

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА
И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 621.371

ИССЛЕДОВАНИЯ ХВОЙНЫХ ЛЕСОВ С ПОМОЩЬЮ
МНОГОЧАСТОТНОЙ ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ
СТАНЦИИ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ

© 2019 г. А. А. Калинкевич¹, *, Б. Г. Кутуза¹, В. Ю. Манаков², В. А. Плющев²

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
ул. Моховая, 11, стр. 7, Москва, 125009 Российская Федерация

²АО Концерн радиостроения “Вега”,
Кутузовский просп., 34, Москва, 121170 Российская Федерация

*E-mail: kalinkevich@cplire.ru

Поступила в редакцию 23.04.2019 г.

После доработки 29.06.2019 г.

Принята к публикации 21.07.2019 г.

Рассмотрены особенности радиолокационного отражения хвойного леса в дециметровом и метровом диапазонах длин волн. Это связано с тем, что в ближайшие 5–7 лет Россией и европейскими странами планируются космические эксперименты с радиолокационными комплексами с синтезированной апертурой (РСА) Р-диапазона (частота 430 МГц), где зондирование лесных покровов имеют принципиальное значение. Приведены результаты экспериментов по изучению характеристик отражения от лесных сосновых покровов с помощью многочастотного поляриметрического РСА. Выполнено моделирование отражения от леса в метровом диапазоне длин волн на горизонтально-горизонтальной (НН) и вертикально-вертикальной (VV) поляризациях. Показано, что механизмы отражения метровых волн от леса могут различаться на НН- и VV-поляризациях. Получены новые данные об особенностях самолетных и спутниковых радиолокационных изображений (РЛИ) лесного покрова в L-, P- и VHF-диапазонах длин волн. Выявлены характерные эффекты на РЛИ хвойного леса, которые трудно объяснимы для понимания и требуют дальнейших исследований с проведением тщательного анализа РЛИ и данных синхронных наземных измерений параметров почвы и лесного покрова. Приведены примеры, когда выводы по интерпретации РЛИ вызывают сомнения в их справедливости.

DOI: 10.1134/S0033849419120040

ВВЕДЕНИЕ

Самолетные эксперименты, проведенные в России, Германии, Швеции и других странах, показали эффективность использования радиолокаторов дециметрового и метрового диапазона для исследования лесных покровов [1–4]. Лесной массив для этих длин волн является полупрозрачной средой, что открывает возможность получения количественных данных о такой важной величине как биомасса растительного покрова. В настоящее время в стадии разработки находятся два космических эксперимента по применению радиолокационного комплекса с синтезированной аппаратурой (РСА) Р-диапазона (частота 430 МГц) для зондирования земной поверхности, реализация которых намечена на 2022–2025 гг. Первый проект (“МКС РСА(Р)”) создается в России и предназначен для Международной космической станции (МКС) [3]. Второй проект (“BIOMASS”) разрабатывается Европейским космическим агентством для спутника-автомата [1, 2]. В обоих проектах за-

дача зондирования лесных покровов в глобальном масштабе имеет принципиальное значение.

В то же время многие вопросы, связанные с обработкой и интерпретацией радиолокационных данных, остаются невыясненными и требуют дальнейших исследований. Представленные в данной статье материалы касаются вопросов сложности и неоднозначности интерпретации радиолокационных изображений (РЛИ) хвойного леса, получаемых с помощью самолетных и космических РСА. В качестве примеров рассмотрены особенности РЛИ, которые были получены при проведении летных экспериментов при помощи многочастотного поляриметрического РСА “ИМАРК” [5] по изучению отражений от растительных покровов (в основном от соснового леса). Кроме того, использованы космические данные, полученные с помощью радиолокатора PALSAR-1 [6, 7], установленного на борту японского спутника ALOS; а также некоторые результаты исследований, опубликованные в отечественной и зарубежной литературе.

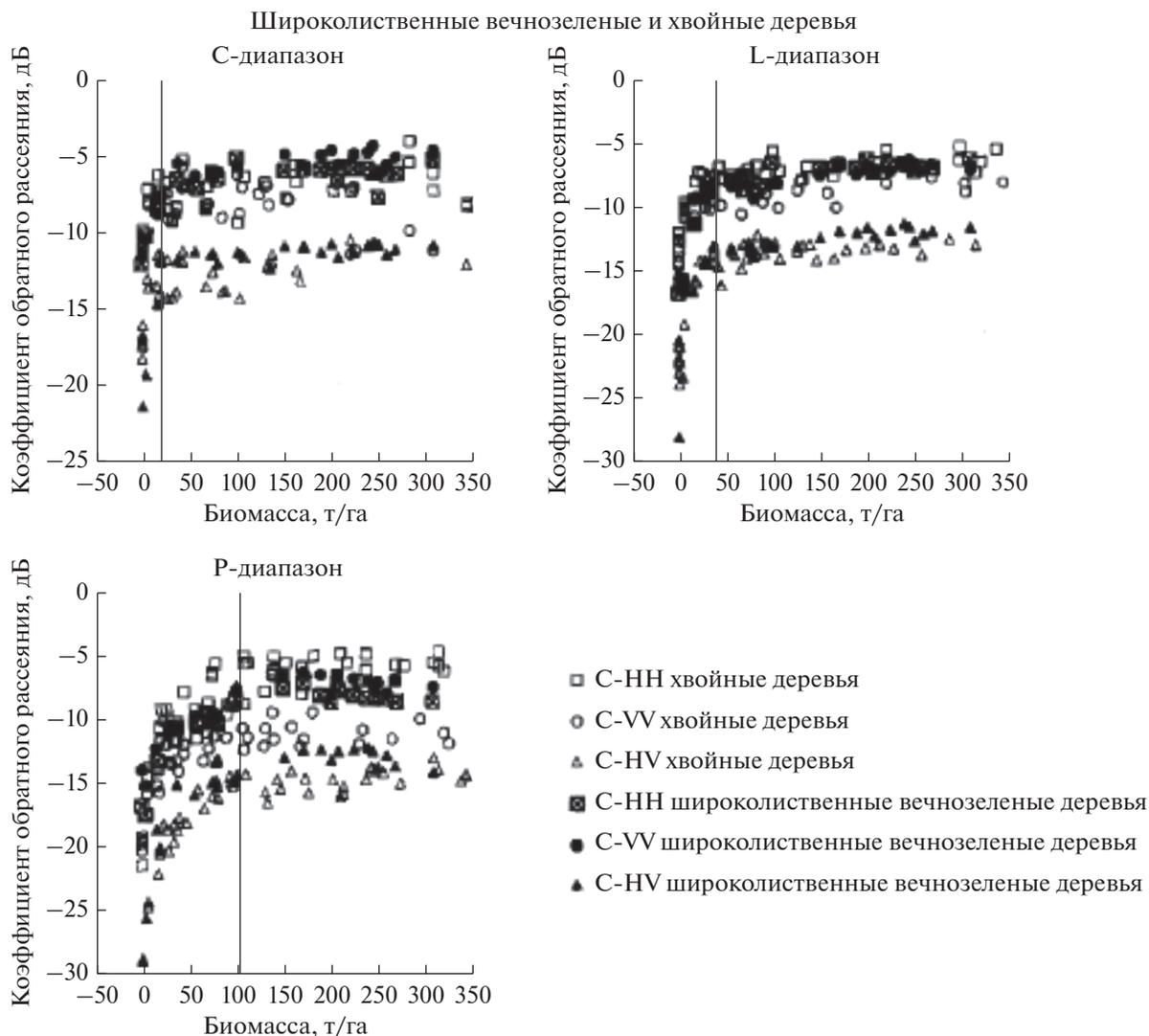


Рис. 1. Зависимость обратного РСА отражения от биомассы лесного покрова [8].

1. ИЗМЕРЕНИЕ БИОМАССЫ ЛЕСА ПО РАДИОЛОКАЦИОННЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ

Первоочередной задачей исследования состояния леса радиолокационными методами является определение его биомассы. За основу использования радиолокационных измерений, в частности РЛИ, положена связь между результатами СВЧ-измерений и биомассой лесного покрова [8]. С увеличением биомассы лесного покрова увеличивается обратное отражение. Исследования показали, что наблюдается эффект “насыщения”, т.е. начиная с некоторого значения биомассы ее дальнейшее увеличение не приводит к изменению обратного отражения [8]. Эффект “насыщения” зависит от диапазона длин волн электромагнитного излучения (ЭМИ). В качестве примера на рис. 1, взятом из работы [8], показаны результаты экспериментальных данных. Как видно из

рисунка, по мере увеличения длины волны в РСА информативность РЛИ лесных покровов повышается. В этой связи использование диапазонов с большей длиной волны излучения (Р и VHF) является очень перспективным.

2. К ВОПРОСУ СЕЗОННЫХ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ ХВОЙНЫХ ЛЕСОВ В L-ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

Авторы работ [6, 7] в течение нескольких лет проводили исследования сезонных отражательных свойств лесных покровов в Московской области, с помощью радиолокатора PALSAR-1. Было замечено, что в холодный период времени (например, зимой) удельная эффективная площадь рассеяния (УЭПР) тестовых участков хвойного леса (см.

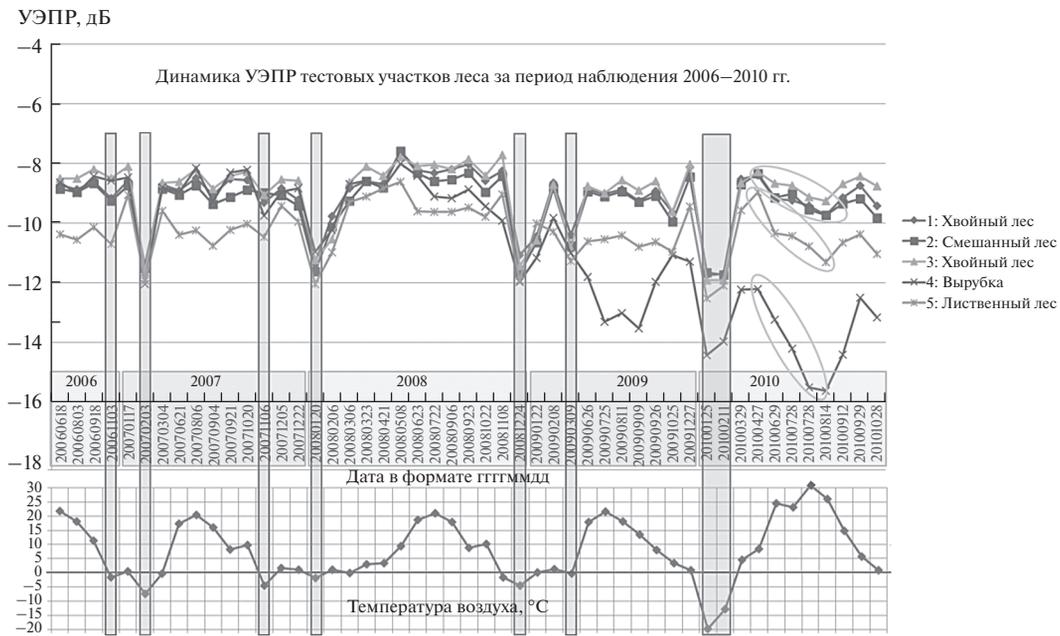


Рис. 2. Динамика УЭПР тестовых участков за период наблюдения 2006–2010 гг. и температура воздуха в дни съемки по данным работ [6, 7].

рис. 2) уменьшается, что подтверждается также и другими данными [10].

В работах [6, 7] полученные данные объясняются тем, что в зимний период времени хвойные леса имеют наименьшую влажность, так как нет сокодвижения. Однако в работе [11] указано, что наибольшая весовая влажность древесины наблюдается в зимний период времени. В работе [12] исследовали водный режим разнообразных древесных пород. Было установлено, что содержание воды широко варьирует в разных частях дерева и зависит от видовой принадлежности и времени года. Так, например, у хвойных деревьев в Восточной Канаде обнаружены довольно слабые сезонные изменения содержания воды в стволах, а у хвойных деревьев в Европе наблюдаются значительные сезонные колебания содержания воды [12, 13]. Однако анализ возможных причин, объясняющих эти факты, на сегодняшний день отсутствует. Таким образом, строгой зависимости водного режима от сезона года не установлено; также отсутствуют и данные, связывающие погодные условия с водным режимом деревьев. Это было подтверждено наземными измерениями [14]. В ходе полевого опыта были взяты пробы древесины стволов, тонких веток и хвои в разные сезоны. Некоторые данные из работы [14] приведены на рис. 3, которые показывают относительно резкие изменения влажности в зимний период времени в стволах, ветках и в хвое.

Подобная картина сезонных изменений влажности в стволах древесины разных пород приведена

в монографии [15], в которой показано, что в холодный период года влажность в хвойных деревьях увеличивается. Таким образом, выводы авторов [6, 7] не согласуются с данными работ [14, 15].

Для объяснения того, что в зимний холодный период времени УЭПР тестовых участков хвойного леса уменьшается, авторы данной статьи использовали результаты работы [14]. В этой работе были рассмотрены теоретические вопросы моделирования отражения от лесных массивов в широком частотном диапазоне, выявлены особенности отражения в L- и P-диапазонах и приведены экспериментальные результаты наземных исследований.

3. ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ОБРАТНОГО ОТРАЖЕНИЯ СОСНОВОГО ЛЕСА В L- И P-ДИАПАЗОНАХ ДЛИН ВОЛН

Моделирование рассеяния радиоволн лесными покровами проводилось многими исследователями с целью нахождения связи между радиолокационными измерениями и параметрами леса (биомассой, высотой деревьев, плотностью деревьев). Обзор работ по моделированию отражения от лесов представлен в [16]. Геофизические характеристики лесного массива, влияющие на его диэлектрическую проницаемость, имеют пространственно-временную изменчивость. Поэтому речь может идти о приближенных моделях, позволяющих установить основные параметры, характеризующие ослабление радиоволн внутри

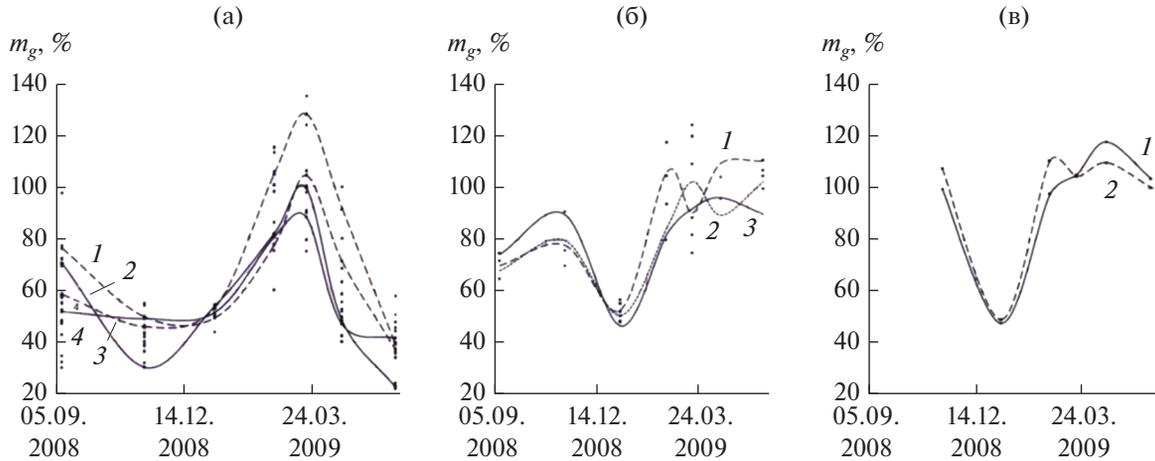


Рис. 3. Влажность стволов (а), мелких веток (б) и хвои (в) в зимний период из работы [14]. Кривые 1–4 соответствуют результатам измерений для отдельно взятых деревьев, которые располагаются в сосновых участках с различными отражающими способностями, точки – результаты измерений для остальных деревьев.

растительного покрова за счет поглощения и рассеяния, а также обратного отражения.

Для изучения особенностей отражательных характеристик леса авторы данной работы использовали радиолокационную съемку хвойных сосновых лесов, получаемую с помощью самолётного комплекса с РСА “ИМАРК” [5]. Данный комплекс функционировал в диапазоне длин волн: L ($\lambda = 23$ см, $f = 1.3$ ГГц), Р ($\lambda = 68$ см, $f = 0.44$ ГГц), VHF ($\lambda = 254$ см, $f = 0.117$ ГГц). Исследования проводили на тестовом полигоне в Рязанской области. Особенностью эксперимента являлось то, что радиолокационная съемка могла осуществляться в различных диапазонах одновременно.

Результаты наземных исследований лесных хвойных покровов с помощью данного комплекса потребовали проведения моделирования отражательных характеристик в широком диапазоне длин волн. В работе [14] при моделировании отражательных способностей частей хвойных деревьев их иглы, ветви и стволы рассматривали в виде диэлектрических цилиндров.

Для оценок обратного отражения были использованы два вида сечения: дифференциальное сечение рассеяния σ_d и полное сечение σ_t . Первое необходимо для определения интенсивности обратного рассеяния радиоволн элементами лесных покровов, в то время как второе используется для расчета ослабления радиоволн (рассеяние радиоволн вперед). Сложность моделирования состояла в том, что для различных диапазонов одни и те же элементы лесного покрова необходимо было рассматривать как тонкие или как толстые диэлектрические цилиндры.

Для случая тонкого цилиндра сечение обратного рассеяния сильно зависит от поляризации падающей волны. В случае вертикальной поляри-

зации сечение рассеяния описывается формулой [17, 18]

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

где $k = 2\pi f/c$ – волновое число, ϵ – диэлектрическая проницаемость цилиндра, l – его длина, ϑ_i – угол между направлением падения плоской волны и осью цилиндра, θ – угол между осью цилиндра и направлением рассеяния волны, $\sin cx = \sin x/x$. При больших значениях kl обратное рассеяние сосредоточено вблизи “зеркального” направления, определяемого равенством $\cos \theta = \cos \vartheta_i$. Это важно при рассмотрении отражения от стволов, т.к. при таких расчетах необходимо учитывать переотражение от земли. Если направление электрического вектора падающей волны ортогонально оси цилиндра, то сечение для такой поляризации оказывается в $4/|\epsilon + 1|^2$ раз меньше. Сечение обратного рассеяния для толстого цилиндра в направлениях, лежащих в плоскости падения, представляется формулой [19]

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

Здесь

$$F = F_H (\beta) = \frac{\cos \beta - \sqrt{\epsilon - \sin^2 \beta}}{\cos \beta + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \beta}}$$

– коэффициент Френеля для волн горизонтальной (Н) 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 (V) поляризации.

Полное сечение для тонкого цилиндра в случае продольной (электрический вектор падающей волны, направление вдоль оси цилиндра) поляризации представляется формулой [20]

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

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

$$\sigma_t = 4al \sin^2 \vartheta_i. \quad (4)$$

При оценках полного сечения рассеяния иглами и тонкими ветками полагали, что их ориентация произвольная.

Для сферической системы координат с осью z , направленной вдоль ствола дерева, направление ветвей по азимуту φ можно считать равномерно распределенным в пределах $[0, 2\pi]$, а распределение по углу θ – характеризуемым некоторой функцией вероятности. Для оценок для хвойных деревьев эту функцию выбрали в виде [21]

$$P_1(\vartheta_g) = \frac{32}{3\pi} \sin^4(4\vartheta_g), \quad 0 \leq \vartheta_g \leq \frac{\pi}{4}, \quad (5)$$

т.е. максимальная вероятность составляла $\sim 70^\circ$. Данные предположения являлись основой вычисления оценок отражательных свойств [14].

Расчеты показали, что УЭПР (с учетом хвои, веток и стволов) для хвойного дерева имеет вид, показанный на рис. 4.

При расчетах отражения от земной поверхности предполагали, что почва песчаная с влажностью 20%. Значения максимумов и минимумов и их расположение в зависимости от частоты в значительной степени определяются геометрическими и физическими параметрами лесного покрова, а также диэлектрическими свойствами хвои и ветвей.

Неожиданным результатом такого моделирования явилось то, что частотная зависимость отражательной способности оказалась немонотонной (в зависимости суммарной УЭПР наблюдаются максимум и минимум). В результате при исследованиях обратного отражения в широком диапазоне частот одного и того же выбранного участка соснового массива могут наблюдаться трудно объяснимые эффекты.

Одновременно с этим фактом была обнаружена и другая особенность. Для исключения воз-

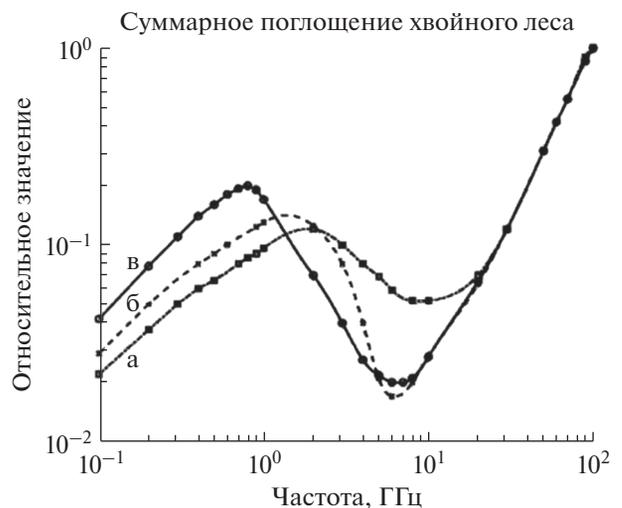


Рис. 4. Суммарный УЭПР хвойного леса для НН-поляризации для различных значений параметров стволов, веток и игл. При оценках использованы данные работы [19] для возраста леса 14 (а), 22 (б), 38 (в) лет; данные влажности взяты из работ [22, 23]).

можных искажений, возникающих при выполнении радиолокационной съемки и первичной обработке 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 действительно наблюдается anomальное поведение обратного рассеяния. В частности, некоторые особенности отражательных свойств хорошо прослеживаются в диапазонах L и P для НН-поляризации (рис. 5). Сезонное отличие в отражательных характеристиках выбранных двух участков леса (на рисунке выбранные участки обозначены кружками) наблюдается в L-, P-диапазонах и отсутствует в VHF-диапазоне (эти данные не приведены на рисунке) на всех этапах эксперимента.

Сопоставление РЛИ в L-диапазоне для двух участков соснового леса с различными таксономическими параметрами в сентябре, ноябре и феврале (рис. 5а–5в) показывают, 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. 5г–5е) наблюдается противоположная тенденция в отражательных свойствах: в феврале месяце эта разница резко увеличивается. В осенний период различие в отражении этих участков в P-диапазоне проявляется слабо. Для VHF-диапазона разница в отражательных характеристиках выбранных двух участков леса отсут-

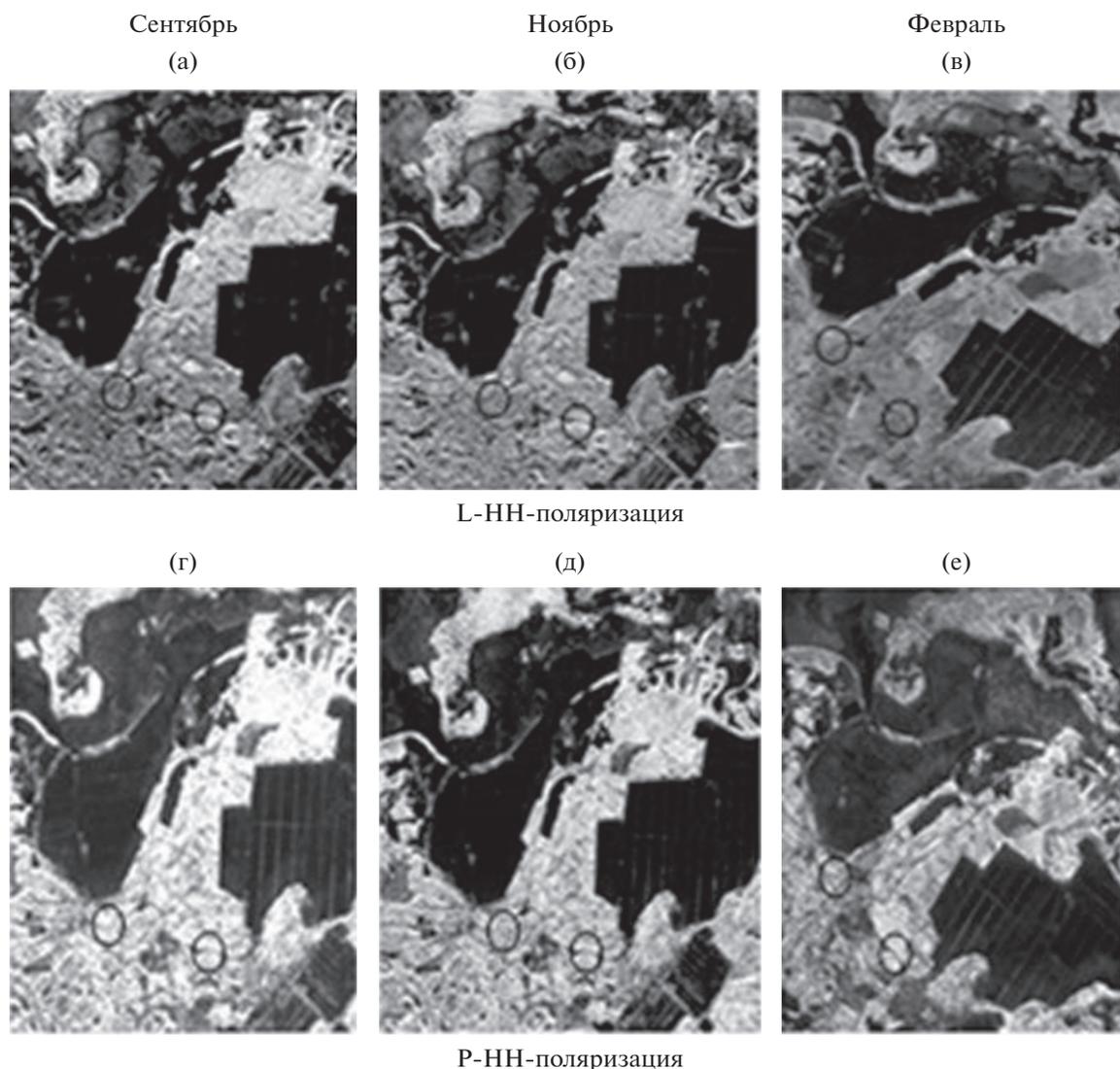


Рис. 5. Фрагмент радиолокационного изображения леса в L- и P-диапазонах для случая НН-поляризации. Кружками отмечены опытные участки.

ствуется на всех этапах эксперимента. В соответствии с этим возникла задача объяснить наблюдаемый характер отражающих свойств сосновых участков [14]. Было сделано предположение, что особенности поведения радиолокационной отражаемости леса в L- и P-диапазонах можно объяснить сезонной изменчивостью водного режима отдельных элементов деревьев. Детали проведения наземных измерений представлены в работах [22, 23]. Измерения влажности элементов хвойного покрова проводили при температурных условиях, которые были идентичны условиям проведения радиолокационной съемки. Представленные на рис. 3 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:

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

Именно уменьшение влажности тонких веток и хвои в холодный период года определяет уменьшение отражательной способности хвойного леса в L-диапазоне длин волн, что и было обнаружено

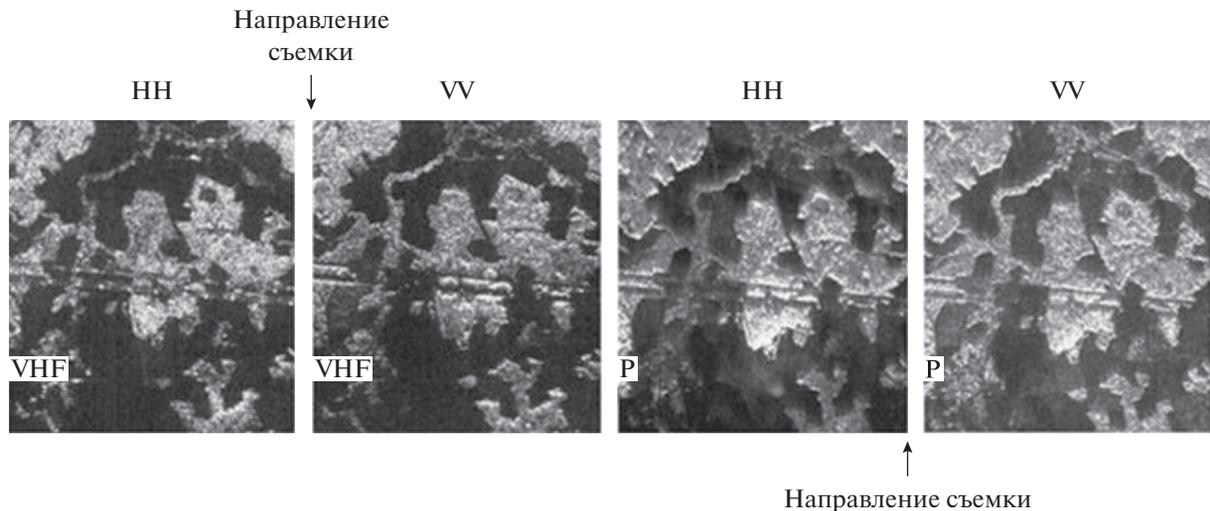


Рис. 6. Фрагмент РЛИ размером 4×4.2 км² для HH- и VV-поляризаций в VHF- и P-диапазонах для наблюдения эффекта углового отражения от лесных участков.

в [22], несмотря на то что влажность древесины в холодный период увеличивается. Кроме того, такой необычный характер изменения влажности древесины и тонких веток позволил объяснить необычное сезонное поведение экспериментальных результатов радиолокационных съемок в L- и P-диапазонах длин волн [14].

4. ВЛИЯНИЕ НАКЛОНА ПОВЕРХНОСТИ НА ОТРАЖАТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЕСНЫХ ПОКРОВОВ В VHF-ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

Хорошо известно, что на РЛИ при переходе от поверхности с малым коэффициентом обратного отражения к поверхности с большим значением коэффициента обратного отражения (например, при переходе от сельскохозяйственного поля к лесу, от дороги к лесопосадке) наблюдается область (полоса) сильного обратного рассеивания. Появление такой полосы объясняется эффектом углового отражения.

Выполненные экспериментальные исследования с помощью многочастотного поляриметрического РСА «ИМАРК» показали, что для диапазонов X, L и P данный эффект наблюдается независимо от поляризации, так как стволы деревьев в этих диапазонах длин волн эффективно отражают ЭМИ в зеркальном направлении. Однако анализ углового отражения в VHF-диапазоне показал, что данный эффект отчетливо проявляется для VV-поляризации, но отсутствует для HH-поляризации. На рис. 6 для сравнения представлены фрагменты РЛИ размером 4×4.2 км² для диапазонов P и VHF для HH- и VV-поляризаций [14]. Анализ доступных РЛИ, полученных шведскими специалистами [24] для HH-поляризации под-

тверждает, что угловое отражение в VHF-диапазоне этой поляризации в районах лесных покровов отсутствует (рис. 7а). В то же время спецтехника, расположенная на открытом поле, дает эффект углового отражения (рис. 7б).

Таким образом, основные элементы лесного хвойного покрова, участвующие в обратном отражении для HH- и VV-поляризаций в метровом диапазоне длин волн, различаются. Следовательно, основные механизмы отражения от лесного покрова для этих поляризаций должны также отличаться. Для VV-поляризации обратное отражение определяется в первую очередь стволами деревьев, для HH-поляризации — крупными ветками, которые можно рассматривать в качестве дипольных вибраторов. В этом случае роль переотражения электромагнитных волн от поверхности уменьшается.

В работе [9] представлены результаты по изучению влияния наклона поверхности земного покрова на обратное отражение ЭМИ диапазона VHF. Исследования были проведены на основе радиолокационных съемок лесных массивов на склонах холма, имеющих различный наклон (рис. 8а). Авторы [9] объяснили изменение отражательной способности при разных наклонах земной поверхности влиянием переотражения элементами лесной растительности и наклонной поверхностью и сделали попытку математически обосновать это. Однако в работе [24] приведен РЛИ участка лесного массива на фоне водной поверхности, где эффект углового отражения для HH-поляризации отсутствует, что противоречит результатам [9].

Наиболее правдоподобное объяснение заключается в следующем. На склонах гор азимутальное распределение ветвей деревьев (см. рис. 8б, 8в) ме-

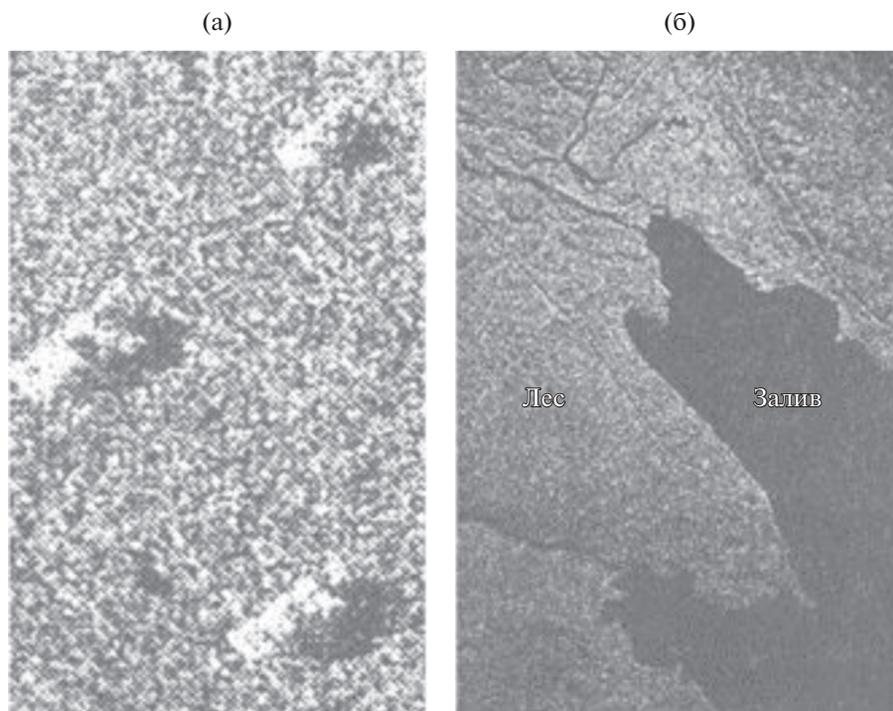


Рис. 7. Радиолокационное изображение в VHF-диапазоне для НН-поляризации [24]; а – спецтехника, расположенная на поле, б – лесной покров.

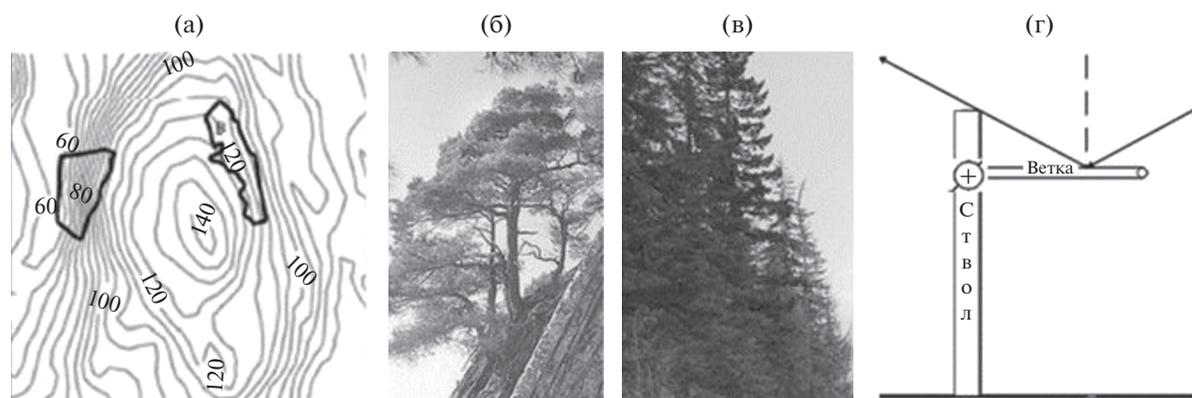


Рис. 8. Эксперимент по радиолокационному зондированию лесных участков, показывающий влияние наклона земной поверхности на величину обратного отражения; а – геометрия проведения эксперимента; б и в – изменение азимутального распределения направления ветвей деревьев на склонах горных районов; г – влияние направления тонкого диэлектрического цилиндра на обратное отражение.

няется – количество ветвей, расположенных перпендикулярно к склону увеличивается и их роль в отражении для НН-поляризации уменьшается. Теоретическое рассмотрение в работе [25] на основе отражения электромагнитных волн от тонкого диэлектрического цилиндра, по крайней мере для направлений, показанных на рис. 8г, объясняет наблюдаемый эффект.

Для более четкого понимания отражения ЭМИ диапазона VHF от структур, подобных дере-

вьям, авторами работы [26] были проведены теоретические и экспериментальные исследования, касающиеся особенностей радиолокационного отражения от опор линий электропередач (ЛЭП) (рис. 9а).

При моделировании рассеяния ЭМИ от такой конструкции принимали во внимание два механизма обратного отражения: прямое отражение от элементов опор (от столба и от перекладин); отражение рассеянных волн вниз от объекта под зеркальным углом в сторону поверхности земли

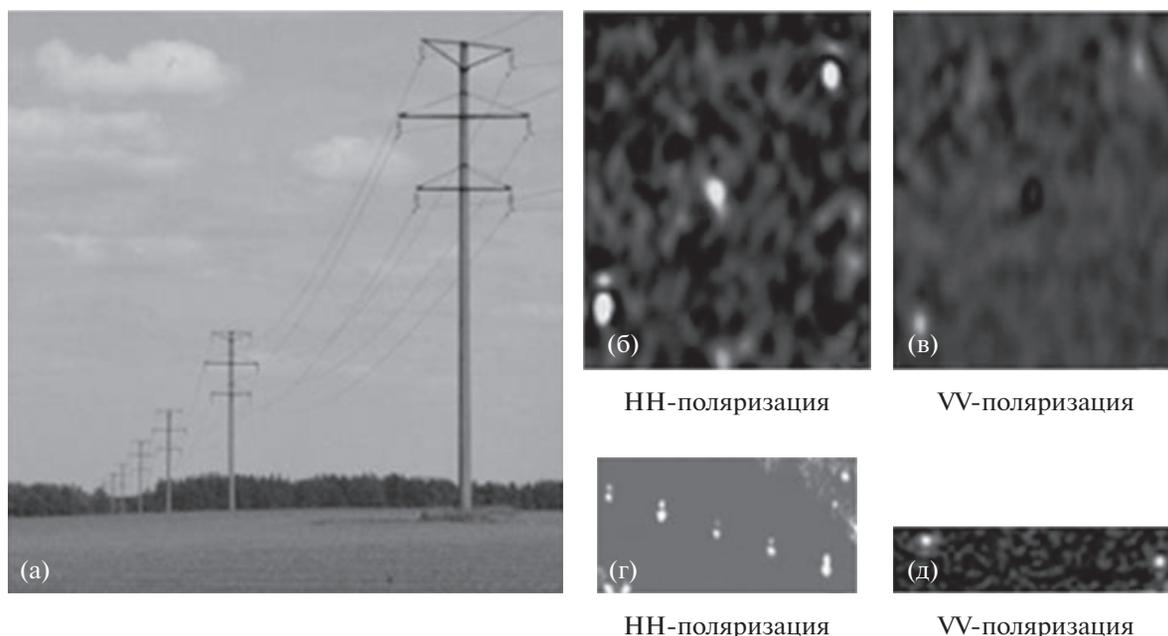


Рис. 9. Изучения особенностей отражения ЭМИ от ЛЭП (а) для HH- и VV-поляризаций (б–д) в VHF-диапазоне.

(перпендикулярной или наклонной по отношению к столбу) и дальнейшим переотражением от нее в сторону РСА. Для второго механизма отражательные свойства поверхности и локальная топография играют важную роль. Обычно при моделировании рассматривают падение плоской волны и учитывают отражение от всех элементов конструкции одновременно, а поверхность земли считают плоской. Необходимо также принимать во внимание, что РСА обладает высокой разрешающей способностью по дальности (элемент разрешения по дальности меньше высоты опоры). Радиолокационные сигналы, непосредственно отразившиеся от перекладин, и сигналы, переотразившиеся от земли, оказываются разнесенными по времени. На РЛИ эти сигналы должны наблюдаться на различных дальностях, т.е. эффект уголкового отражения не наблюдается.

При отражении от столба по схеме столб–земля и земля–столб (если поверхность земли ровная и перпендикулярна к столбу) рассеяние соответствует двугранному механизму обратного отражения и на РЛИ будет одно изображение. Если переотражение соответствует наклонной поверхности земли, то двугранный механизм обратного отражения не работает и оно не проявляется на РЛИ.

Численное моделирование отражательных свойств для отдельных элементов конструкции опоры ЛЭП при различных значениях влажности грунта проводили методом интегральных уравнений, который является строгим в электродинамическом смысле [27]. Отраженная от грунта волна вычислялась по формулам Френеля. Расчеты ком-

плексной диэлектрической проницаемости грунта выполнялись согласно. Анализ полученных зависимостей для углов визирования $60^\circ \dots 70^\circ$ показал следующее.

1. Для VV-поляризации основной вклад в отражение дает столб. Зависимость от угла визирования и влажности почвы сложная. Систему столб–земля следует рассматривать как уголкового отражателя, т.е. отражение от отдельных элементов ствола и ровной земной поверхности приходит в приемник с одинаковой фазой. Происходит когерентное накопление – отражение для короткого импульса аналогично отражению плоской волны с центром отражения у земли (рис. 9в, 9д). Отражение от перекладин мало. Таким образом, для VV-поляризации следует ожидать отражения от опоры ЛЭП в виде одного отклика, величина которого сильно зависит от локальной влажности и топографии поверхности в районе опоры.

2. Для горизонтальной поляризации преобладающую роль играют сигналы, непосредственно отразившиеся от перекладин, и сигналы, отразившиеся по схеме рассеяния перекладина–земля и земля–перекладина. Эти сигналы разнесены по времени (на РЛИ эти сигналы наблюдаются на различных дальностях) (рис. 9б, 9г). В нашем случае расстояние между тремя перекладинами меньше разрешающей способности РСА по дальности, поэтому отражение от перекладин и переотражение от земной поверхности проявляются в виде одиночных откликов, величина переотражений от земной поверхности также зависит от локальной влажности и топографии поверхности в

районе опоры. Теоретические расчеты показывают, что от азимутального расположения переключателя относительно направления распространения ЭМИ величины отражения сильно меняются.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен комплексный эксперимент по исследованию особенностей радиолокационных изображений хвойных лесов, включающий проведение самолетных измерений с помощью многочастотной поляриметрической радиолокационной станции РСА “ИМАРК” одновременно с проведением наземных контактных геофизических измерений параметров растительного и почвенного покровов. Наземные измерения в сосновых лесах в период времени сентябрь—июль показали, что наблюдаемые значительные изменения влажности древесины (стволов), веток и хвои деревьев особенно сильно наблюдаются 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 (рис. 3а). 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 таксометрические 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Report for Mission Selection: Biomass (ESA SP-1324/1, May 2012). Noordwijk: ESA Communication Production Office ESTEC, 2012. 204 p. https://esamultimedia.esa.int/docs/EarthObservation/SP1324-1_BIOMASSr.pdf.
2. Saatchi S., Ulander L., Williams M. et al. // Nature Climate Change. 2012. V. 2. № 12. P. 826.
3. Kutuza B., Kalinkevich A., Zakharov A. et al. // Proc. 10th Europ. Conf. Synthetic Aperture Radar (EUSAR-2014). Berlin. 02–06 Jun. Berlin: VDE Verlag, 2014. P. 1345.
4. Kutuza B., Kalinkevich A., Zakharov A. et al. // Proc. European Conf. Synthetic Aperture Radar (EUSAR-2016), Hamburg. 06–09 Jun. Berlin: VDE Verlag, 2016. P. 296.
5. “ИМАРК” – Multi-Frequency Airborne Polarimetric Radar System Operating on Board of TU-134A Flying Laboratory for Remote Observations of the Earth’s Surface. М.: VEGA-M Corp., 1998. P. 8.
6. Захарова Л.Н., Захаров А.И. // Тр. V-ой Всерос. науч. конф. “Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике”, Муром. 29.06–1.07.2015. Муром: Полиграф. центр МИ ВлГУ, 2015. С. 59.
7. Zakharova L.N. // Proc. 8th Europ. Conf. Synthetic Aperture Radar (EUSAR-2010). Aachen. 7–10 Jun. 2010. Berlin: VDE Verlag, 2010. V. 1. P. 264.
8. Inhoff M.L. // IEEE Trans. 1995. V. GRS-30. № 2. P. 511.
9. Smith-Jonforsen G., Ulander L.M.H., Luo X. // IEEE Trans. 2005. V. GRS-43. № 10. P. 2246.
10. Rignot E., Way J., Freeman A., Holt J. // IEEE Trans. 1994. V. GRS-32. № 2. P. 371.
11. Уголев Б.Н. Древесиноведение и лесное товароведение. М.: Издат. центр “Академия”, 2011.
12. Крамер П.Д., Козловский Т.Т. Физиология древесных растений. М.: Лесная промышленность, 1983.
13. Glisson A.W., Wilton D.R. // IEEE Trans. 1980. V. AP-28. № 5. P. 593.
14. Калинин А.А., Манаков В.Ю., Арманд Н.А., Крылова М.С. // РЭ. 2008. Т. 53. № 10. С. 1223.
15. Перельгин Л.М., Уголев Б.Н. Древесиноведение. М.: Лесная промышленность, 1971.
16. Bellez S., Dahon C., Roussel H. // IEEE Trans. 2009. V. GRS-47. № 12. P. 4153
17. Sarabandi K., Senior T. // IEEE Trans. 1990. V. GRS-28. № 5. P. 879.
18. Stiles J., Sarabandi K. // IEEE Trans. 1996. V. AP-44. № 2. P. 260.
19. Armand N.A., Polyakov V.M. Radio Propagation and Remote Sensing of the Environment. BocaRaton: CRC Press, 2005.
20. Ulaby F.T., Sarabandi K., Mc Donald K. et al. // Int. J. Remote Sensing. 1990. V. 11. № 7. P. 1223.
21. Hsu C.C., Han H.C., Shin R.T. et al. // Int. J. Remote Sensing. 1994. V. 15. № 14. P. 2943.
22. Калинин А.А., Крылова М.С., Арманд Н.А. и др. // РЭ. 2010. Т. 55. № 11. С. 1327.
23. Калинин А.А., Крылова М.С., Манаков В.Ю. и др. // Тр. 4-ой Всерос. науч. конф. “Радиофизические методы дистанционного зондирования сред”, Муром. 30.06–03.07.2009. Муром: МИ ВлГУ, 2009. С. 186.
24. Walter F. CARABAS-2 Campaign Vidsel 2002 Forest Report. FOI-R-0962-SE. Stockholm: Swedish Defence Research Agency, 2003. 57 p. <https://www.foi.se/rest-api/report/FOI-R-0962-SE>
25. Imhoff M.L. // IEEE Trans. 1995. V. GRS-33. № 2. P. 341.
26. Glisson A.W., Wilton D.R. // IEEE Trans. 1980. V. AP-28. № 5. P. 593.
27. Druchinin S.V. // Proc. 4th Int. Conf. on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances (ISEMA 2001). Weimar. 13–16 May. Weimar: MFPA an der Bauhaus-Universität, 2001. P. 438.