

ОРИГИНАЛЬНЫЕ
СТАТЬИ

УДК 630*161:582.475.4:621.371

**ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЗОННОЙ ДИНАМИКИ ВОДНОГО РЕЖИМА
СОСНОВЫХ ДЕРЕВЬЕВ ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ АЭРОСЪЕМОК**

© 2011 г. А. А. Калинин¹, М. С. Крылова¹, А. Ю. Каковкина²,
В. И. Слюсарев²

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

² Российский государственный аграрный университет им. К.А. Тимирязева
142200 Москва, Тимирязевская ул., 49

E-mail: kalinkevich@newmail.ru

Поступила в редакцию 10.02.2010 г.

Проведены сезонные исследования отражательных свойств сосновых лесов с помощью многочастотного радиолокационного поляриметрического комплекса. Отмечено, что в диапазонах L , P , VHF наблюдается сезонное аномальное поведение обратного рассеяния. Выдвинуто предположение, что за это “отвечает” водный режим элементов сосны. Показано, что сезонные изменения влажности древесины (стволов), веток и хвои деревьев особенно заметны в холодный период года при резких изменениях температуры воздуха. В основу объяснения отражательных свойств сосновых лесов в диапазонах L и P положены особенности водного режима в различных элементах дерева.

Многочастотная радиолокационная съемка, обратное отражение, влажность отдельных элементов дерева, сезонные измерения.

В настоящее время актуальной является проблема установления особенностей динамики пространственного распределения лесной растительности по земной поверхности. Существующие оптические космические датчики хорошо зарекомендовали себя для классификации лесных формаций [3, 15] и мониторинга динамики обезлесивания и восстановления величины биомассы лесной растительности. Одновременно с этим успешно развиваются радиолокационные методы, которые позволяют определять биомассу лесного покрова, приходящуюся на единицу площади [12]. С увеличением биомассы лесного покрова увеличивается обратное отражение. Экспериментальные и теоретические исследования показали, что наблюдается эффект “насыщения”, т.е. с некоторого значения биомассы ее увеличение не приводит к изменению обратного отражения [10]. Эффект “насыщения” зависит от диапазона длин волн электромагнитного излучения (ЭМИ). Для измерения биомассы лесных покровов оптимально было бы использовать метровый (VHF) диапазон [11, 13]. Однако с учетом влияния ионосферы оказывается, что из космоса можно использовать

ЭМИ длиной не более 70 см [12]. Диэлектрические свойства элементов дерева, сильно влияющие на отражательные свойства леса, меняются в течение года (изменяются средняя влажность, водный режим, температура и т.д.). Как эти изменения повлияют на отражательные свойства лесов не совсем ясно. Для выяснения этого в Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН была выполнена радиолокационная аэросъемка [2].

Радиолокационная аэросъемка хвойных сосновых лесов проводилась в 2005–2006 гг. с высоты 6 км с помощью комплекса радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) “ИМАРК” [9], работающего в диапазонах длин волн: X ($\lambda = 4$ см, $F = 7.8$ ГГц), L ($\lambda = 23$ см, $F = 1.3$ ГГц), P ($\lambda = 68$ см, $F = 0.44$ ГГц) и VHF ($\lambda = 254$ см, $F = 0.117$ ГГц) на тестовом полигоне в Рязанской обл. Выбранный тестовый полигон характеризуется наличием разнообразных природных и антропогенных объектов: хвойный, лиственный и смешанный леса, торфяники, включая места добычи торфа, луга, сельскохозяйственные поля, реки, озера, дамбы, линии

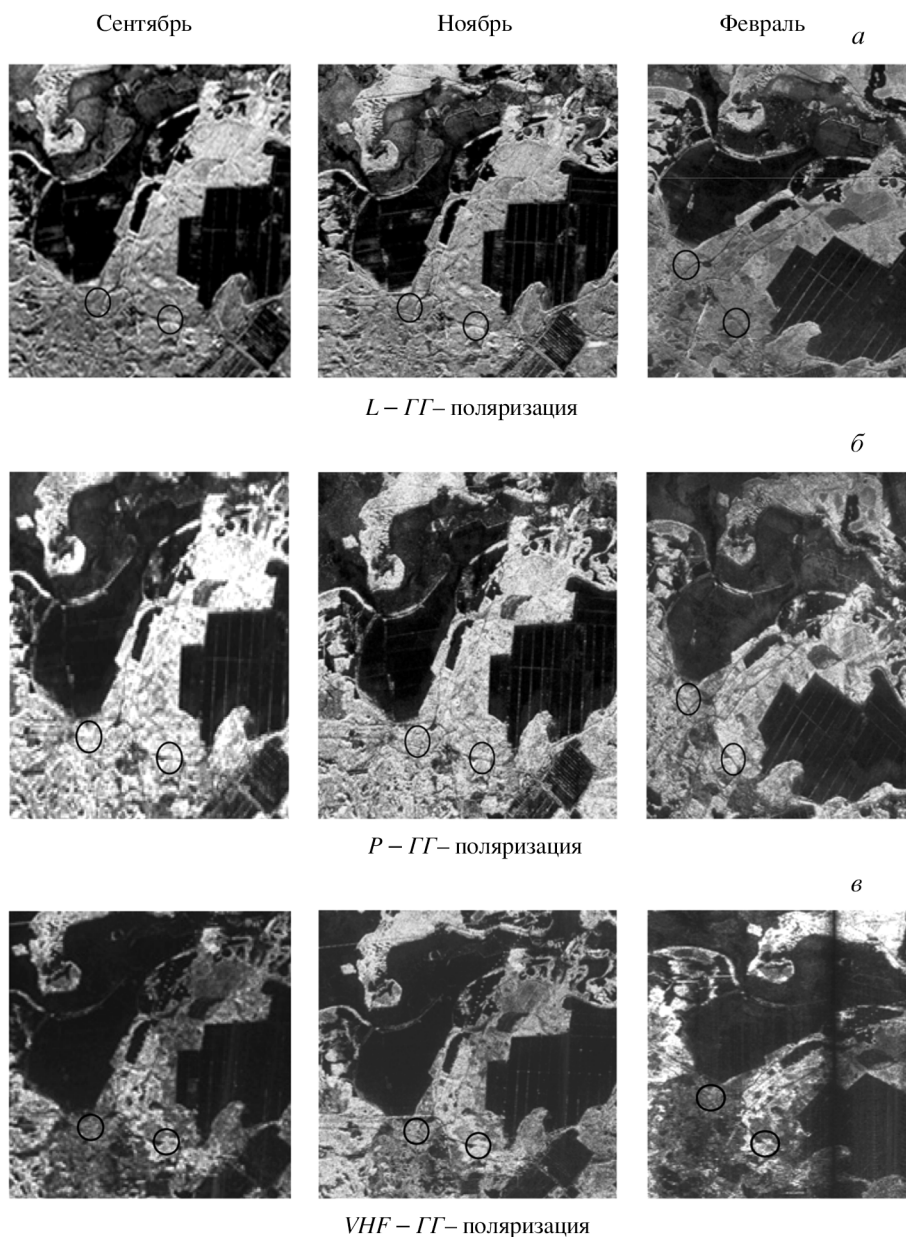


Рис. 1. Фрагмент радиолокационного изображения леса в *L* (*a*), *P* (*b*) и *VHF* (*в*) диапазонах. Кружками отмечены опытные участки 1 и 2.

электропередачи, потопляемые земли, поселки и др. Для изучения отражательных свойств были выбраны однородные по составу участки соснового леса с различными токсационными характеристиками (средняя высота 13–22 м, диаметр 0.11–0.33 м, частота древостоя 0.03–0.3 деревьев на 1 м²). Особенностью эксперимента явилось то, что радиолокационная съемка могла осуществляться в разных диапазонах одновременно. При этом влияние условий съемки для всех диапазонов одинаково. Кроме того, чтобы исключить влияние 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, расположенных рядом и имеющих различное значение биомассы.

При анализе РЛИ сосновых лесов в диапазонах *L*, *P*, *VHF* замечено, что сезонные отличия отражательных характеристик двух выбранных участков хорошо наблюдаются в *L*- и *P*-диапазонах на горизонтальной-горизонтальной (ГГ) поляризации и отсутствуют в *VHF*-диапазоне на всех этапах эксперимента (рис. 1).

Сопоставление РЛИ (рис. 1а) в *L*-диапазоне для двух участков соснового леса с различными таксационными параметрами в сентябре и ноябре показывают, что отражение от леса увеличивается с ростом биомассы растительности. Однако в феврале разница в отражательных свойствах выбранных участков практически исчезает. Одновременно с этим в *P*-диапазоне длин волн (рис. 1б) наблюдается противоположная тенденция в отражательных свойствах: в феврале разница резко увеличивается. В осенний период различие в отражении этих участков в *P*-диапазоне проявляется слабо. На рис. 1в представлен фрагмент РЛИ леса в *VHF*-диапазоне. Разница в отражательных характеристиках двух выбранных участков леса отсутствует на всех этапах эксперимента. Следует отметить, что радиолокационная съемка в феврале выполнялась в период, когда стояла холодная погода – в отдельные дни температура в месте проведения эксперимента достигала почти $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким образом, можно отметить следующее: (а) в период с сентября по февраль таксационные параметры выбранных сосновых участков не изменились; (б) отражательные характеристики поверхности на обоих участках изменяются одинаково, так как участки расположены в непосредственной близости друг от друга; это подтверждается результатами летних измерений состава грунта и уровнем залегания грунтовых вод [1]; (в) сезонные свойства древесины для обоих сосновых участков должны меняться одинаково. 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 изменчивостью водного режима отдельных элементов деревьев (стволов, веток, хвои) в период смены погодных температурных режимов, а именно в период резкого уменьшения температуры.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ВОДНОГО РЕЖИМА ДЕРЕВЬЕВ

Известно, что более 50% общей сырой массы дерева состоит из воды. Различают две формы воды, содержащейся в древесине: связанную и свободную [6, 7]. Связанная вода находится в клеточных стенках, а свободная содержится в полостях клеток и межклеточных пространствах. Связанная вода удерживается в основном физико-химическими связями, изменение ее содержания существенно отражается на большинстве свойств древесины. Свободная вода, удерживаемая толь-

ко механическими связями, удаляется легче, чем связанная вода, и оказывает меньшее влияние на свойства древесины, но сильнее влияет на обратное отражение радиолокационного сигнала. При исследованиях обратного отражения в первую очередь необходимы сведения о свободной влаге. На практике часто применяется прямой метод измерения влажности путем высушивания, однако ему присущи серьезные погрешности. Наиболее серьезная связана с тем, что при высушивании наряду с потерей свободной влаги происходит потеря связанной воды и летучих веществ. Таким образом, в результате определяется не истинное значение влажности, а некоторая условная величина, близкая к ней (нас в первую очередь интересует влажность, обусловленная свободной влагой).

В 50-е гг. интенсивно проводились исследования водного режима разнообразных древесных пород. Содержание воды широко варьирует в разных частях дерева, зависит от видовой принадлежности, возраста, географического места обитания и времени года. У некоторых видов древесных растений наблюдаются большие сезонные колебания содержания воды в стволах, однако даже для одних и тех же древесных пород сезонные изменения влажности могут быть различны. П.Д. Крамер и Т.Т. Козловский [5] приводят сведения об исследованиях Р. Гиббса, который обнаружил у хвойных деревьев в Восточной Канаде довольно слабые изменения содержания воды в стволах. Он же приводит данные Р. Гартига и Э. Мюнха, согласно которым в Европе у хвойных деревьев наблюдаются значительные сезонные колебания содержания воды. Анализ возможных причин, объясняющих это, отсутствует. Таким образом, строгой зависимости водного режима от сезона года нет, и отсутствуют данные, связывающие погодные условия с водным режимом хвойных растений. Возможно, использование различных методик для измерения влажности и игнорирование влияния погодных условий являются причинами наблюдаемых сезонных изменений.

Для выяснения сезонной изменчивости водного режима сосновых лесов в районе проведения радиолокационного эксперимента 2006 г. наземные сезонные измерения выполнялись на семи опытных участках [2] с сентября 2008 г. по июль 2009 г. Измерялись таксационные параметры деревьев и весовая влажность стволов, хвои, веток. Выбранные участки имеют различные таксационные параметры. Особое внимание уделялось участкам, которые располагались в непосредственной близости друг от друга и для которых характерны описанные выше особенности в от-

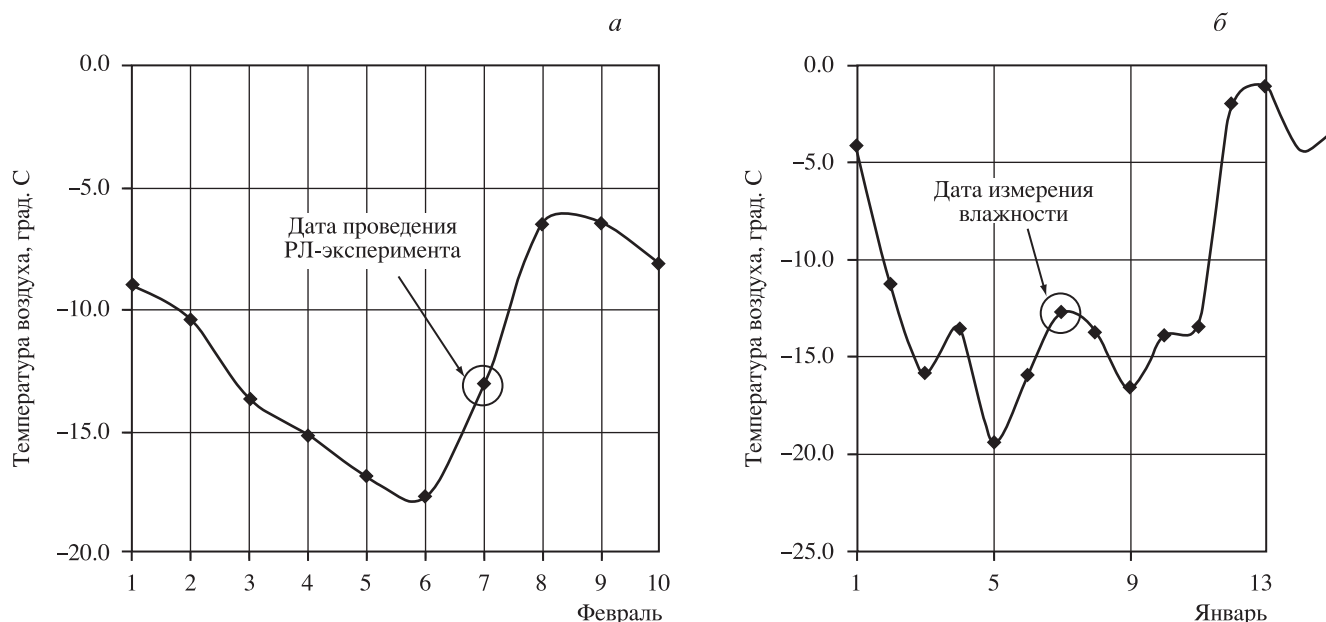


Рис. 2. Температура воздуха: *а* – ход среднесуточной температуры в период проведения радиолокационной съемки (февраль 2006 г.), *б* – ход температуры в период проведения наземных измерений влажности (январь 2009 г.).

ражательных свойствах. Внимание уделялось погодным условиям – при взятии проб подбирались такие температурные режимы, которые были идентичны условиям проведения радиолокационной съемки. На рис. 2 представлены зависимости изменения температуры воздуха в период проведения радиолокационной съемки (*а*) и в период исследования влажности элементов сосновых участков (*б*). Представленные температурные зависимости воздуха соответствуют измерениям на метеорологической станции в г. Рязань в 100 км от места проведения эксперимента; реальная температура в районе проведения экспериментов была на 5–7 °С ниже. В феврале 2006 г. в течение нескольких дней до проведения радиолокационной съемки стояла также холодная погода.

Влажность древесины ствола меняется по высоте и глубине (от коры к сердцевине), зависит от таксационных показателей, микрорельефа местности и иных параметров, поэтому эта величина может варьировать от дерева к дереву. В связи с этим на каждом опытном участке было отобрано по несколько деревьев. Сезонные измерения влажности для данных деревьев выполнялись следующим образом: для оценки влажности ствола брались пробы древесины на высоте 130 см от поверхности земли и с глубины ствола 0 ÷ 6 см (без коры). Недостатком является необходимость многочисленного взятия проб из стволов одних и тех же деревьев. При исследованиях влажности живой древесины использовался метод высушивания, который, как было сказано выше, дает

не истинное значение свободной влажности, а условную величину, близкую к ней.

Выбирались деревья, у которых было возможно 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 представлена зависимость динамики изменения влажности древесины (*а*), тонких веток (*б*) (с диаметром не более 15 мм), хвои (*в*) по месяцам.

На рис. 3*а* линиями показаны результаты измерений для отдельно взятых деревьев, которые располагаются на сосновых участках с различными отражающими способностями. Для отдельных деревьев характер изменения влажности по сезону идентичен. Точки на этом рисунке отражают результаты измерений для остальных деревьев. Аналогичным образом на рис. 3*б* представлены зависимости изменения влажности для веток. Весовая влажность веток и хвои также сильно изменяется, но зависимость изменения для хвои совершенно идентична для ветвей (отметим, что нам не удалось выполнить измерения влажности толстых веток, и в дальнейшем мы полагаем, что их влажность соответствует влажности стволов).

Представленные зависимости показывают, что сезонный характер изменения влажности древесины отличается от изменения тонких веток и хвои. Значительное уменьшение влажности веток в холодный период года предшествовало началу

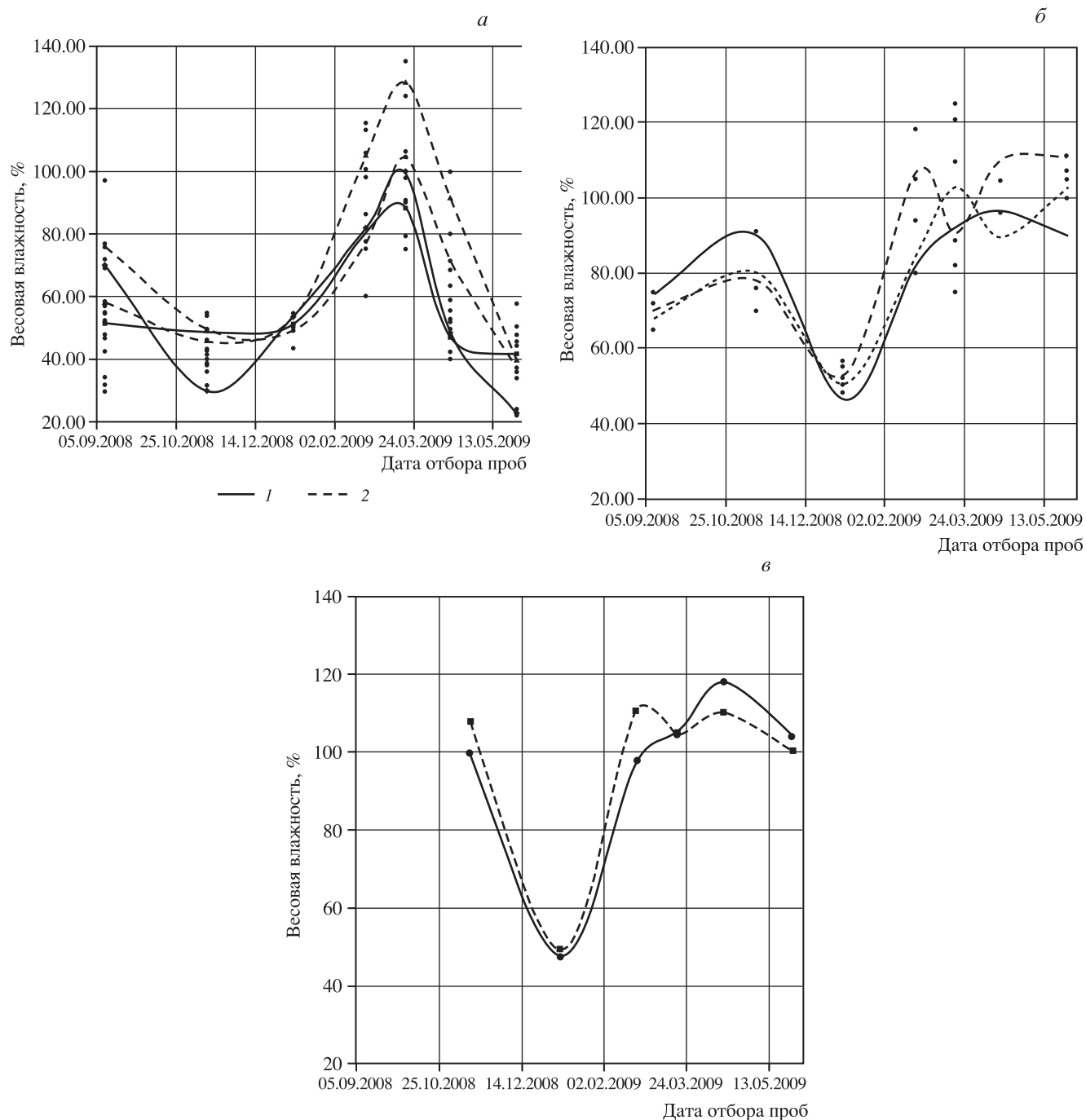


Рис. 3. Изменения влажности древесины (*а*), тонких веток (*б*) и хвои (*в*) по месяцам. Результаты измерений для отдельно взятых деревьев: 1 – опытного участка 1, 2 – опытного участка 2. Точками показаны результаты измерений для всех остальных деревьев на выбранных участках.

увеличения влажности древесины. В результате проведенных измерений сделаны следующие выводы. 1. В период с сентября по июль наблюдается значительное изменение влажности древесины (стволов), веток и хвои. 2. Для каждого отдельного дерева и леса в целом прослеживается четкая динамика изменения влажности древесины по месяцам. 3. Динамика изменения влажности хвои

и тонких веток идентичны. 4. В холодный период времени характер изменения влажности древесины, хвои и тонких веток существенно различаются. 5. В период с сентября по январь влажность древесины меняется незначительно (рис. 3*а*), одновременно с этим наблюдается сильное изменение влажности веток и хвои, происходит резкое уменьшение их влажности (рис. 3*б–в*).

ПОГЛОЩЕНИЕ И РАССЕЯНИЕ ОТ ЛЕСА

Архитектура соснового леса сложна. В первом приближении следует вести речь о двухслойной среде, состоящей из кроны (хвои, ветки) и слоя стволов. Крона деревьев располагается в верхнем ярусе леса. Влияние разных элементов дерева на обратное отражение различно.

Для коротких волн, в частности L -диапазона, хвоя и тонкие ветки являются наиболее эффективным элементом отражения. Стволы деревьев и толстые ветки представляют собой наиболее крупные элементы лесного покрова. Поэтому правомерно ожидать, что эти элементы наиболее интенсивно рассеивают радиоволны в P - и VHF -диапазонах. Однако при этом необходимо учитывать роль хвои и тонких веток в поглощении радиоволн. Для VHF -диапазона поглощение хвоей и тонкими ветками незначительно, и им пренебрегают, а сезонные особенности в этом диапазоне не наблюдаются (рис. 1б). Это явилось первой предпосылкой тому, чтобы наблюдаемые особенности отражения в L - и P -диапазонах отнести к влиянию тонких веток и хвои. Ситуация для P -диапазона несколько другая – несмотря на то, что основное обратное отражение в этом диапазоне формируется толстыми ветками и ствола-

ми, приходится учитывать поглощение хвоей и тонкими ветками. Таким образом, суммарная величина обратного отражения в P -диапазоне будет определяться “противоборством” двух факторов: обратным отражением от толстых веток и поглощением радиоволн кроной деревьев.

Поглощение и рассеяние радиоволн непосредственно связаны с диэлектрическими свойствами элементов дерева. Диэлектрическая проницаемость стволов, веток, хвои и др. определяется свойствами смеси “твердая клетчатка и весовая вода”. Клетчатка характеризуется плотностью ρ_c , а для воды важнейшим показателем является ее весовая плотность m_g . Кроме того, вводится объемная концентрация воды m_v , связанная с ее весовой концентрацией соотношением:

$$m_v = \frac{m_g \rho_c}{1 - m_g(1 - \rho_c)}. \quad (1)$$

В поляризации смеси наряду со свободной влагой играет роль и связанная вода. Роль последней сравнительно невелика. В работе [14] приведена зависимость комплексной диэлектрической проницаемости элементов дерева от влажности, температуры, частоты электромагнитного излучения:

$$\varepsilon_v = A(m_v) + B(m_v) \left[\varepsilon_0 + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_0}{1 - if/f_0} + i \frac{22.74}{f} \right] + C(m_v) \left[1 + \frac{18.97}{1 + \sqrt{-if/0.18}} \right]. \quad (2)$$

$$\text{Здесь: } A(m_v) = 1.7 + 3.2m_v + 6.5m_v^2, \quad B(m_v) = 0.166m_v(1 + 4.94m_v), \quad C(m_v) = \frac{91.06m_v^2}{1 + 59.5m_v^2}.$$

$$\varepsilon_0 = 4.9, \quad \varepsilon_s(t) = 88.045 - 0.4147t + 6.295 \cdot 10^{-4}t^2 + 1.075 \cdot 10^{-5}t^3.$$

$$f_0(t) = \frac{9.0}{1 - 3.44 \cdot 10^{-2}t + 6.24 \cdot 10^{-4}t^2 - 4.59 \cdot 10^{-6}t^3}.$$

Температура t выражена в градусах Цельсия, а частоты f и f_0 – в ГГц. На рис. 4 приведена частотная зависимость действительной части диэлектрической проницаемости растительности, полученная из выражения (2). Кривые относятся к различным значениям объемной влажности 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 и 0.5. Температура растительного покрова выбрана равной 20 °С. Рисунок показывает, что действительная часть диэлектрической проницаемости достаточно большая величина даже при сравнительно малой объемной влажности. Большими значениями характеризуется и мнимая часть диэлектрической проницаемости. Ее частотная зависимость при тех же значениях параметров, что были использованы для построения кривых рис. 4, показана на рис. 5.

Анализируя результаты измерений влажности элементов дерева в период с сентября по январь, можно заметить, что влажность древесины изменяется (увеличивается) незначительно. Одновременно с этим сильно изменяется влажность тонких веток и хвои. Поэтому напрашивается вывод, что именно влажность тонких веток и хвои ответственна за наблюдаемые особенности в отражении.

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.

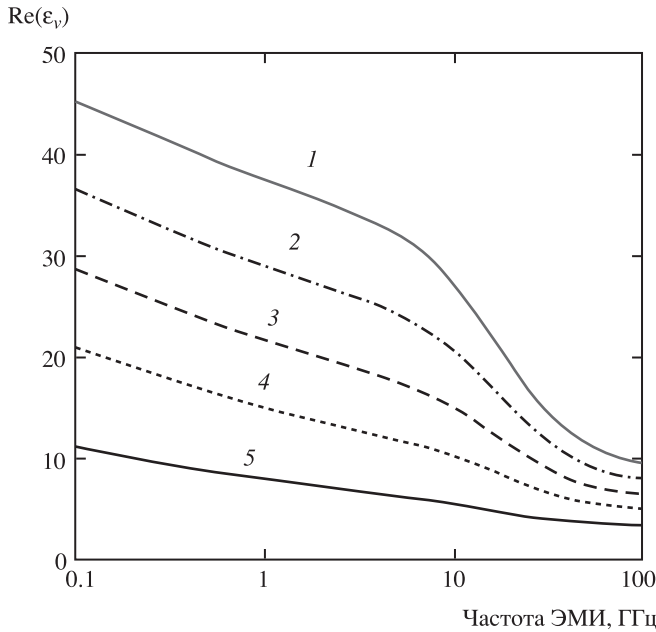


Рис. 4. Частотная зависимость действительной части диэлектрической проницаемости растительности при температуре 20 °С при различных значениях объемной влажности m_v : 1 – $m_v = 0.5$, 2 – $m_v = 0.4$, 3 – $m_v = 0.3$, 4 – $m_v = 0.2$, 5 – $m_v = 0.1$.

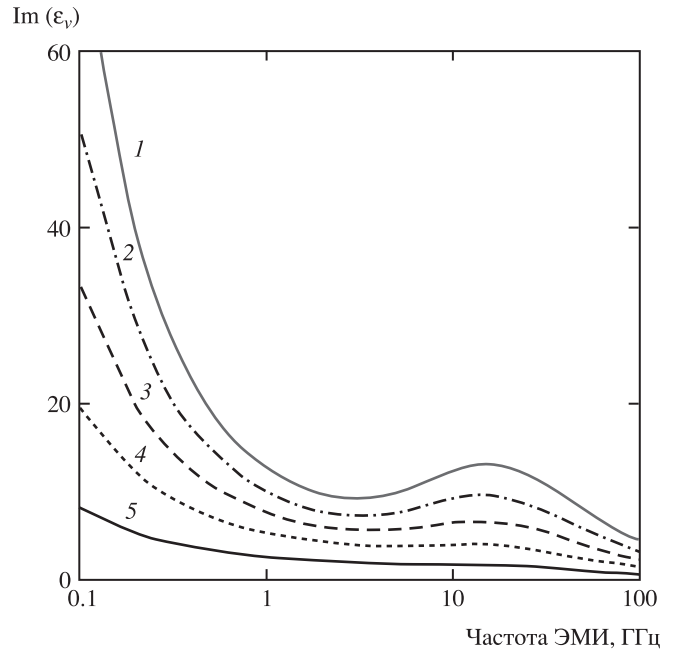


Рис. 5. Частотная зависимость мнимой части диэлектрической проницаемости растительности при температуре 20 °С при различных значениях объемной влажности m_v : 1 – $m_v = 0.5$, 2 – $m_v = 0.4$, 3 – $m_v = 0.3$, 4 – $m_v = 0.2$, 5 – $m_v = 0.1$.

В L -диапазоне длин волн обратное отражение формируется за счет отражения от хвои и тонких веток. Согласно основополагающим ра-

ботам [4, 8], эффективную площадь рассеяния (ЭПР) от хвоинки и ветки можно представить в виде:

$$\sigma_i = \frac{|\varepsilon - 1|^2 (ka)^4 l^2}{16} \int_0^{\pi/2} \text{sinc}^2(kl \cos \theta) \sin^5 \theta d\theta = \frac{|\varepsilon - 1|^2 a^4}{16l^2} J(kl), \quad (3)$$

где

$$J(q) = q^4 \int_0^1 (1 - x^2)^2 \text{sinc}^2(qx) dx.$$

Для выражения величины обратного отражения радиоволн необходимо σ_i умножить на число элементов отражения (V – объем элементов рассеивания на пути прохождения радиоволны), а также выполнить усреднение по возможным углам расположения элементов отражения к направлению распространения радиоволны и по размерам элементов отражения. В итоге обратное отражение σ_1 можно выразить формулой: $\sigma_1 = (|\varepsilon - 1|^2) V \overline{F(a, \lambda, \theta, l)}$, где $\overline{F(a, \lambda, \theta, l)}$ – усредненная функция по углам расположения игл и тонких веток (θ) и по длинам и диаметрам элементов рассеивания (l, d). Разницу в отражательных свойствах двух участков леса можно выразить следующим образом:

$$\sigma_2 - \sigma_1 = (|\varepsilon - 1|^2) \{V_2 \overline{F}_2 - V_1 \overline{F}_1\}. \quad (4)$$

Величины $V_i \overline{F}_i$ с ноября по февраль на каждом участке изменились незначительно, и величина $\sigma_2 - \sigma_1$ будет определяться изменением $|\varepsilon - 1|^2$. Используя результаты измерений влажности хвои и веток в ноябре и феврале (рис. 3б), выражения (1), (2) и рис. 4, 5, можно утверждать, что разница в отражательных свойствах двух выбранных сосновых участков уменьшилась и это подтверждает эксперимент.

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

$$\sigma_{2p} - \sigma_{1p} = \sigma_{2cm,P} \exp\left(-\frac{\varepsilon''}{\lambda} \pi V_2\right) - \sigma_{1cm,P} \exp\left(-\frac{\varepsilon''}{\lambda} \pi V_1\right). \quad (5)$$

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 мнимая часть диэлектрической проницаемости хвои и тонких веток ϵ'' уменьшилась. Поскольку $V_2 > V_1$, значение величины $\sigma_{2p} - \sigma_{1p}$ увеличилось. Это мы и наблюдаем в эксперименте, результаты которого отражает рис. 2б.

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

Заключение. Наземный эксперимент по измерению влажности в сосновых лесах в период с сентября по 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 (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 таксационные 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. Калинкевич А.А., Крылов М.С., Масюк В.М., Марчук В.Н. Использование георадаров для исследования неоднородностей верхнего слоя почвы хвойного леса // Радиотехника. 2009. № 3. С. 98–103.
2. Калинкевич А.А., Манаков В.Ю., Арманд Н.А., Крылова М.С. О механизме обратного рассеяния электромагнитных волн сосновым лесом в метровом диапазоне длин волн // Радиотехника и электроника. 2008. Т. 53. № 10. С. 1223–1235.
3. Козодеров В.В., Кондранин Т.В. Методы оценки состояния почвенно-растительного покрова по данным оптических систем дистанционного аэрокосмического зондирования. М.: МФТИ, 2008. 190 с.
4. Козодеров В.В., Косолапов В.С. Определение биомассы лесной растительности по радиолокационным измерениям со спутников: результаты модельных расчетов // Исследование Земли из космоса. 2005. № 3. С. 73–85.
5. Крамер П.Д., Козловский Т.Т. Физиология древесных растений / Пер. с англ. М.: Лесн. пром-сть, 1983. 462 с.
6. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. М.: Энергоиздат, 1982. 320 с.
7. Торговников Г.И. Диэлектрические свойства древесины. М.: Изд-во Леспром, 1986. 128 с.
8. Armand N.A., Polyakov V.M. Radio propagation and remote sensing of the Environment. New York: CRC Press, 2005. 440 с.
9. "IMARC" – 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. 8 p.
10. Imhoff M.L. Radar backscatter and biomass saturation: ramifications for global biomass inventory // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. March 1995. V. 33. № 2. P. 511–518.
11. Israelsson H., Ulander L., Martin T., Askne J.H. A Coherent scattering model to determine forest backscattering in the VHF-band // IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing. January 2000. V. 38, № 1. P. 238–248.
12. Seifert F.M., Snoeij P., Wilson J.J.W. Biomass mapping satellite system (BioSAR) // Proceeding of EUSAR2000, 3rd European Conference on SAR, 23–25 May 2000, Munich, Germany. P. 81–84.
13. Smith G., Ulander L. A Model Relating VHF-band backscatter to stem volume of coniferous boreal forest // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. March 2000. V. 38. № 2. P. 728–740.
14. Ulaby F.T., Sarabandi K., McDonald K., Whitt M., Dobson M.C. Michigan microwave canopy scattering model // Int. J. Remote Sensing. 1990. V. 11. № 7. P. 1223–1253.
15. Wharton S.W. Knowledge-based spectral classification of remotely sensed image data // Asrar G. (ed.) Theory and applications of optical remote sensing. New York: John Wiley & Sons, 1989. P. 548–577.

Investigation of Seasonal Dynamics of Water Regime of Pine Trees for Interpretation of Radar Survey Results

A. A. Kalinkevich, M. S. Krylova, A. Yu. Kakovkina, V. I. Slyusarev

Seasonal reflectivity of pine forests was studied using a multifrequency radar polarimetric complex. An anomalous seasonal back scatter was determined within a range of L , P , and VHF . The water regime of different pine tree is suggested to be responsible for this phenomenon. Seasonal changes in moisture of wood (stem), branches, and needles of trees are most notable in cold periods at sharp fluctuations of air temperature. Specific features of the water regime in different tree elements explain the reflectivity of pine forests within ranges of L and P .