

## Об особенностях обратного отражения соснового леса в $L$ и $P$ диапазонах длин волн

А.А. Калинин<sup>\*</sup>, М.С. Крылова<sup>\*</sup>, Н.А. Арманд<sup>\*</sup>, А.Ю. Каковкина<sup>\*\*</sup>, В.И. Слюсарев<sup>\*\*</sup>,  
В.Ю. Манаков<sup>\*\*\*</sup>, В.А. Плющев<sup>\*\*\*</sup>

*\* Институт Радиотехники и Электроники им.В.А. Котельникова РАН, 103907, Москва, ул.Моховая, 11. \*\*Московская Сельско-Хозяйственная Академия им. К.А.Тимирязева, Москва, Тимирязевская ул.,49. \*\*\* ОАО Концерн радиостроения "Вега" 121170, Москва, Кутузовский проспект, 34  
Тел.: +7(495) 629-33-65, Факс: +7(495) 629-36-78, E-mail: kalinkevich@newmail.ru*

*Сделана попытка построения модели обратного отражения соснового леса в широком диапазоне длин волн. При моделировании иглы, ветви, и стволы рассматривались в виде диэлектрических цилиндров. Характерной особенностью моделирования явилось то, что в диапазонах длин волн  $L(\lambda = 23\text{см}, F = 1.3\text{ГГц})$  и  $P(\lambda = 68\text{см}, F = 0.44\text{ГГц})$  частотная зависимость отражательной способности оказалась немонотонной (в частотной зависимости удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) наблюдается максимум и минимум). Наличие максимума и минимума объясняется «противоборством» двух факторов: увеличением с ростом частоты сечения рассеяния от стволов и одновременным ростом как поглощения радиоволн кроной деревьев, так и сечения обратного рассеяния элементами хвои и ветвей. При помощи самолетного радиолокационного комплекса с синтезированной апертурой (РСА) проведены эксперименты по изучению отражения от лесных сосновых покровов в  $X$ ,  $L$ ,  $P$  и  $VHF$  диапазонах. Выполнен анализ многочастотных радиолокационных изображений (РЛИ) соснового покрова, полученных в период сентябрь-февраль, и выявлено аномальное поведение обратного рассеяния в диапазонах  $L$  и  $P$ . Проведены сезонные измерения влажности элементов дерева. Влажность элементов сосны в период сентябрь-июнь сильно меняется. Сезонная взаимосвязь отражательных свойств сосновых лесов и водного режима элементов деревьев положена в основу, чтобы попытаться объяснить особенностей РЛИ сосновых лесов в  $L$  и  $P$  диапазонах.*

*An attempt to construct a model of forest backscattering at wide range of wave-length was made. When modeling, the branches, needles and trunks were represented as dielectric cylinders. A modeling characteristic property is that in  $L(\lambda = 23\text{cm}, F = 1.3\text{GHz})$  и  $P(\lambda = 68\text{cm}, F = 0.44\text{GHz})$  wave-lengths frequency effective scattering cross-section dependence is not a monotonic function (frequency effective scattering cross-section dependence has maximum and minimum values). They are caused by a presence of two factors: increasing of scattering cross-section with the growth of frequency and simultaneous growth of attenuation by tree crown and increasing of backscattering cross-section of needles and branches. The airborne experiments on radar imaging of coniferous pine forests were carried out by means of SAR system, operating in  $X$ ,  $L$ ,  $P$  and  $VHF$  bands. The analysis of multi frequency radar images of pine forest obtained from September to July was performed and the abnormal character of backscattering in  $L$ ,  $P$  bands was observed. The seasonal measurements of weight moisture of trunks, needles and branches were conducted. Moisture content of trunks, branches and needles varies considerably. The seasonal interdependence of backscattering and water regime of trunks, needles and branches of pine forest is the basis to make an attempt to explain observed seasonal peculiarities of radar reflectivity of pine forest in  $L$  and  $P$  bands.*

### Моделирование радиолокационного отражения деревьев

Моделирование рассеяния радиоволн лесными покровами проводилось многими исследователями в интересах поиска связи между радиолокационными измерениями и параметрами леса (биомассой, высотой деревьев, плотностью деревьев и т.д.). Обзор работ по моделированию отражения от лесов можно найти в [1]. Архитектура лесного

покрова и подстилающей поверхности сложна, разнообразна, пространственно изменчива, диэлектрически неоднородна. Поэтому трудно рассчитывать на построение хороших моделей леса, позволяющих достаточно точно описывать картину распространения радиоволн в столь сложной по своей геометрии среде. Речь может идти о приближённых моделях, позволяющих установить основные параметры, характеризующие ослабление радиоволн внутри растительного покрова за счет поглощения и рассеяния, а также обратного отражения его элементами. В данной работе при моделировании иглы, ветви и стволы рассматриваются в виде диэлектрических цилиндров.

Для оценок обратного отражения необходимо рассматривать два сечения: дифференциальное сечение рассеяния  $\sigma_d$  и полное сечение  $\sigma_i$ . Первое необходимо для определения интенсивности обратного рассеяния радиоволн элементами лесного покрова, в то время как второе используется для расчёта ослабления радиоволн (рассеяние радиоволн вперед).

Для случая тонкого цилиндра сечение обратного рассеяния зависит сильно от поляризации падающей волны. В случае вертикальной поляризации сечение рассеяния описывается формулой [2, 3]:

$$\sigma_d = \frac{|\varepsilon - 1|^2 (ka)^4 l^2 \sin^2 \vartheta_i \sin^2 \theta}{16} \sin^2 c^2 \left[ \frac{kl}{2} (\cos \vartheta_i - \cos \theta) \right] \quad (1)$$

$k = 2\pi f / c$  - волновое число,  $l$  - длина цилиндра,  $\vartheta_i$  - угол между направлением падения плоской волны и осью цилиндра,  $\theta$  - угол между осью цилиндра и направлением рассеяния волны,  $\text{sinc } x = \sin x / x$ . При больших значениях произведения  $kl$  обратное рассеяние сосредоточено вблизи «зеркального» направления, определяемого равенством  $\cos \theta = \cos \vartheta_i$  (это важно при рассмотрении отражения от стволов, т.к. при расчетах необходимо учитывать переотражение от земли).

Если направление электрического вектора падающей волны ортогонально оси цилиндра, то сечение на этой поляризации в  $4/|\varepsilon + 1|^2$  раз меньше.

Сечение обратного рассеяния для толстого цилиндра в направлениях, лежащих в плоскости падения представляется формулой [4]

$$\sigma_d^{\rightarrow} = \frac{k a l^2}{4\pi} \sin \vartheta_i \sin^2 c^2 \left[ \frac{kl}{2} (\cos \vartheta_i - \cos \theta) \right] F^2 \left( \frac{\pi}{2} - \vartheta_i \right) \quad (2)$$

Здесь  $F = F_H(\beta) = \frac{\cos \beta - \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \beta}}{\cos \beta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \beta}}$  - коэффициент Френеля для волн

горизонтальной поляризации и  $F = F_V(\beta) = \frac{\varepsilon \cos \beta - \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \beta}}{\varepsilon \cos \beta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \beta}}$  - для случая

вертикальной поляризации. Полное сечение для тонкого цилиндра в случае продольной поляризации представляется формулой [4]:

$$\sigma_i = \varepsilon'' k l \pi a^2 \sin^2 \vartheta_i, \quad (3)$$

где  $\varepsilon''$  - мнимая часть диэлектрической проницаемости цилиндра,  $v = \pi a^2 l$  - его объём. В случае толстого цилиндра соответствующее сечение не зависит от поляризации и равно

$$\sigma_i = 4 a l \sin^2 \vartheta_i. \quad (4)$$

Эффективно действующей оказывается проекция электрического поля, направленная вдоль оси цилиндра. Это означает, что в формуле (3) и (4) следует сделать замену:

$$\sin \vartheta_i \Rightarrow \cos \chi = \cos \beta_i \cos \vartheta_g + \sin \beta_i \sin \vartheta_g \cos(\varphi_g - \varphi_i). \quad (5)$$

Здесь  $\chi$  – угол между направлениями вектора электрического поля и оси цилиндров (ветвей),  $\beta_i$  – угол между направлением электрического поля падающей волны и вертикалью к поверхности земли (осью  $z$ ),  $\varphi_i$  – азимут вектора электрического поля падающей волны,  $\vartheta_g$  – угол между направлением осей ветвей и вертикалью и  $\varphi_g$  – азимут осей.

При оценках полного сечения рассеяния иголками и тонкими ветками полагается, что их ориентация произвольная, т.е.  $\sin^2 \vartheta_i$  должен быть заменён его средним значением, равным  $1/2$ . Таким образом, для коэффициента ослабления радиоволн хвойным покровом вполне справедливо соотношение  $\gamma_n = \frac{1}{2} \varepsilon'' k v N$ , где  $N$  – концентрация иголок в единице объёма.

Для сферической системы координат с осью  $z$ , направленной вдоль ствола дерева, направление ветвей по азимуту  $\varphi$  можно считать равномерным в пределах  $0, 2\pi$ , а вероятностное распределение угла  $\theta$  между осью  $z$  и ветвью дерева можно задать некоторой функцией. Для оценок для хвойных деревьев предлагается взять функцию вида [5]:

$$P_1(\vartheta_g) = \frac{32}{3\pi} \sin^4 4\vartheta_g, \quad 0 \leq \vartheta_g \leq \frac{\pi}{4} \quad (6)$$

Максимальная вероятность соответствует значению угла  $\sim 70^\circ$ .

Данные предположения явились основой для вычисления оценок отражательных свойств лесного покрова.

Предварительные расчеты показывают, что УЭПР (с учетом хвои, веток и стволов) для хвойного дерева имеет вид (рис.1).

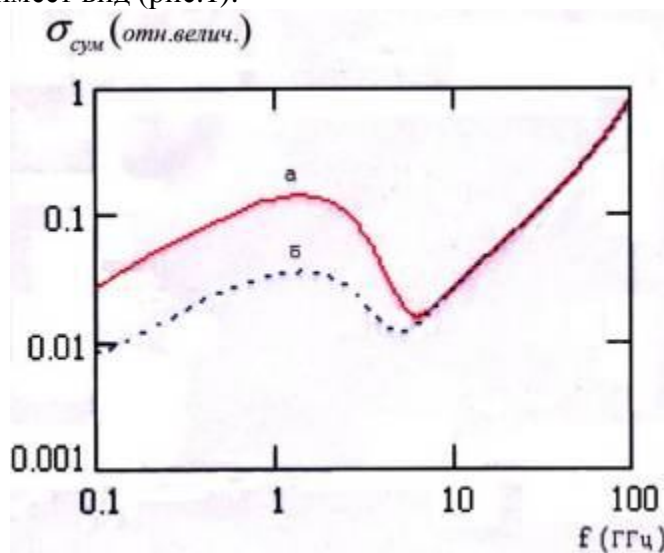


Рис. 1. Суммарный УЭПР хвойного леса (а - соответствует НН поляризации, б - VV поляризации, угол зондирования  $45^\circ$ )

При отражении от земли полагали, что почва - песчаная с влажностью 20%. При оценках использовались данные работы [6], где приведены параметры отдельных элементов сосновых лесов в зависимости от их возраста.

Значения максимумов и минимумов и их расположение на частотной оси в значительной степени определяются параметрами лесного покрова, а также диэлектрическими свойствами хвои и ветвей.

Таким образом, неожиданным результатом такого моделирования явилось то, что частотная зависимость отражательной способности оказалась немонотонной (в УЭПР наблюдается максимум и минимум). В результате при исследованиях обратного отражения одного участка соснового покрова в широком диапазоне частот могут наблюдаться трудно объяснимые эффекты.

### **Сезонные особенности обратного отражения в диапазонах длин волн $L$ , $P$ , $VHF$**

Радиолокационная съемка хвойных сосновых лесов с самолета проводилась с помощью комплекса радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) “ИМАРК” [7], работающего в диапазонах длин волн:  $X$  ( $\lambda = 4\text{см}$ ,  $F = 7.8\text{ГГц}$ ),  $L$ ,  $P$  и  $VHF$  ( $\lambda = 254\text{см}$ ,  $F = 0.117\text{ГГц}$ ) на тестовом полигоне в Рязанской области. Особенностью эксперимента явилось то, что радиолокационная съемка могла осуществляться в разных диапазонах одновременно. Для исключения возможных искажений, возникающих при выполнении радиолокационной съемки и первичной обработке радиолокационных изображений (РЛИ), на результаты интерпретации, было предложено сопоставлять отражательную способность двух сосновых участков леса непосредственно расположенных рядом и имеющих различное значение биомассы.

При анализе РЛИ сосновых лесов в разные сезоны было замечено, что в диапазонах  $L$ ,  $P$ ,  $VHF$  наблюдается аномальное поведение обратного рассеяния. В частности, некоторые особенности хорошо прослеживаются в диапазонах  $L$  и  $P$  на горизонтальной-горизонтальной ( $HH$ ) поляризации (рис.2). Сезонное отличие в отражательных характеристиках выбранных двух участков леса (обозначены кружками) наблюдается в  $L$ ,  $P$  диапазонах и отсутствует в  $VHF$  диапазоне на всех этапах эксперимента.

Сопоставление РЛИ (рис.2(а)) в  $L$  диапазоне для двух участков соснового леса с различными таксометрическими параметрами в сентябре и ноябре показывает, что отражение от леса меняется с изменением биомассы соснового покрова. Однако в феврале разница в отражательных свойствах выбранных участков практически исчезает. Одновременно с этим в  $P$  диапазоне длин волн (рис.2(б)) наблюдается противоположная тенденция в отражательных свойствах: в феврале месяце разница резко увеличивается. В осенний период различие в отражении этих участков в  $P$  диапазоне проявляется слабо. На рис.2(в) представлен фрагмент РЛИ леса в  $VHF$  диапазоне. Разница в отражательных характеристиках выбранных двух участков леса отсутствует на всех этапах эксперимента. В соответствии с этим возникла задача объяснить наблюдаемый характер отражающих свойств сосновых участков. Сделано предположение, что особенности поведения радиолокационной отражаемости леса в  $L$  и  $P$  диапазонах можно объяснить сезонной изменчивостью водного режима отдельных элементов деревьев (стволов, веток, хвои).

### **Результаты наземных измерений водного режима деревьев**

Поглощение и рассеяние радиоволн непосредственно связано с диэлектрическими свойствами элементов дерева. Поэтому для объяснения этого предполагалось связать особенности сезонных отражательных свойств с сезонными изменениями электрофизических свойств элементов сосновых деревьев. Диэлектрическая проницаемость элементов растительного покрова – стволов, веток, хвои в первую очередь определяется концентрацией свободной воды. В работе [5] дается выражение

для комплексной диэлектрической проницаемости элементов дерева в зависимости от влажности, температуры, частоты электромагнитного излучения.

Анализ показал, что действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости являются достаточно большими величинами, даже при сравнительно малой объёмной влажности, и сильно зависят от нее. Для выяснения сезонной изменчивости водного режима сосновых лесов в районе проведения радиолокационного эксперимента с сентября 2008 г. по июль 2009 г. на семи опытных участках были выполнены измерения таксонометрических параметров деревьев, а также сезонные измерения весовой влажности стволов, хвои и веток. Особое внимание уделялось участкам, которые располагались в непосредственной близости друг от друга и для которых описаны выше особенности в отражательных свойствах. Повышенное внимание уделялось погодным условиям - при взятии проб подбирались такие режимы температур и влажности воздуха, которые были идентичны условиям проведения радиолокационной съемки.

Известно, что влажность древесины ствола меняется по высоте и глубине, зависит от места его произрастания и т.д. В результате значение ее может сильно флюктуировать от дерева к дереву. Поэтому было решено выполнить сезонные измерения влажности, используя для этого несколько одних и тех же типов деревьев в каждом районе и сопоставить полученные зависимости.

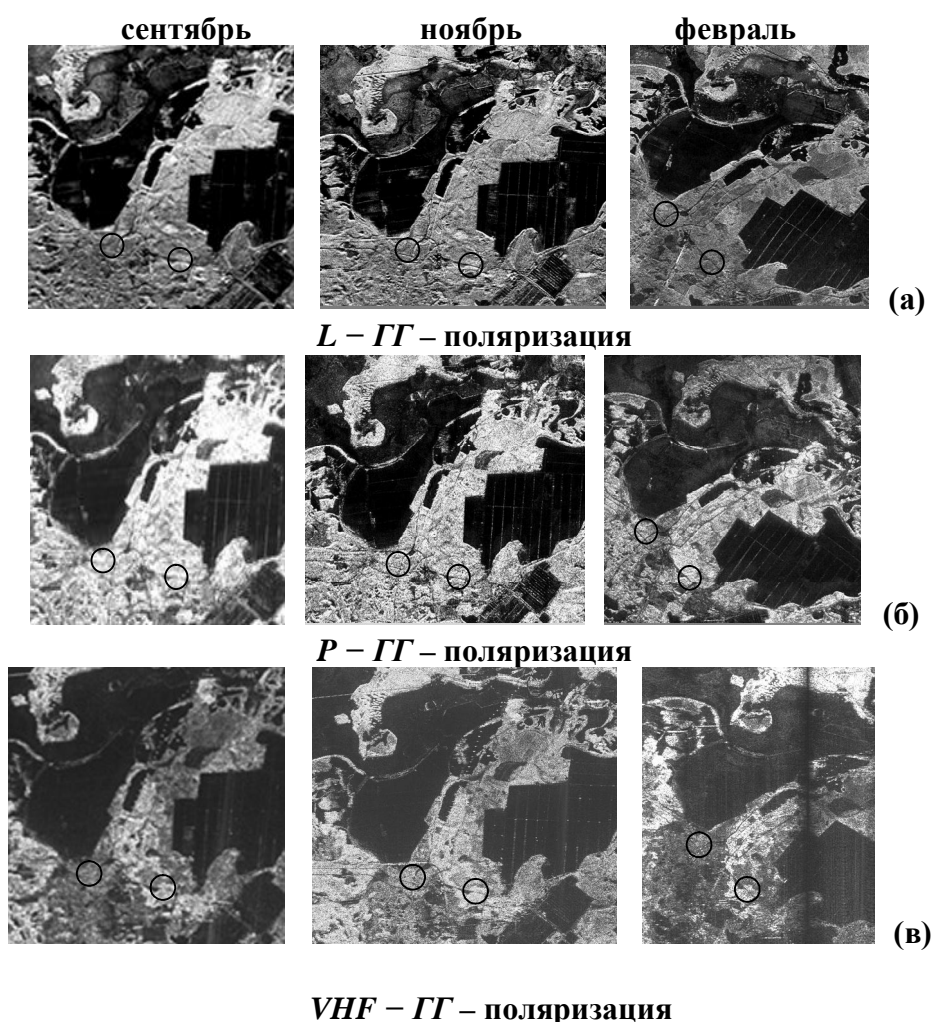
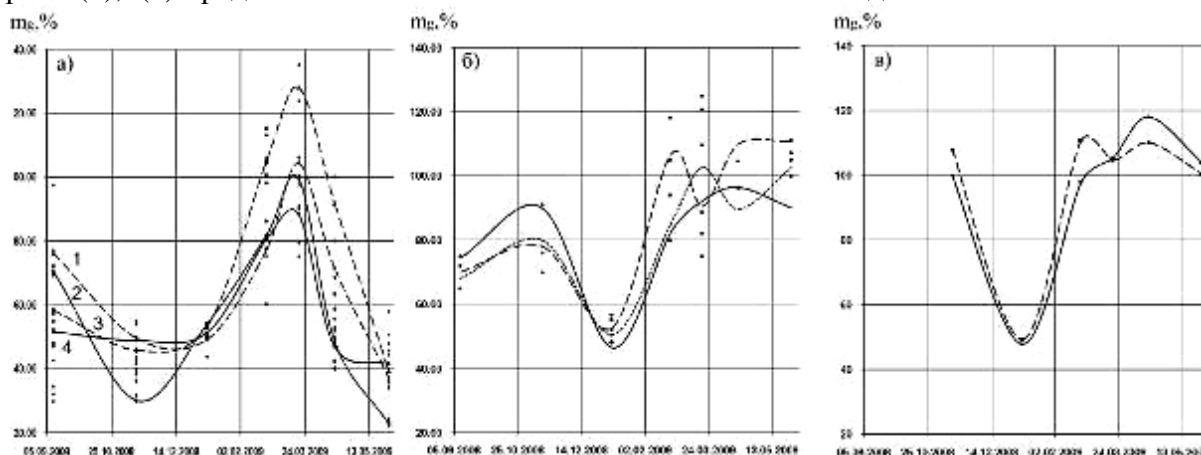


Рис. 2. Фрагмент радиолокационного изображения леса в  $L$ ,  $P$  и  $VHF$  диапазонах. Кружками отмечены опытные участки

Пробы древесины, взятые с высоты 130 см от поверхности земли и с глубин 0?6 см, использовались для измерения влажности ствола. Недостатком процедуры является необходимость многочисленного взятия проб из стволов одних и тех же деревьев. Выбирались деревья, у которых было доступно взять пробы хвои и веток (как правило, крона деревьев на выбранных участках располагалась на высотах 15 и более метров от поверхности земли). На рис.3 представлены зависимости динамики изменения влажности древесины (а), веток (б) (с диаметром не более 15 мм), хвои (в). На рис.3(а) кривые 1?4 соответствуют результатам измерений для отдельно взятых деревьев, которые располагаются в сосновых участках с различными отражающими способностями. Анализ показал, что характер изменения сезонной влажности для деревьев, расположенных на разных участках идентичен. На рис. 3(а) представлены точками результаты измерений для остальных деревьев. Аналогичным образом на рис.3(б),3(в) представлены зависимости изменения влажности для веток и хвои.



**Рис. 3. Зависимости изменения (а) влажности древесины, (б), тонких веток и (в) хвои по месяцам**

Представленные зависимости показывают, что сезонный характер изменения влажности древесины отличается от изменения тонких веток и хвои. Значительное уменьшение влажности веток в холодный период пришлось на начало увеличения влажности древесины.

Из полученной динамики сезонных изменений влажности элементов дерева могут быть сделаны следующие выводы:

- для каждого отдельного дерева и леса в целом прослеживается четкая зависимость изменения влажности древесины по месяцам;
- зависимости изменения влажности хвои и веток по месяцам идентичны;
- в холодный период времени характер изменения влажности древесины и веток существенно отличен.

*Примечание. Исследования показывают, что влажность хвои динамично меняется с изменением погоды. На ее значение сильное влияние оказывают перепады ночной и дневной температур, влажность воздуха, стабильность погоды в течение нескольких суток. Влияние взаимосвязи температуры и влажности воздуха, скорость изменения этих параметров во времени на влажность хвои на данный момент не выяснено. Предварительные исследования показывают, что зависимость влажности элементов древесины от температуры воздуха неоднозначна.*

### **Обсуждение результатов**

Влияние разных элементов дерева на обратное отражение различно. Для коротких волн, в частности для *L* диапазона, хвоя и тонкие ветки являются наиболее

эффективным элементом отражения. Стволы деревьев и толстые ветки представляют собой наиболее крупные элементы лесного покрова. Поэтому вправе ожидать, что они являются теми элементами деревьев, которые наиболее интенсивно рассеивают радиоволны в  $P$  и  $VHF$  диапазонах длин волн. Однако при этом необходимо учитывать роль хвои и тонких веток в поглощении радиоволн. Для  $VHF$  диапазона поглощение в хвое и тонких ветках незначительно, и им пренебрегают – обратное отражение определяется стволами и толстыми ветками. В период сентябрь-начало февраля изменения влажности стволов и толстых веток относительно небольшие (рис.3(а)) в результате и сезонные особенности в  $VHF$  этом диапазоне не наблюдаются (рис.1(в)). Ситуация для  $P$  диапазона несколько другая – несмотря на то, что основное обратное отражение в этом диапазоне формируется толстыми ветками и стволами, приходится учитывать поглощение в хвое и тонких ветках. Таким образом, суммарная величина обратного отражения в  $P$  диапазоне будет определяться «противоборством» двух факторов: обратным отражением от толстых веток и поглощением радиоволн кроной деревьев. Не вдаваясь в детали и полагая, что иглы и ветки можно рассматривать в виде тонких диэлектрических цилиндров (детальное моделирование планируется в наших дальнейших исследованиях), наблюдаемые сезонные особенности объясняются следующим образом.

В  $L$  диапазоне длин волн обратное отражение формируется за счет отражения от хвои и тонких веток. Для выражения величины обратного отражения радиоволн необходимо величину эффективной площади рассеяния (ЭПР) от хвоинки и ветки умножить на число элементов отражения ( $V$  – объем элементов рассеивания на пути прохождения радиоволны) и выполнить усреднение по возможным углам расположения элементов отражения к направлению распространения радиоволны и по размерам элементов отражения. В итоге обратное отражение  $\sigma_1$  можно выразить формулой:

$\sigma_1 = \left( \varepsilon - 1 \right)^2 V \overline{F}(a, \lambda, \theta, l)$ , где  $\overline{F}(a, \lambda, \theta, l)$  – усредненная функция по углам расположения игл и тонких веток ( $\theta$ ) и по длинам и радиусам элементов рассеивания ( $l, a$ ). Разница в отражательных свойствах двух участков леса будет:

$$\sigma_2 - \sigma_1 = \left( \varepsilon - 1 \right)^2 \left\{ V_2 \overline{F}_2 - V_1 \overline{F}_1 \right\} \quad (7)$$

Величины  $V_i \overline{F}_i$  с ноября по февраль на каждом участке изменились незначительно, и величина  $\sigma_2 - \sigma_1$  будет определяться изменением  $\left( \varepsilon - 1 \right)^2$ . Используя результаты измерений влажности иголок и веток в ноябре и феврале месяце (рис.3(в)), можно показать, что разница в отражательных свойствах двух выбранных сосновых участков уменьшилась более чем на 10дБ, что и наблюдаемая в эксперименте разница в феврале (рис.1(а)) практически отсутствует.

Для  $P$  диапазона длин волн обратное отражение формируется стволами и толстыми ветками ( $\sigma_{cm.p}$ ). Однако ЭМИ предварительно ослабляется за счет поглощения в хвое и в тонких ветках ( $\alpha$ ), которое определяется мнимой частью диэлектрической проницаемости:  $\left( \alpha = \frac{\varepsilon''}{\lambda} \right) \pi V$ , где  $V$  – объем хвои и тонких веток. Разница отражательной способности между двумя участками будет:

$$\sigma_{2p} - \sigma_{1p} = \sigma_{2cm.p} \exp\left( -\frac{\varepsilon''}{\lambda} \pi V_2 \right) - \sigma_{1cm.p} \exp\left( -\frac{\varepsilon''}{\lambda} \pi V_1 \right) \quad (8)$$

Для леса с большей биомассой объем хвои и веток ( $V_2$ ) больше, чем для другого участка леса ( $V_1$ ). За счет уменьшения влажности к февралю месяца мнимая часть диэлектрической проницаемости хвои и тонких веток  $\varepsilon''$  уменьшилась. Поскольку ( $V_2 > V_1$ ) значение величины  $(\sigma_{2p} - \sigma_{1p})$  увеличилось. Это и наблюдаем в эксперименте рис.2(б).

Таким образом, наблюдаемые особенности в отражательных свойствах сосновых лесов для разных сезонов объясняются уменьшением влажности в хвое и тонких ветках с понижением температуры.

### **Выводы**

Наземный эксперимент по измерению влажности в сосновых лесах в период времени сентябрь – июль показал, что наблюдаемые изменения влажности древесины (стволов), веток и хвои деревьев особенно заметны в холодный сезон при резких изменениях температуры воздуха. В это время характер изменения влажности хвои и тонких веток существенно отличается от влажности древесины, которая меняется незначительно. Одновременно с этим влажность веток и хвои заметно уменьшается. Сезонные особенности в диапазонах  $L$  и  $P$  в отражательной способности двух сосновых участков леса, имеющих разные таксонометрические величины, согласуются с изменением водного режима хвои и тонких веток. Это возможно и объясняет наблюдаемые особенности в отражательных свойствах сосновых лесов уменьшением влажности в хвое и тонких ветках с температурными изменениями по сезонам.

### **Литература**

1. Bellez S., Dahon C., Roussel H., “Analysis of the Main Scattering Mechanisms in Forested Areas: An Integral Representation Approach for Monostatic Radar Configurations”, IEEE Trans. 2009. V.GRS-47, No.12. PP 4153-4165.
2. Sarabandi K., Senior T.// “Low-Frequency Scattering From Cylindrical Structures at Oblique Incidence”, IEEE Transactions on GRS, vol. 28, No. 5, September 1990, pp. 879-885
3. Stiles J., Saraband Ki.// “A Scattering Model for Thin Dielectric Cylinders of Arbitrary Cross Section and Electrical Length”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 44, No. 2, February 1996, pp. 260-266.
4. Armand N.A., Polyakov V.M. Radio Propagation and Remote Sensing of the Environment. BocaRaton: CRC PRESS, 2005.
5. Ulaby F.T., Sarabandi K., McDonald K., et al, Michigan microwave canopy scattering model, Int. J. Remote Sensing, 1990, v. 11, No 7, pp 1223 – 1253.
6. Hsu C.C., Han H.C., Shin R.T. et al.. Radiative transfer theory for polarimetric remote sensing of pine forest at  $P$  band, Int. J. Remote Sensing, 1994, v. 15, No 14, pp 2943 – 2954.
7. „IMARC“ – Multi-Frequency Airborne Polarimetric Radar System Operating on Board of TU-134A Flying Laboratory for Remote Observations of the Earth’s Surface. M.: VEGA-M Corp., 1998. P.8.