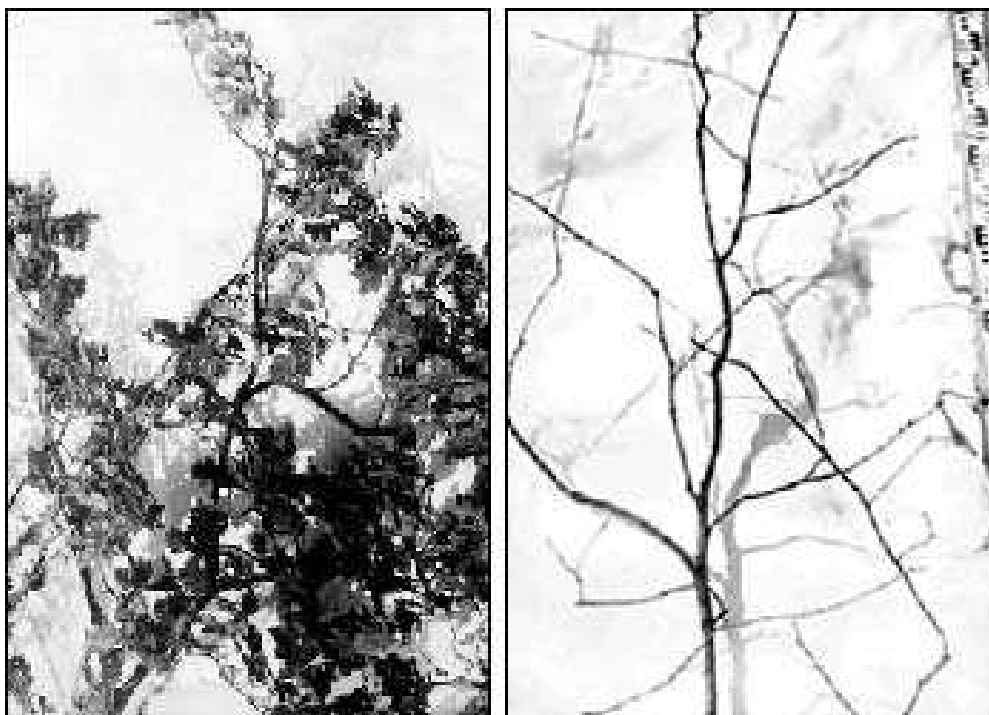


Рис. 2. Ветвь 5-го порядка дуба черешчатого: а) нативная; б) без листьев и ауксибластов

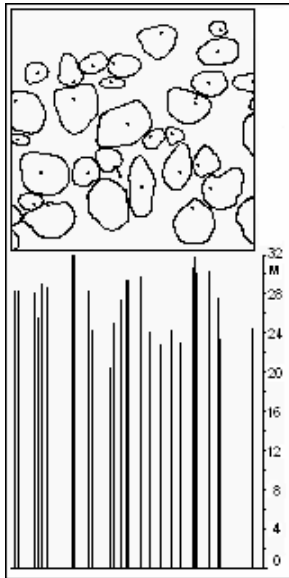


Рис. 3. Фрагмент карто-  
схемы сосняка средневоз-  
растного

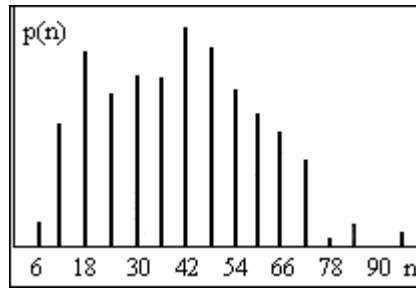


Рис. 4. Плотность вероятности  
распределения количества  
деревьев в дубраве молодой  
(пятно антенны 25м × 25м)

Следующим этапом исследо-  
вания является построение карто-  
схем изучаемого участка. На  
планшет (или непосредственно в  
память переносного компьютера)  
вносится местоположение центров  
стволов основного древостоя (ис-  
ключая подрост и подлесок), кон-  
туры проективного покрытия  
крон и высота деревьев (рис. 3).  
Фиксируется также мощность  
кроны и высота максимального  
диаметра кроны, по специальной методике измеряется расстояние ме-  
жду деревьями. В камеральных условиях методом скользящего окна  
получается плотность вероятности распределения количества де-  
ревьев в пятне антенны (рис. 4). Созданы компьютерные програм-  
мы получения итогового распределения количества фитоэлементов  
(листьев, хвои) в пятне антенны путем перемножения полученных  
распределений. Полевые работы организуются нами таким обра-  
зом, чтобы в камеральных условиях все данные можно было легко пересчитать на любой  
разумный размер пятна антенны.

Приведенная выше методика фактически является экспресс - методикой подсчета количества  
фитоэлементов в древостое - в отличие от общепринятых очень громоздких и трудоемких мето-  
дик изучения этого параметра, важного в лесоведении и дендрологии. Сравнение результатов  
подсчета количества листьев в одновозрастных древостоях без подроста и с подлеском, сложен-  
ным другими породами, с использованием данной методики с результатами, полученными мето-  
дом ловушек, дало практически полное совпадение (различия не превышали 2%). Методика ис-  
пользуется также для создания модели древостоя как области распространения радиоволн для  
решения многих практических задач РРВ.

Спецификой приведенной методики для хвойных деревьев является измерение длин элемен-  
тов 1-4 порядков и расчет количества хвои (элементов 0-го порядка) на единице длины этих эле-  
ментов. Элементы выше четвертого порядка не охвоены.

Для одновозрастных лесов установлено взаимнооднозначное соответствие статистических  
характеристик лесов, полученных с использованием предлагаемых методик, таксационных харак-  
теристик лесов и статистических характеристик их изображений, полученных с использованием  
радиолокации высокого разрешения аэрокосмического базирования.

Параллельно с работами с использованием приведенной выше методики выполняются работы  
по фотограмметрическому изучению площади листьев, их влагосодержания (фракционная сушка  
на торсионных весах), объема (методом замещения) и шероховатости (оптическими методами) с  
целью последующего построения электродинамических моделей рассеяния и излучения древо-  
стоя в различных диапазонах длин волн на различных поляризациях. Дополнительную информа-  
цию и данные для решения дистанционными методами ряда других задач лесопользования и изу-  
чения состояния лесов [2] дают изучение проективного покрытия поверхности кронами, сквози-  
стости кроны под разными углами визирования (фотограмметрический метод), углов наклона и  
ориентации листьев. Измерения показали, что в интервале  $\pm 5 \div 7$  градусов вблизи угла максималь-  
ного подъема солнца над горизонтом, определяемого широтой местности, для любого неизрежен-  
ного лиственного древостоя проективное покрытие в период полного облиствления близко к  
100%. Найден статистический параметр текстурных характеристик радиолокационных изображе-  
ний, достоверно отличающийся у лесов, произрастающих в благоприятных экологических усло-

виях, и на территориях с сильными антропогенными загрязнениями, коррелирующий с продуктивностью лесов [1].

### **3. Температурно-влажностные и диэлектрические характеристики древостоев и их элементов**

Принятое в синхронных подполетных наземных наблюдениях объектов ДЗЗ измерение температуры и относительной влажности воздуха на высоте 2 м, равно как и стационарное измерение этих показателей на поверхности почвы и на высотах 0,5 м и 2 м, не дает адекватного представления о реальной эффективной температуре и содержании влаги в воздухе по всему объему древостоя. Пестрота и градиенты этих показателей в древостое весьма значительны. Так, например, в солнечные дни различия температуры воздуха, точно измеренной в лесном массиве на высоте 2 м и температуры листвы, освещенной солнцем, достигают 10-15 градусов; различия температуры поверхности на освещенных и затененных травянистой растительностью, подлеском и деревьями ее участках составляют 5-10 градусов. Различия в содержании влаги в воздухе, почве и элементах древостоя еще более значительны, да и абсолютная влажность воздуха отличается заметной пестротой и единоразовое совместное измерение относительной влажности и температуры воздуха в древостое на высоте 2 м весьма условно отражает эффективные значения его влагосодержания (ошибка зачастую достигает 100%). Таким образом, возникает настоятельная потребность в разработке методики определения эффективной температуры и влагосодержания в объеме древостоя и минимизации объема синхронных наблюдений для установления этих параметров с заданной дисперсией, т.е. математическое планирование обеспечивающего ДЗЗ подполетного эксперимента.

#### *3.1. Эффективные температурно-влажностные характеристики объема древостоев*

Методики непосредственного изучения эффективных температурно-влажностных характеристик объемов древостоев весьма трудоемки и требуют большого ряда наблюдений для охвата всех возможных погодных условий. Однако эти первоначальные трудозатраты оправдывают себя в силу последующей строгой обоснованности минимизации на их основе текущих обеспечивающих ДЗЗ наблюдений и достижении тем самым достоверности результатов последних при минимальных текущих трудозатратах. По причине большой трудоемкости работы проводятся в условиях полигона - стационара, с привлечением большого количества наблюдателей (группа наземных наблюдений зачастую с привлечением обученных студентов - практикантов естественнонаучных факультетов). В случае наших исследований, полнота которых ограничена породным и возрастным составом имеющихся на наших стационарах древостоев (исследовался только дуб черешчатый и сосна обыкновенная), получение исчерпывающего результата для исследуемых пород достигнуто только по прошествии 20 лет.

Методика исследований сводится к следующему. Карта-схема изучаемого древостоя разбивается на участки, равные по площади пятну антенны средства ДЗЗ, для которого проводятся исследования. Все участки нумеруются. С помощью генератора случайных чисел выбирается от 8 до 30 участков, на которых и проводятся синхронные либо квазисинхронные исследования. Количество участков определяется пестротой (площадной энтропией) исследуемого лесного массива путем выполнения требований математического планирования эксперимента. Допустимый промежуток между исследованиями, зависящий от погодных условий, определяется априорно по данным исследования результатов непрерывных измерений, зафиксированных на лентах самописцев, находящихся на метеоплощадке, расположенной в лесу (Скрипаевский стационар; ряд непрерывных наблюдений с 1961 г.). При этом вариабельность данных самописцев по любому из параметров (температура, относительная влажность на высотах 0,5 и 2 м) в течение менее чем 30 минут автоматически исключает допустимость несинхронных наблюдений в аналогичных погодных услови-

ях, т.е. требует наличия количества наблюдателей и комплектов исследовательской аппаратуры, равного количеству площадок наблюдения.

На каждом участке наблюдения создается концентрическая сеть датчиков, расположенных на расстоянии  $0,1 \div 1$  м друг от друга. Такие же сети расположены (или постепенно поднимаются) с соответствующим шагом по всей высоте древостоя. Контроллер опрашивает все датчики, данные опроса через интерфейс вносятся в компьютер. Программное обеспечение позволяет вычертить изолинии, а затем и контуры изообъемов исследуемых параметров, интегрируя их по объемам, суммируя и усредняя по объему. В результате устанавливаются эффективные значения параметров для данной площадки с их дисперсией. Эффективные значения относительной влажности пересчитываются в абсолютные.

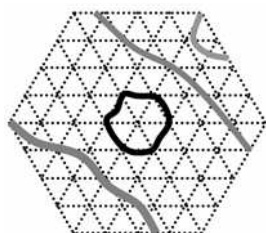


Рис. 5. Датчики расположены в узлах сети; построены изотермы через  $0,5^\circ$

Расположение точек наблюдения в площадном варианте эксперимента показано на рис. 5.

Установлена также программа расчета на основе этих данных комплексной диэлектрической проницаемости воздуха в объеме древостоя в спектре частот.

Все данные вносятся в постоянно пополняемую базу данных. На основе этих данных создается математическая модель зависимости взаимосвязи между температурно-влажностными характеристиками воздуха на высоте 2 м и эффективными температурно-влажностными характеристиками объема древостоя в целом от параметров распределения элементов его инфраструктуры. По завершении работ по созданию этой модели при известных параметрах инфраструктуры древостоев в любом из них представится возможность оценить с высокой точностью эффективные значения температуры и влагосодержания воздуха в древостое по данным измерения этих характеристик на высоте 2 м. К настоящему времени установлено, что в различных древостоях для получения значений эффективной температуры воздуха в них с дисперсией  $\pm 0,2$  К и объемной влажности с дисперсией  $\pm 0,0001$  при различных погодных условиях достаточно в рандомизованной выборке точек исследований провести синхронно от 2 до 10 измерений температуры и влажности воздуха на высоте 2 м. Для основных видов исследованных древостоев эти данные сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Количество необходимых измерений температурно-влажностного режима древостоя для обеспечения удовлетворительной достоверности результатов

Погодные условия	Ясно, безветренно	Ясно, ветрено	Переменная облачность	Пасмурно
Дубрава ср.	6	7	10	2
Дубрава пр.	7	8	10	2
Сосняк ср.	5	8	8	2
Сосняк пр.	5	8	9	3

(обозначения: ср. - средневозрастной; пр. - приспевающий древостой)

Один из приведенных результатов (4-я строка, последний столбец таблицы 1) позволил, в частности, провести эксперимент по изучению радиояростной температуры древостоев с привлечением синхронных наблюдений температуры и влажности воздуха силами всего лишь двоих сотрудников группы наземного обеспечения [2].

#### *Диэлектрические характеристики элементов подстилающей поверхности*

Получив приведенным выше методом эффективное абсолютное содержание влаги в воздухе и зная его температуру, легко получить значения эффективной диэлектрической проницаемости среды. Диэлектрическая проницаемость почвы измеряется нами *in situ* методом, приведенным в [3]. Диэлектрическая проницаемость листовых пластин измеряется ближнепольными зондами [4]

на различных частотах и/или рассчитывается с использованием модели [5]. Совпадение результатов измерений и расчетов в большинстве случаев дает основания полагать, что эксперименты по непосредственному измерению диэлектрических характеристик листовых пластин оправданы лишь в случаях специального научного исследования. В задачах же дистанционного зондирования достаточно описанных выше измерений объемно - влажностных характеристик листовых пластин и последующего расчета их комплексной диэлектрической проницаемости.

Помимо использования непосредственно для развития радиолокационных методик исследования лесов эти данные используются также для решения задач распространения в лесных массивах радиоволн мобильной связи и спутниковой навигации.

#### 4. Взаимосвязь температурно-влажностных характеристик древостоев, диэлектрических характеристик его элементов и параметров инфраструктуры с результатами ДЗЗ

Прямое сопоставление параметров итоговых распределений количества фитоэлементов по площади древостоя с параметрами распределений эффективной поверхности рассеяния на радиолокационных снимках высокого разрешения (РСА) обнаруживает точное их совпадение (рис. 6) в условиях отсутствия прямого освещения солнцем (ночь, сплошная облачность). В зависимости от

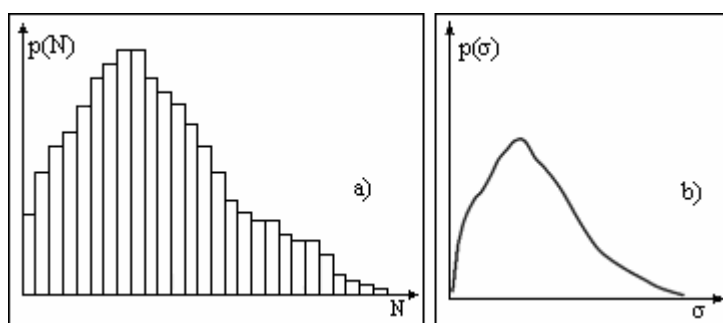


Рис. 6. Сопоставление плотность вероятностей распределений: а) количества  $N$  фитоэлементов в пятне антенны; б) ЭПР того же участка леса

пестроты эффективных температур и абсолютной влажности воздуха в древостоях, вызванной различиями в их инфраструктуре, информативным оказывается сопоставление текстурных признаков. В условиях длительного солнечного сияния дополнительную информацию можно почерпнуть из сопоставления радиусов автокорреляции ЭПР с расстоянием между деревьями, что обусловлено, как показали наши эксперименты [2], нагревом листовых пластин соответствующей экспозиции и, как следствие, изменением их диэлектрических характеристик. В то же время, получение параметров распределения фитомассы в пятне антенны для всех основных типов древостоев не является особенно трудоемкой задачей, а для промежуточных и смешанных типов эти параметры легко аппроксимируются. Распределение же расстояний между деревьями имеет четкую связь с таксационными характеристиками древостоя.

С использованием изложенных методик для всех основных лесообразующих пород и аппроксимации результатов на случай смешанных лесов в сопоставлении с соответствующими признаками результатов ДЗЗ (с последующей заверкой результатов сопоставления) возможно независимое безошибочное решение сформулированных выше задач с привлечением данных о погодных условиях в момент съемки (NOAA), но без необходимости синхронных наблюдений.

Зная инфраструктуру и диэлектрические параметры сцен в разные сезоны, можно точно определить оптимальный момент съемки лесных массивов для решения определенных задач (оконтуривание территорий будущего паводка, массивов особо ценных пород, древостоев, пораженных омой и т.п.), что минимизирует затраты на проведение таких работ.

Таким образом, сведения об инфраструктуре различных видов древостоев и влиянии на результаты ДЗЗ температурно-влажностных характеристиках различных сцен, будучи получены априорно, обеспечивают повышение эффективности дешифрирования результатов и расширяют круг практических задач, решаемых методами ДЗЗ.

В заключение авторы выражают глубокую признательность Борису Георгиевичу Кутуза, Анатолию Анатольевичу Калининскому и Леону Богуславовичу Неронскому за организацию и проведение серии радиолокационных исследований и коллективу Харьковского национального аграрного университета за организационную помощь в обеспечении наземного сопровождения ДЗЗ.

### Литература

1. *Атрошенко Л.М., Горобец Н.Н.* Перспективы изучения методами радиолокации таксационных характеристик и степени техногенной загрязненности лесов. Вісник Харьк. нац. ун-ту ім. В.Н. Каразіна. Радіофізика та електроніка.–1'2004, №622, –с.132-136.

2. *Атрошенко Л.М., Гайкович К.П., Горобец Н.Н.* Особенности формирования собственного радиоизлучения древостоев. // Вісник Харьк. нац. ун-ту ім. В.Н. Каразіна. Радіофізика та електроніка.–12'2008, №788, –с.35-41.

3. *Atroshenko L.M., Gaikovich K.P., Gorobets N.N.* Soil absorption profiling and complex dielectric permittivity based on microwave radiometry. //2006 International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MM'ET 2006). Kharkov. Ukraine. June 26-29, 2006, pp.366-367.

4. *Костров А.В., Смирнов А.И., Янин Д.В., Стриковский А.В., Пантелеева Г.А.* Резонансная ближнепольная СВЧ диагностика неоднородных сред. Известия РАН. Серия физическая. 2005. Т. 69. №12. С.1716-1720.

5. *Atroshenko L.M., Gorobets N.N., and Safronova L.P.* Complex Permittivity of Disperse Heterogeneous Systems and Their Components. Telecommunications and Radio Engineering 2006, Vol. 65, N 10, pp.873-884.