

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ  
ОТ ЕСТЕСТВЕННЫХ ПОКРОВОВ ПОДМОСКОВЬЯ  
В СЕЗОН 2015–2016 ГГ. ПО РАДАРНЫМ ДАННЫМ  
SENTINEL 1A

© 2017 г. Н. В. Родионова

*Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,  
Фрязинский филиал, Фрязино, Московская обл.  
E-mail: rnv@ire.rssi.ru*

Поступила в редакцию 27.07.2016 г.

В работе рассмотрены вопросы изменения во времени коэффициента обратного рассеяния от лесных покровов и неиспользуемых земель на территории Подмосковья за годичный период по 29 сеансам съемки Sentinel 1A в С-диапазоне с 10 марта 2015 г. по 4 марта 2016 г. Интерпретация полученных данных осуществляется на основе модели изменения диэлектрической проницаемости элементов лесного покрова MIMICS и модели изменения диэлектрической проницаемости почвы. Для леса “Лосиный Остров” показаны сезонные особенности изменения обратного рассеяния от леса на двух поляризациях – VV и VH. Обнаружена сильная положительная корреляция между значениями коэффициента обратного рассеяния леса и значениями температуры воздуха. Благодаря модели MIMICS удалось связать изменение коэффициента обратного рассеяния леса в течение года с изменениями диэлектрической проницаемости деревьев в части, зависящей от температуры. Сделана попытка оценить значения влажности почвы неиспользуемых земель в районе г. Фрязино Московской обл. по радарным данным за годичный период 2015–2016 гг. Восстановление влажности почвы по одному уравнению Dubois et al., 1995 для согласованной поляризации и регрессии Rao et al., 2003 возможно при соблюдении ряда условий. Для снежного периода показано изменение во времени значений эквивалентного слоя воды для исследуемого участка поля.

**Ключевые слова:** радиолокационное изображение, многовременные данные, коэффициент обратного рассеяния, диэлектрическая проницаемость, влажность почвы, температура воздуха, коэффициент корреляции Пирсона

DOI: 10.7868/S0205961417040054

## ВВЕДЕНИЕ

Радарные данные, начиная с 1991 г., доступны на непрерывной основе (большой частью коммерческой) от разных сенсоров (ERS-1,-2, JERS, SIR-C/X-SAR, Radarsat-1,-2, Envisat-ASAR, ALOS-PALSAR и др.). Запуск 3 апреля 2014 г. Sentinel 1A (центральная частота 5.405 ГГц, С-диапазон) открыл возможность свободного доступа к временным рядам радарных данных с частотой повтора 12 дней для всех пользователей с октября 2014 г. Запуск Sentinel 1B состоялся 25 апреля 2016 г., использование его радарных данных позволит сократить время между повторными съемками исследуемых территорий до шести дней.

Многовременная двухполяризационная съемка Sentinel 1 (S1) с высоким пространственным и вре-

менным разрешением позволяет осуществлять мониторинг лесных покровов, с.-х. угодий, отслеживать методами поиска изменений последствия лесных пожаров и паводковых подтоплений.

В данной работе рассмотрены вопросы изменения коэффициента обратного рассеяния  $\sigma^0$  от лесных покровов и неиспользуемых земель на территории Подмосковья за годичный период 2015–2016 гг. по 29 сеансам съемки S1 с 10 марта 2015 г. по 4 марта 2016 г. Использовалась IW (Interferometric Wide Swath) мода S1 с поляризациями (VV+VH) и пространственным разрешением 20 м. Интерпретация полученных данных осуществлялась на основе модельных формул изменения диэлектрической проницаемости элементов лесного покрова (Ulaby et al., 1990) и почвы (Dubois et al., 1995).

## СЕЗОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ОБРАТНОГО ОТРАЖЕНИЯ ЛЕСА

Одними из первых для измерения сезонных вариаций обратного отражения леса в С-диапазоне были использованы радарные данные ERS-1 (VV-поляризация, угол зондирования  $23^\circ$ ) (Rignot et al., 1994). Исследовалось обратное отражение от таежных лесов Аляски в период август–декабрь 1991 г. с временным разрешением в три дня. Одновременно измерялись температура воздуха и почвы, а также влажность параметров лесного покрова и лесной подложки на трех тестовых участках. Временные вариации радарного рассеяния от леса интерпретировались с помощью модели обратного рассеяния MIMICS (Michigan Microwave Canopy Scattering Model) (Ulaby et al., 1990) и *in situ* наблюдений изменений диэлектрических свойств лесной подложки и лесного покрова, связанных с погодными условиями (осадки, засуха, замерзание).

Позднее для измерения сезонных изменений  $\sigma^0$  лесов в С-диапазоне использовались радарные данные Radarsat-1 (HH-поляризация, повтор съемки – 24 дня), Envisat ASAR (HV/HH-поляризации) и других спутников. Так, в работе (Rykhus, Lu, 2011) исследовались леса Аляски по многовременным радарным данным Radarsat-1 в пожароопасный период (с апреля по сентябрь 2002–2005 гг.). В работе (Thiel et al., 2007) использовались данные Envisat ASAR для исследования тайги в Иркутской обл. В работе приведены графики изменений  $\sigma^0$  леса и вырубок за 2006 г.

### *Особенности обратного радарного рассеяния от леса*

Обратное рассеяние радарного сигнала от леса формируется в основном за счет двух путей рассеяния: прямого отражения от элементов дерева и переотражения ствол – подстилающая поверхность. Так, в работе (Bourgeau-Chavez, Kasischke, 1999) показано, что для хвойных лесов на Аляске при угле падения для ERS порядка  $23^\circ$  большая часть обратного рассеяния приходит именно от поверхности земли.

Данные ERS-1 и наземные наблюдения показывают, что состояние влажности подстилающей поверхности имеет главное влияние на временной ход радарного отклика от леса, несмотря на затухание радарного сигнала при прохождении через лесной покров (Rignot et al., 1994). Лесной покров в модели MIMICS представляется как два разных горизонтальных слоя растительности, включающих в себя листья, сучья, стволы, над диэлектрической подстилающей поверхностью.

В модели MIMICS на базе лабораторных измерений (Ulaby et al., 1990) была найдена зависимость диэлектрических свойств элементов растительности от их влажности, частоты сигнала радара и температуры воздуха:

$$\varepsilon = A(m_v) + B(m_v) \cdot [D1(f) + D2(f, T)] + C(m_v) \cdot D3(f), \quad (1)$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $C$  – реальные функции, зависящие только от объемной влажности  $m_v$ , и принимающие одни значения для стволов и сучьев деревьев и другие – для листьев;  $B$  и  $C$  определяют относительный объем свободной и связанной воды;  $D1$  и  $D3$  – комплексные величины, зависящие только от частоты  $f$ ;  $D2$  – комплексная величина, зависящая от частоты  $f$  и температуры воздуха  $T$ .

Следует отметить, что полученные в работе (Калинкевич и др., 2010) результаты по измерению комплексной диэлектрической проницаемости “живой древесины” – сосны, ели, лиственницы и березы – существенно отличаются от значений  $\varepsilon$ , вычисленных по формуле (1).

Диэлектрическая постоянная деревьев (стволы, ветви) меняется между  $\varepsilon = 4.6 - j1.4$  (замерзшее дерево (Way et al., 1990)) и  $\varepsilon = 29.7 - j9.4$  (подтопленное дерево – flooded tree). Предполагается, что листья и иголки имеют те же диэлектрические свойства, как и дерево.

В работе (Rignot et al., 1994) показано, что влажность подстилающей поверхности играет важную роль в динамике обратного рассеяния от леса. Возрастание влажности подстилающей поверхности, как и рост содержания влаги лесного покрова, влияет на рост  $\sigma^0$ . Появление снега сопровождается уменьшением  $\sigma^0$ , что предполагает значительное уменьшение диэлектрических свойств почвы и растительности при замерзании.

### *Национальный парк “Лосиный Остров”*

В данной работе показаны сезонные изменения обратного рассеяния от леса “Лосиный Остров” с 10 марта 2015 г. по 4 марта 2016 г. по данным Sentinel 1.

“Лосиный Остров” – один из первых национальных парков в России (создан в 1983 г.), расположен на территории Москвы и Подмосковья.

В “Лосином Острове” леса занимают немногим более 80% площади. На долю хвойных лесов приходится 38%, березняков – 42%, широколиственных лесов – немногим более 16% лесопокрываемой площади (Национальные парки России, 1996).

На рис. 1 показано одно из исходных радарных изображений за 8 июля 2015 г. с поляризациями VV

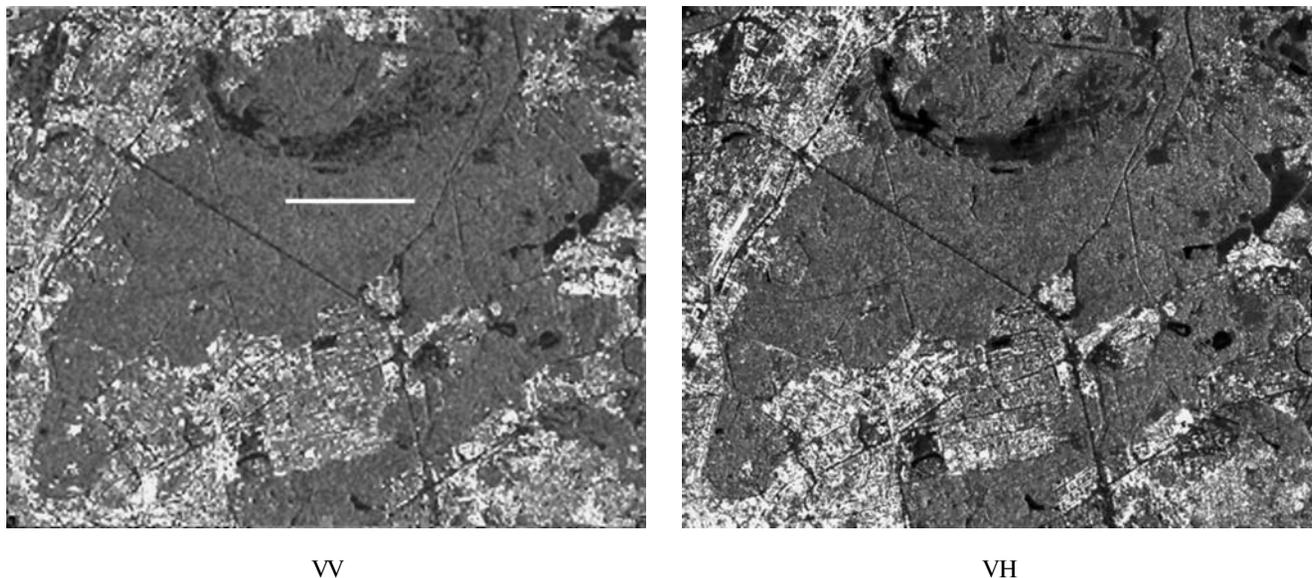


Рис. 1. Исходные радарные изображения за 08.07.2015.

и VH. Угол зондирования равен  $\sim 39^\circ$ . Размеры изображений  $1955 \times 1589$  пикселей. На изображении с VV-поляризацией белой линией показано положение профиля, где вычислялось среднее значение  $\sigma^0$  лесного массива по выборке порядка из 400 точек.

На рис. 2 даны графики изменения среднего значения  $\sigma^0$  с линиями тренда для поляризаций VV и VH для выделенного профиля леса за период с 10.03.2015 по 04.03.2016 с временным разрешением 12 дней. Вертикальными линиями на графиках показаны отклонения от среднего — значения среднего квадратического отклонения (СКО).

Исходя из рис. 2, можно отметить такие особенности сезонных изменений  $\sigma^0$  леса в течение года, как:

- рост значений  $\sigma^0$  от марта к маю для обеих поляризаций;

- для VV-поляризации наибольшие значения  $\sigma^0$  наблюдаются в летний сезон с уменьшением значений к осени и еще большему уменьшению в зимнем сезоне. Для VH-поляризации отмечаем тренд к понижению значений от весны к лету с некоторым ростом значений осенью и последующим уменьшением значений  $\sigma^0$  в зимний сезон;

- в зимний сезон значения  $\sigma^0$  наименьшие для обеих поляризаций, меняющиеся значительно при значительных перепадах температуры воздуха.

Обнаружена сильная положительная корреляция между значениями  $\sigma^0$  леса и значениями температуры воздуха  $T$ , годовая динамика которой для Москвы за период с 10.03.2015 по 04.03.2016 с временным разрешением 12 дней показана на рис. 3а.

Коэффициент корреляции Пирсона  $r$  равен для VV-поляризации  $r_{VV} = 0.8$  ( $p = 1.16 \times 10^{-7}$ ) и для VH-поляризации  $r_{VH} = 0.66$  ( $p = 7.3 \times 10^{-5}$ ) (доверительный интервал 95%). Вычисления выполнялись с помощью свободно распространяемого пакета AtteStat. Предварительно для выборок проводилась проверка на нормальность распределений и показано, что гипотеза о нормальности не отклоняется. Значение  $r$  для VV-поляризации свидетельствует о сильной положительной связи  $\sigma^0_{VV}$  и  $T$ , а значение уровня  $p$  говорит о высокой статистической значимости связи между переменными. Значение коэффициента Пирсона для VH-поляризации свидетельствует об умеренной положительной связи между переменными с высокой статистической значимостью связи между ними.

Воспользуемся формулой (1) модели MIMICS для интерпретации полученных графиков сезонного изменения  $\sigma^0$  леса. Выше была показана сильная корреляция значений  $\sigma^0$  и температуры воздуха. Из-за отсутствия данных о влажности элементов дерева рассмотрим, как влияет температура воздуха на комплексную диэлектрическую постоянную лесного покрова в модели MIMICS. Для этого рассмотрим функцию  $D2(f, T)$  в формуле (1), вычисляя по этой формуле значения  $\epsilon(T)$  в некоторых условных единицах (усл. ед.)

Реальную и мнимую части  $\epsilon(T)$  для элементов дерева тогда можно представить в следующем виде (Ulaby et al., 1990):

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(\epsilon) &\sim (\epsilon_s - \epsilon_\infty) / (1 + f^2/f_0^2), \\ \operatorname{Im}(\epsilon) &\sim f/f_0 \cdot (\epsilon_s - \epsilon_\infty) / (1 + f^2/f_0^2), \end{aligned} \quad (2)$$

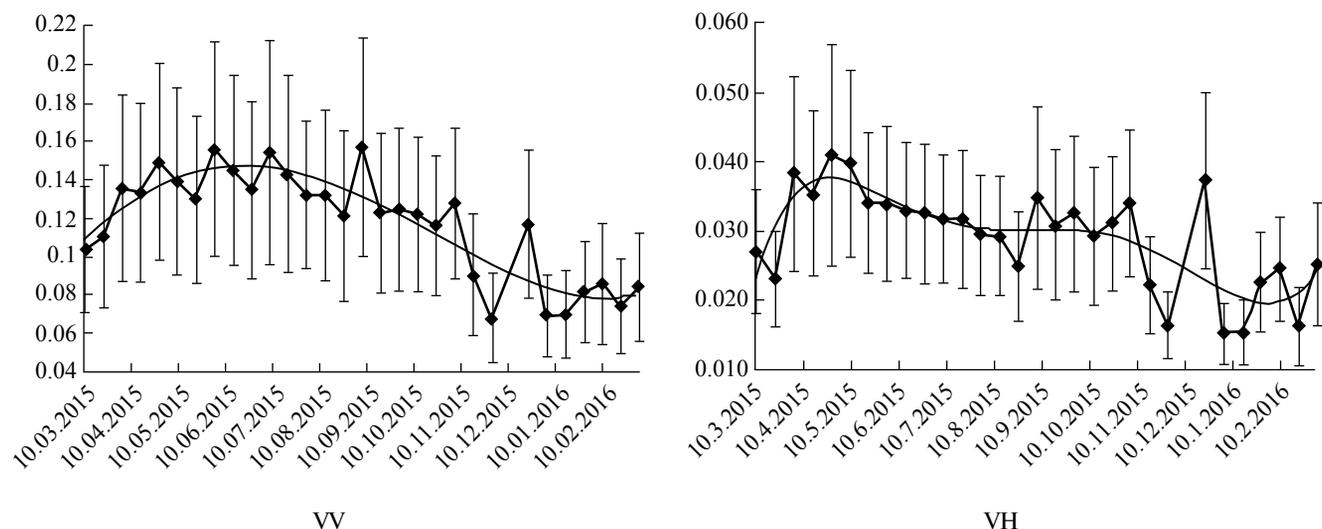


Рис. 2. Графики изменения среднего значения  $\sigma^0$  для выделенного профиля леса за период с 10.03.2015 по 04.03.2016 с временным разрешением 12 дней. Вертикальные линии – значения СКО.

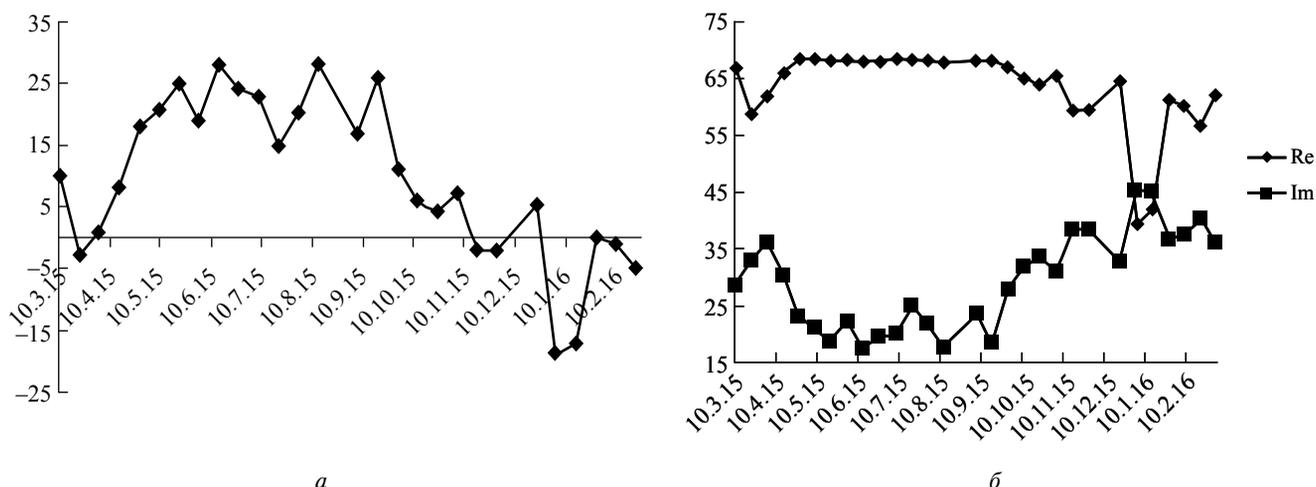


Рис. 3. Изменение температуры в Москве (а) и значения в усл. ед. реальной и мнимой частей диэлектрической проницаемости, зависящей от температуры (б), в модели MIMICS за период с 10.03.2015 по 04.03.2016 с временным разрешением 12 дней.

где  $f = 5.405$  ГГц,  $\epsilon_\infty = 4.9$ ,  $\epsilon_s = 88.045 - 0.4147 \cdot T + 6.295 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 1.075 \cdot 10^{-5} \cdot T^3$ ,  $f_0$  [ГГц] =  $1/(1.1109 \cdot 10^{-1} - 3.824 \cdot 10^{-3} \cdot T + 6.938 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 5.096 \cdot 10^{-7} \cdot T^3)$ .

Графики значений  $\text{Re}(\epsilon)$  и  $\text{Im}(\epsilon)$ , вычисленных по формуле (2) для годового хода температуры в Москве, приведены на рис. 3б в усл. ед. Отметим следующие особенности этих графиков:

– реальная часть диэлектрической проницаемости деревьев в модели MIMICS, зависящая от температуры  $T$ , имеет наибольшие значения летом и осенью, практически не меняясь на протяжении этих двух сезонов. Уменьшение реальной

части  $\epsilon$  отмечается весной и зимой, со значительным уменьшением (порядка на 25 усл. ед.) при значительном перепаде температуры в  $24^\circ$ ;

– мнимая часть диэлектрической проницаемости в модели MIMICS, зависящая от температуры, зеркально повторяет температурный ход, т.е. в зимний период мнимая часть  $\epsilon$  почти в 2 раза превышает значение в летне-осенний период.

Коэффициенты корреляции Пирсона для значений  $\sigma_{VV}^0$  и  $\text{Re}(\epsilon(T))$  и  $\text{Im}(\epsilon(T))$  в модели MIMICS такие:  $r_{\text{Re}} = 0.77$  ( $p = 5.4 \cdot 10^{-7}$ ) – сильная положительная связь и  $r_{\text{Im}} = -0.82$  ( $p = 2.8 \cdot 10^{-8}$ ) – сильная отрицательная связь при высокой статистической значимости.

Зимний сезон 2015–2016 гг. отметился очень теплым декабрем. Так, в день съемки 23.12.2015 температура воздуха составляла  $+5^{\circ}\text{C}$ , а через 12 дней, 04.01.2016, она снизилась до  $-19^{\circ}\text{C}$ . Такой перепад температур отразился на значительном уменьшении среднего значения  $\sigma^0$  для обеих поляризаций при перепаде температуры в  $24^{\circ}\text{C}$ . Среднее значение  $\sigma^0$  уменьшилось для VV-поляризации на  $-2.3$  дБ ( $\sigma_{23.12.15}^0 = -9.3\text{дБ}$ ,  $\sigma_{4.01.2016}^0 = -11.6\text{дБ}$ ) и для VH-поляризации на  $-3.9$  дБ ( $\sigma_{23.12.15}^0 = -14.3\text{дБ}$ ,  $\sigma_{4.01.2016}^0 = -18.2\text{дБ}$ ). При этом в модели MIMICS реальная часть  $\epsilon$ , зависящая от температуры, уменьшилась на 25 усл. ед., а мнимая часть  $\epsilon$  выросла на 12.5 усл. ед., что характеризует увеличение потерь в среде.

Теоретические и полуэмпирические модели рассеяния в С-диапазоне для системы лес–снег–земля в условиях от плотного до открытого бореального леса рассмотрены и обсуждаются в (Koskinen, 2010; Magagi et al., 2002; Arslanet al., 2006).

Интерпретация годового хода изменения  $\sigma^0$  леса через изменения температуры воздуха и связанных с этим изменениями диэлектрической проницаемости деревьев в соответствии с моделью MIMICS, уже на этом первом этапе, когда не рассматривалось влияние влажности как деревьев, так и почвы вследствие отсутствия данных, позволила связать изменение  $\sigma^0$  леса в течение года с изменениями температуры и, благодаря модели MIMICS, с изменениями диэлектрической проницаемости деревьев  $\epsilon$ .

### ВОЗМОЖНОСТЬ ОЦЕНКИ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ ПО РАДАРНЫМ ДАНЫМ SENTINEL 1

Основная цель определения изменений обратного рассеяния от открытой или покрытой растительностью почвы – задача восстановления влажности почвы дистанционными средствами. Много работ посвящено данной проблеме, одним из наиболее полных обзоров по методам восстановления влажности почвы по радарным данным является работа (Walker et al., 2013). Среди методов, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки, такие (Walker et al., 2013): статистические (линейная регрессия), инверсионные (эмпирические, полуэмпирические и теоретические модели), поляриметрические, интерферометрические, методы поиска изменений (CD – change detection), методы с использованием многовременных данных.

В настоящей работе делается попытка оценить значения влажности почвы неиспользуемых земель

в районе г. Фрязино Московской обл. по радарным данным S1 за годичный период 2015–2016 гг. с использованием инверсионных, статистических, поляриметрических методов и многовременных данных.

Исследуемый участок неиспользуемых земель представляет собой вспаханное поле с глубокими бороздами, с невысокой травой летом. На рис. 4 показано одно из радиолокационных изображений (РЛИ) данной территории за 09.02.2016 для VV-поляризации, где белым прямоугольником выделено место с исследуемым полем, показанное в увеличенном масштабе на изображении справа. Угол зондирования равен  $\sim 38^{\circ}$ . На рис. 5 показаны графики изменения среднего значения  $\sigma^0$  по выборке размером около 100 пикселей для выделенного профиля поля (рис. 4, белая линия) за период с 10.03.2015 по 04.03.2016 с временным разрешением 12 дней. Вертикальными линиями на графиках даны отклонения от среднего.

Проведенный корреляционный анализ между парами переменных  $\sigma^0$  и температурой  $T$  показал, что коэффициент корреляции Пирсона  $r_{VV} = 0.55$  ( $p = 0.002$ ) и  $r_{VH} = 0.63$  ( $p = 0.00023$ ), что свидетельствует об умеренной положительной связи между переменными при средней и высокой силе статистической значимости соответственно.

Следует отметить значительное изменение среднего значения  $\sigma^0$  для обеих поляризаций при перепаде температуры в  $24^{\circ}\text{C}$  с 23.12.2015 ( $+5^{\circ}\text{C}$ ) к 04.01.2016 ( $-19^{\circ}\text{C}$ ). Изменение  $\sigma^0$  составляет для VV-поляризации  $-4.1$  дБ ( $\sigma_{23.12.15}^0 = -10.8\text{дБ}$ ,  $\sigma_{4.01.2016}^0 = -14.9\text{дБ}$ ) и для VH-поляризации  $-6.6$  дБ ( $\sigma_{23.12.15}^0 = -16.5\text{дБ}$ ,  $\sigma_{4.01.2016}^0 = -23.9\text{дБ}$ ). Эти изменения почти в 2 раза больше, чем для леса.

Одним из методов по восстановлению влажности почвы по радарным данным в данной работе использовалась полуэмпирическая модель (Dubois et al., 1995). В этой модели коэффициенты обратного рассеяния с согласованной поляризацией (VV и HH) определяются через параметры радара (угол зондирования и частоту) и параметры почвы – диэлектрическую проницаемость и шероховатость поверхности – по системе из двух нелинейных уравнений с двумя неизвестными. Модель справедлива для частот от 1.5 до 11 ГГц, углов зондирования от  $30^{\circ}$  до  $65^{\circ}$  и при удовлетворении условий  $\sigma_{HH}^0/\sigma_{VV}^0 < 1$  и  $\sigma_{VH}^0/\sigma_{VV}^0 < -11$  дБ, в последнем случае для исключения областей с вегетацией. Область применимости уравнений – до значений объемной влажности почвы  $m_v \leq 35\%$  с точностью определения 4.2% и до значений  $ks \leq 2.5$ , с точностью определения 0.4

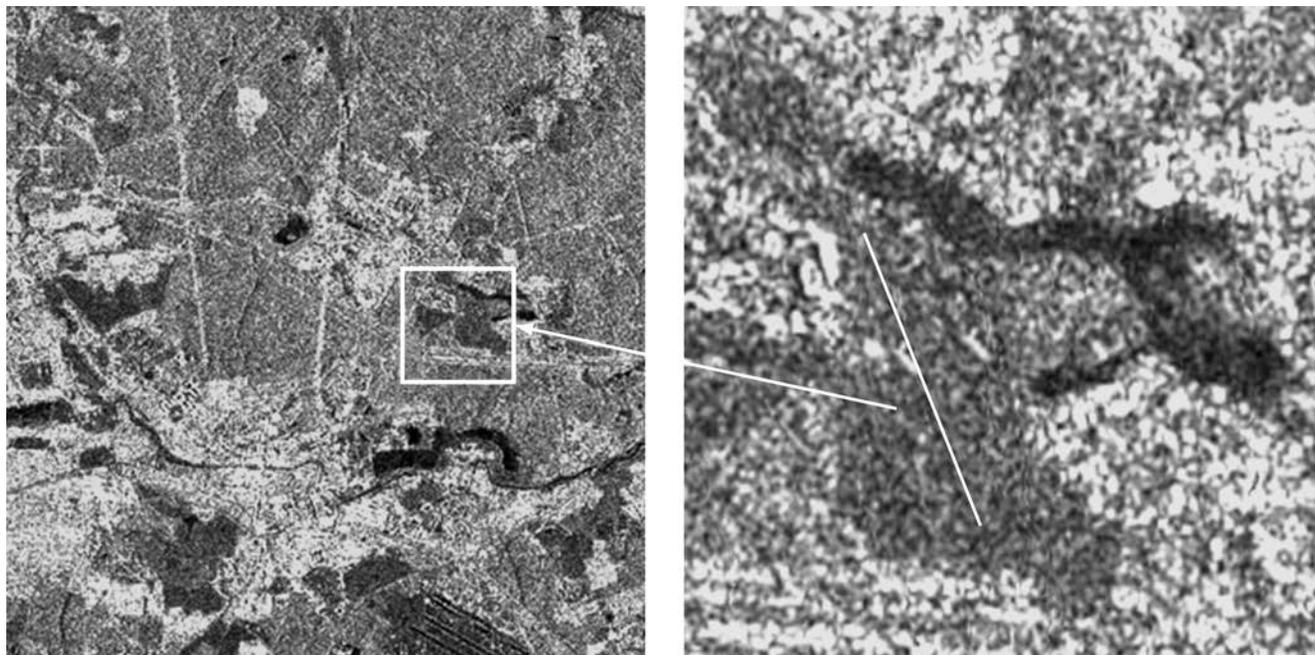


Рис. 4. РЛИ за 09.02.2016 VV-поляризации г. Фрязино и окрестностей (слева); белым прямоугольником выделен исследуемый участок с полем, показанный справа в увеличенном размере.

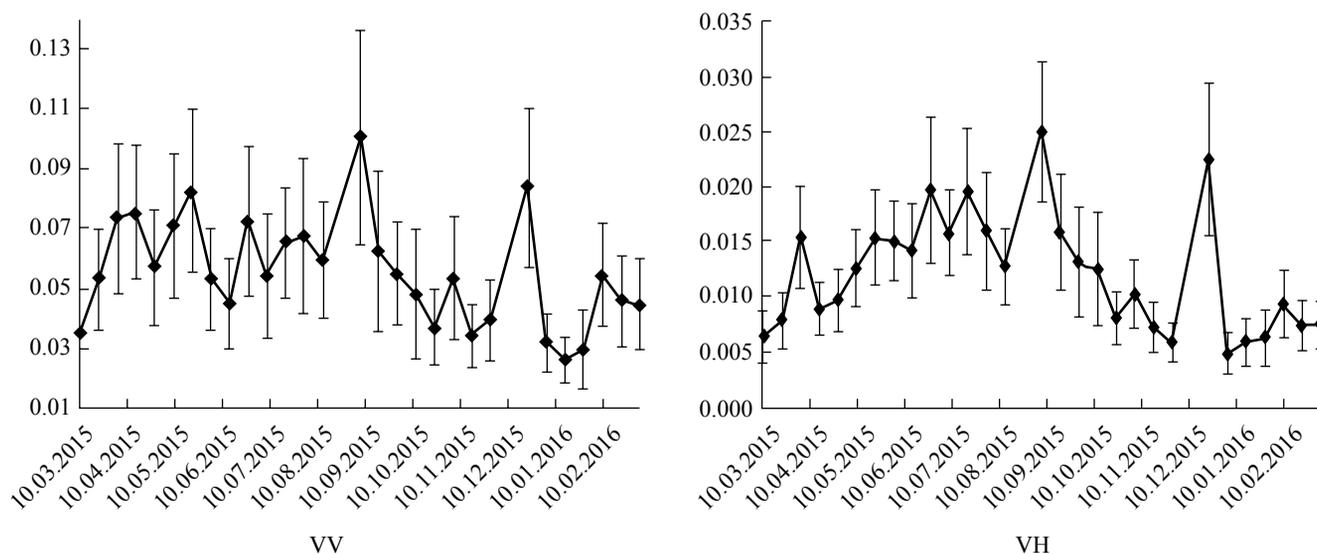


Рис. 5. Графики изменения среднего значения коэффициента обратного рассеяния  $\sigma^0$  для выделенного профиля на поле за период с 10.03.2015 по 04.03.2016 с временным разрешением 12 дней. Вертикальные линии – значения СКО.

для почвы без растительности, где  $ks$  – нормализованная шероховатость поверхности,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $s$  – среднеквадратичное значение шероховатости поверхности.

Для моды IW Sentinel 1 есть только одна согласованная VV-поляризация, и применить можно лишь одно из двух уравнений в модели (Dubois et al., 1995) при двух неизвестных  $\epsilon'$  и  $ks$ , где  $\epsilon'$  – реальная часть диэлектрической проницаемости.

Уравнение для VV-поляризации такое (Dubois et al., 1995):

$$\sigma_{VV}^0 = 10^{-2.37} \cdot \frac{\cos^3 \theta}{\sin^3 \theta} \times 10^{0.046 \cdot \epsilon' \cdot \tan \theta} \cdot (ks \cdot \sin \theta)^{1.1} \cdot \lambda^{0.7}. \quad (3)$$

После инверсии уравнения (3) для диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$  получаем следующее выражение, подставив значения  $\lambda = 5.53$  см и  $\theta = 38^\circ$ :

$$\epsilon' \approx 27.8 \cdot \log_{10} (50.14 \cdot \sigma_{VV}^0 (ks)^{-1.1}). \quad (4)$$

Для двухполяризационного случая в работе (Rao et al., 2013) предлагается неизвестную величину  $ks$  определить, воспользовавшись ее связью с отношением  $\sigma_{VH}^0/\sigma_{VV}^0$ . В работе (Rao et al., 2013) получено регрессионное соотношение, связывающее значение  $s$  с  $\sigma_{VH}^0/\sigma_{VV}^0$  для тестовых участков, где  $s$  менялась от 0.25 до 3 см:  $y = 0.12 \cdot x + 1.85$ , где  $y = s$  (см),  $x = \sigma_{VH}^0/\sigma_{VV}^0$  (дБ),  $R^2 = 0.702$ .

Воспользуемся данной регрессией и подставим ее в формулу (4). Для получения значения объемной влажности почвы  $m_v$  используют регрессионные соотношения, связывающие  $\epsilon'$  и  $m_v$  (Торр et al., 1980; Миронов и др., 2015). В соответствии с регрессией получаем для  $m_v$  следующее полиномиальное соотношение:

$$m_v = -5.3 \cdot 10^{-2} + 2.92 \cdot 10^{-2} \cdot \epsilon' - 5.5 \cdot 10^{-4} \cdot \epsilon'^2 + 4.3 \cdot 10^{-6} \cdot \epsilon'^3. \quad (5)$$

Результат показан на рис. 6. Следует отметить, что только первые два члена в соотношении (5) являются значимыми для определения  $m_v$  по значениям  $\epsilon'$ .

Авторы работы (Rao et al., 2013) отмечают, что корреляция между  $S$  и  $\sigma_{VH}^0/\sigma_{VV}^0$  хорошая только в период начального роста вегетации, т.е. регрессионным соотношением можно пользоваться только в ограниченный период (так, на рис. 6 для зимнего периода значения  $m_v$  стали отрицательными). Кроме того, условие  $\sigma_{VH}^0/\sigma_{VV}^0 < -11$  дБ для рассматриваемого профиля не выполняется ни для одного из сеансов съемки, т.е. пользоваться моделью (Dubois et al., 1995) в данном случае неправомерно.

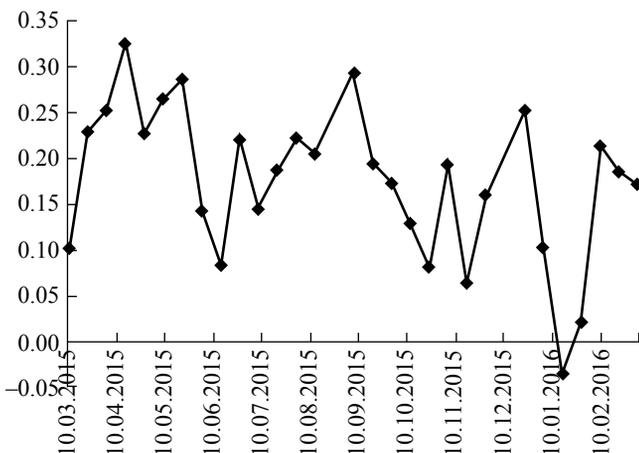


Рис. 6. Оценка сезонных изменений среднего значения объемной влажности почвы на профиле.

Еще одним вариантом оценки значения  $m_v$  может стать предложенная в работе (Van Doninck et al., 2012) модель для получения временной динамики изменений индекса относительной влажности поверхности почвы на базе многовременных данных, адаптированная для ASAR. В этой работе (Van Doninck et al., 2012) используются понятия обратного рассеяния в сухих  $\sigma_{dry}^0$  и влажных  $\sigma_{wet}^0$  условиях, причем в первом случае  $\sigma_{dry}^0$  определяется как среднее значение 5% всех  $\sigma^0$  во временной серии с наименьшими значениями, а  $\sigma_{wet}^0$  соответственно с наибольшими значениями. Обозначая далее через  $S = \sigma_{wet}^0 - \sigma_{dry}^0$ , авторы определяют индекс относительной влажности поверхности почвы для ASAR по формуле  $\Theta = (\sigma^0 - \sigma_{dry}^0)/S$ , рассматривая  $S$  или как константу для всей временной серии, или меняющуюся по сезонам. Это линейная зависимость от  $\sigma^0$ , и потому  $m_v$  будет повторять временной ход  $\sigma^0$ .

#### Обратное рассеяние от покрытой снегом поверхности

Описание обратного рассеяния сигнала от поверхностей, покрытых снегом, дано в моделях рассеяния, которые подтверждены экспериментальными результатами (Ulaby, 1986; Fung, 1994). По этим моделям сигнал от покрытой снегом поверхности состоит из вклада поверхностного рассеяния на границе воздух–снег, объемного рассеяния слоем снега, поверхностного рассеяния на границе снег–земля, ослабленного снежным слоем.

В зависимости от содержания жидкой воды снег рассматривается как сухой или как мокрый. Первый определяется как снег, состоящий из кристаллов льда в воздухе, при температурах ниже 0°C. Мокрый снег обнаруживается в сезон таяния, когда температура достигает 0°C, и снег содержит определенное количество жидкой воды, определяемое через процентное содержание, называемое влажностью  $w$  (Besic et al., 2012).

Эти два типа снега по своим диэлектрическим свойствам ведут себя как два совершенно разных материала из-за содержания мокрым снегом жидкой воды, диэлектрическая постоянная  $\epsilon$  которой значительно отличается от  $\epsilon$  льда.

Покрытие сухим снегом определяется  $\epsilon$ , которая является функцией только плотности сухого снега  $\rho_{ds}$  (Gareth Rees, 2006):

$$\epsilon'_{ds} = 1 + 1.9\rho_{ds} = 1 + 1.9\rho_{ice}f_{ice},$$

где  $\rho_{ds}$  зависит от объема фракции льда ( $f_{ice}$ ), а  $\rho_{ice}$  имеет значение 917 кг/м<sup>3</sup>. Диэлектрическая проницаемость сухого снега является чисто реальной

величиной, показывающей отсутствие диэлектрических потерь в среде.

С другой стороны,  $\epsilon$  мокрого снега является комплексной величиной, функцией объема фракции льда ( $f_{ice}$ ), влажности ( $w$ ) и частоты ( $f$ ):  $\epsilon_{ws} = \epsilon'_{ws} + j\epsilon''_{ws}$ .

Для частотного диапазона 3–15 ГГц действительная и мнимая части  $\epsilon$  определяются следующими выражениями (Gareth Rees, 2006):

$$\epsilon'_{ws} = 1 + 1.83\rho_{ds} + 0.02w^{1.105} + \frac{0.073w^{1.31}}{1 + a^2},$$

$$\epsilon''_{ws} = \frac{0.073 \cdot a \cdot w^{1.31}}{1 + a^2}, \quad a = f/9.07.$$

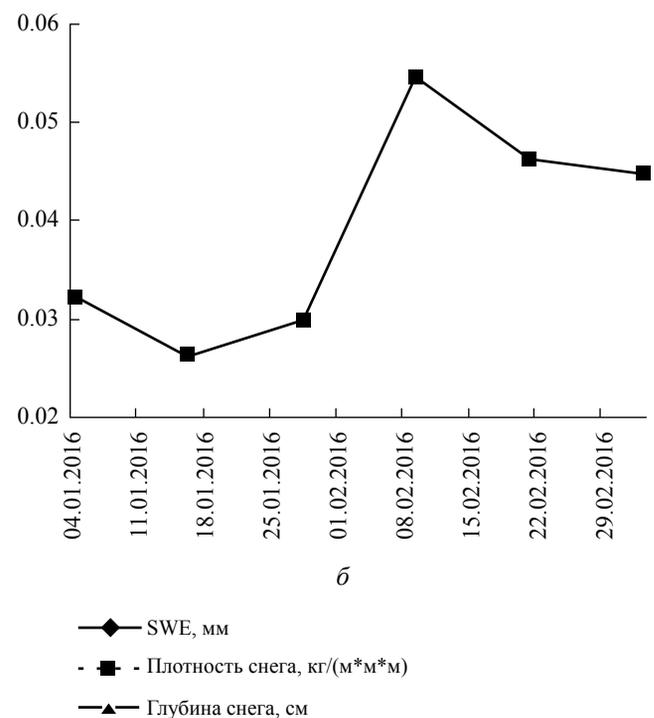
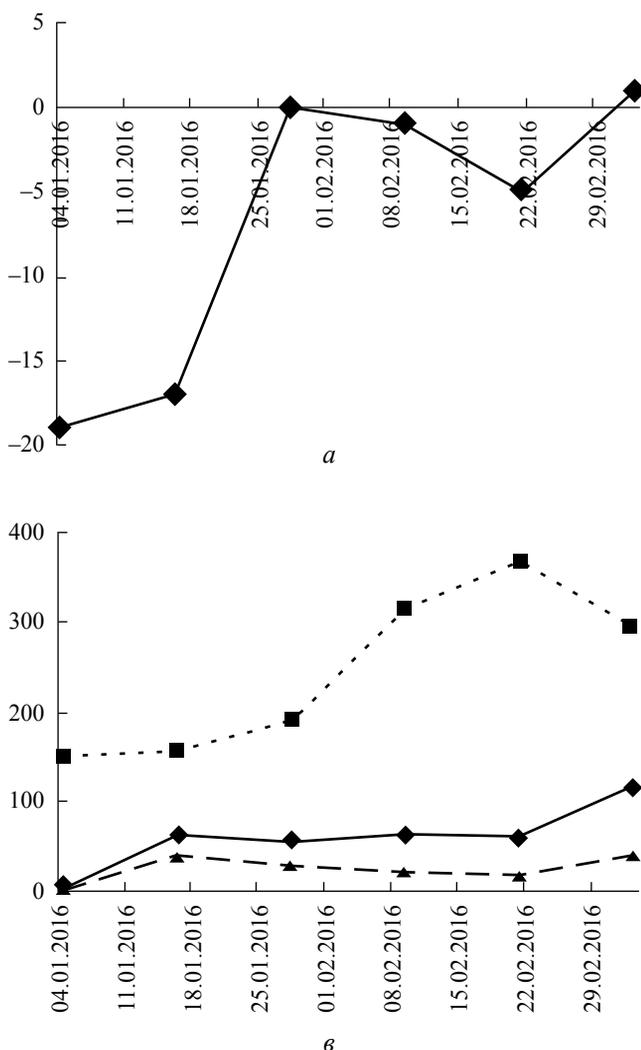
В отличие от сухого снега  $\epsilon$  мокрого снега является комплексной величиной, имеет мнимую часть, показывающую присутствие поглощения в среде.

Эта разница указывает на различие в механизмах обратного рассеяния для двух типов снега.

Сухой снег почти прозрачен в микроволновом диапазоне э/м спектра (Mätzler, 1996; Rott, Mätzler, 1987). В противоположность этому мокрый снег с содержанием жидкой воды даже меньше 1% имеет значительное влияние на проникаемость снежного покрова. Увеличение поглощения приводит к существенному уменьшению  $\sigma^0$  (Mätzler, 1987).

*Оценка параметров снежного покрытия*

В областях, покрытых снегом, основными снежными параметрами являются эквивалентный слой воды (SWE – snow water equivalent) и площадь покрытия снегом (SCA – snow cover area). SWE определяется как количество воды, содержащейся в снежной массе, т.е. толщина слоя воды, которая получится, если растопить всю снежную массу мгновенно (Salcedo, 2010).



◆ SWE, мм  
 -■- Плотность снега, кг/(м\*м\*м)  
 —▲— Глубина снега, см

Рис. 7. а – Ход температуры в градусах зимой 2016 г.; б –  $\sigma^0$  для VV-поляризации; в – толщина слоя снега на поле в см, плотность снега в кг/м<sup>3</sup>, SWE в мм.

$SWE$  (кг/м<sup>2</sup>) = толщина слоя снега (м) × плотность снега (кг/м<sup>3</sup>),

$SWE$  (м) = толщина слоя снега (м) × плотность снега (кг/м<sup>3</sup>) / плотность воды (кг/м<sup>3</sup>), при плотности воды 1000 кг/м<sup>3</sup>.

Зима сезона 2015–2016 гг. в Подмоскowie от- личалась аномально теплым декабрем. На дан- ную территорию в декабре был только один сеанс съемки Sentinel 1 от 23.12.2015, когда температура равнялась +5°C, и снег на поле полностью растаял. Снежное покрытие поля наблюдалось в следующих шести сеансах съемки S1 с 04.01.2016 по 04.03.2016. На рис. 7 приведены графики изменения темпе- ратуры, коэффициента обратного рассеяния  $\sigma^0$  для VV-поляризации, а также измеренная толщи- на слоя снега в см и подсчитанная плотность снега в кг/м<sup>3</sup> и SWE в мм за этот период времени с вре- менным разрешением в 12 дней. Следует отметить значительное увеличение  $\sigma^0$  на 2.6 дБ 09.02.2016 (сухой снег,  $t = -1^\circ\text{C}$ ) относительно соседнего дня съемки 28.01.2016 (мокрый снег,  $t = 0^\circ\text{C}$ ). Мокрый снег имеет очень малое  $\sigma^0$ , поскольку он непро- зрачен из-за высокого коэффициента поглоще- ния воды, что доказано экспериментально и путем моделирования (Pettinato et al., 2004; Nagler, Rott, 2000). Для сухого снега отмечаем уменьшение зна- чения  $\sigma^0_{VV}$  на 0.9 дБ при увеличении толщины слоя снега с 2 см 04.01.2016 ( $t = -19^\circ\text{C}$ ) до 40 см 16.01.2016 ( $t = -17^\circ\text{C}$ ), что согласуется с работой (Tadono et al., 2001), где показано, что  $\sigma^0$  уменьшается с увеличе- нием толщины слоя сухого снега вплоть до 60 см для модели и до 80 см для измеренных данных при разных снежных условиях. После этого порогового значения никаких изменений  $\sigma^0$  с толщиной слоя снега не происходит.

Что касается определения площади покрытия снегом, то значительный контраст между мокрым и сухим снегом позволяет описывать области, по- крытые мокрым снегом, используя опорное изо- бражение без снега или с сухим снегом.

Для картирования мокрого снега авторы (Nagler, Rott, 2000) применяют метод поиска изменений CD – отношение изображений для исключения влияния топографии. Низкое значение  $\sigma^0$  тающего снега в сравнении с опорными изображениями (ОИ) является основой для классификации.

Модельные вычисления показывают, что для обратного рассеяния от границы снег–земля до- минировать сигнал от земли, покрытой сухим сне- гом. Следовательно, изображения зимние с сухим снегом так же, как и летние изображения без снега, могут быть взяты как ОИ. Уменьшение  $\sigma^0$  весной относительно ОИ является ясной индикацией тая- ния снега.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе получен ход во времени коэф- фициента обратного рассеяния от леса и поверх- ности почвы в Подмоскowie за период с 10 марта 2015 г. по 4 марта 2016 г. по 29 сеансам открытых данных Sentinel 1 в С-диапазоне для VV- и VH-по- ляризации. Обнаружена сильная положительная корреляция между значениями  $\sigma^0$  леса и значения- ми температуры воздуха  $T$ . Коэффициент корреля- ции Пирсона  $r$  равен для VV-поляризации  $r_{VV} = 0.8$  и для VH-поляризации  $r_{VH} = 0.66$  при высокой ста- тистической значимости связи между переменны- ми. Коэффициент корреляции Пирсона  $r$  между парами переменных  $\sigma^0$  поля и температурой  $T$  по- казал, что  $r_{VV} = 0.55$  и  $r_{VH} = 0.63$ , что свидетельствует об умеренной положительной связи между пере- менными при средней и высокой силе статистиче- ской значимости соответственно. Интерпретация полученных данных осуществлялась на основе мо- дельных формул (Ulaby et al., 1990) изменения ди- электрической проницаемости элементов лесного покрова и формул (Dubois et al., 1995) изменения диэлектрической проницаемости почвы. Благодаря модели MIMICS удалось связать изменение  $\sigma^0$  леса в течение года с изменениями диэлектрической проницаемости деревьев  $\epsilon$  в той ее части, которая зависит от температуры. Сделана попытка оценить значения влажности почвы неиспользуемых земель в районе г. Фрязино Московской обл. по радарным данным S1 за годичный период 2015–2016 гг. Вос- становление влажности почвы по одному уравне- нию (Dubois et al., 1995) для VV-поляризации и ре- грессии (Rao et al., 2013) возможно при соблюде- нии ряда условий. Для снежного периода показано изменение во времени значений эквивалентного слоя воды для исследуемого участка поля.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Калинкевич А.А., Крылова М.С., Масюк В.М., Каковки- на А.Ю., Хромец Е.А. Об опыте измерения диэлектри- ческой проницаемости “живой” древесины // Сб. тр. III Всер. конф. “Сверхширокополосные сигналы в ради- олокации и связи”. Муром, 26.06–01.07.2010 г. (электр.) С. 169–174.
- Миронов В.Л., Косолапова Л.Г., Савин И.В. Диэлектри- ческая модель талой и мерзлой органической почвы на частоте радиометра AMSR // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 5. С. 9–15.
- Национальные парки России. М.: Центр охраны дикой природы, 1996.
- Arslan A.N., Pulliainen J., Hallikainen M. Observations of L- band and C-band backscatter and a semi-empirical backscat-

- tering model approach from a forest-snow-ground system // *Prog. Electromagn. Res.* 2006. V. 56. P. 263–281.
- Besic N., Vasile G., Chanussot J., Stankovic S., Ovarlez J.-P., D'Urso G., Boldo D., Dedieu J.-P.* Stochastically based wet snow mapping with SAR data // *IEEE Int. GRS Symp. (IGARSS' 2012)*. July 2012. Munich, Germany. 2012. P. 4859–4862.
- Bourgeau-Chavez L.L., Kasischke E.S., Rutherford M.D.* Evaluation of ERS SAR data for prediction of fire danger in a boreal region // *Int. J. of Wildland Fire*. 1999. V. 9. № 3. P. 183–194.
- Dubois P.C., van Zyl J.J., Engman T.* Measuring soil moisture with imaging radars // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 1995. V. 33. № 4. P. 916–926.
- Fung A.K.* Comparison of model predictions with backscattering and emission measurements from snow and ice // *Microwave Scattering and Emission Models and their applications*, 1st ed. Artech House Publ.: Boston, MA, USA, 1994. P. 425–450.
- Gareth Rees W.* Remote sensing of snow and ice. 2nd ed. CRC Press, Taylor and Francis Group: 2006.
- Koskinen J.T., Pulliainen J.T., Luojus K.P., Takala M.* Monitoring of snow-cover properties during the spring melting period in forested areas // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 2010. V. 48. P. 50–58.
- Magagi R., Bernier M., Bouchard M.C.* Use of ground observations to simulate the seasonal changes in the backscattering coefficient of the subarctic forest // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 2002. V. 40. P. 281–297.
- Mätzler C.* Applications of the interaction of microwaves with the natural snow cover // *Rem. Sens. Rev.* 1987. V. 2. P. 259–387.
- Mätzler C.* Microwave permittivity of dry snow // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 1996. V. 34. № 2. P. 573–581.
- Nagler T., Rott H.* Retrieval of wet snow by means of multi-temporal SAR data // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 2000. V. 38. № 2. P. 754–765.
- Pettinato S., Poggi P., Macelloni G., Paloscia S., Pampaloni P., Crepaz A.* Mapping snow cover in Alpine areas with ENVISAT/SAR images // *Proc. Envisat and ERS Symp.* September 6–10. Salzburg, Austria, 2004.
- Rao S.S., Kumar S.D., Das S.N., Nagaraju M.S.S., Venugopal N.V., Rajankar P., Laghate P., Reddy M.S., Joshi A.K., Sharma J.R.* Modified Dubois model for estimating soil moisture with dual polarized SAR data // *J. Indian Soc. Rem. Sens.* December 2013. V. 41. № 4. P. 865–872. doi: 10.1007/s12524-013-0274-3.
- Rignot E., Way J.B., McDonald K., Vierck L., Williams C., Adams P., Payne C., Wood W., Shi J.* Monitoring of environmental conditions in taiga forests using ERS-1 SAR // *Rem. Sens. Env.* 1994. V. 49. P. 145–154.
- Rott H., Mätzler C.* Possibilities and limits of synthetic aperture radar for snow and glacier surveying // *Annal. Glaciol.* 1987. V. 9. P. 195–199.
- Rykhus R., Lu Z.* Monitoring a boreal wildfire using multi-temporal Radarsat-1 intensity and coherence images // *Geomatics, Nat. Hazards and Risk*. March 2011. V. 2. № 1. P. 15–32.
- Salcedo A.P.* Estimation of snow parameters (SWE and SCA) and sea ice monitoring using SAR data. 2010. [http://aulavirtual.ig.conae.gov.ar/moodle/pluginfile.php/513/mod\\_page/content/71/Seminario\\_final\\_Salcedo.pdf](http://aulavirtual.ig.conae.gov.ar/moodle/pluginfile.php/513/mod_page/content/71/Seminario_final_Salcedo.pdf)
- Tadono T., Fukami K., Shi J.* Estimation of snow hydrological parameters using single-parameter, multi-temporal SAR images // *Geosci. Rem. Sens. Symp. IGARSS '01*. 2001.
- Thiel Ch., Thiel Ca., Reiche J., Leiterer R., Schmillius C.* Analysis of ASAR and PALSAR data for optimising forest cover mapping – A GSE forest monitoring study // *Conf. ForestSat2007*, Montpellier (F), 5 November – 7 November 2007.
- Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P.* Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines // *Water Resour. Res.* 1980. V. 16. № 3. P. 574–582.
- Ulaby F.T., Moore R.K., Fung A.K.* Active microwave sensing of land. In *Microwave Remote Sensing, Active and Passive: From Theory to Applications*. Artech House Publ.: Boston, MA, USA, 1986. P. 1797–1982.
- Ulaby F.T., Sarabandi K., McDonald K., Whitt M., Dobson D.C.* Michigan microwave canopy scattering model // *Int. J. Rem. Sens.* 1990. V. 11. P. 1223–1254.
- Van Doninck J., Peters J., Lievens H., De Baets B., Verhoest N.E.C.* Accounting for seasonality in a soil moisture change detection algorithm for ASAR Wide Swath time series // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2012. V. 16. P. 773–786. doi: 10.5194/hess-16-773-2012.
- Walker J.P., Panciera R., Moneris A.* Basis of an Australian radar soil moisture algorithm theoretical baseline document. Monash Univ., Melbourne, 2013. [http://users.monash.edu.au/~jpwalker/reports/GARADA\\_Deliverable%20232.pdf](http://users.monash.edu.au/~jpwalker/reports/GARADA_Deliverable%20232.pdf)
- Wegmüller U.* The effect of freezing and thawing on the microwave signatures of bare soil // *Rem. Sens. Env.* 1990. V. 33. P. 123–135.

## Seasonal Variations of Backscattering from the Natural Surfaces of the Moscow Region in the 2015–2016 Season by the Sentinel 1A Radar Data

N. V. Rodionova

*Institute of Radioengineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, Fryazino, Moscow Region*

The paper considers the seasonal changes of the backscattering coefficient from the forest cover and unused land in the Moscow region by the use of 29 radar images of Sentinel 1A in C-band from 10 March 2015 to 4 March 2016. Interpretation of the obtained data is carried out based on the MIMICS model of the dielectric constant of the forest cover elements and the Dubois et al. model of the soil dielectric constant. It was found a strong positive correlation between the seasonal forest backscattering coefficient change and the air temperature. Thanks to the MIMICS model the forest backscatter changes have been linked with changes in the dielectric constant of the trees in part dependent on the temperature. An attempt is made to estimate the soil moisture values of unused land in the Fryazino town of Moscow region for the year 2015–2016. The restoration of soil moisture by using of one equation of Dubois et al., 1995 and regression equation of Rao et al., 2013 is possible only under certain conditions. For the snow season it was shown the time variation of the snow water equivalent for the studied area.

**Keywords:** radar image, multi-temporal data, the backscatter coefficient, dielectric permittivity, soil moisture, air temperature, Pearson correlation coefficient

### REFERENCES

- Kalinkevich A.A., Krylova M.S., Masyuk V.M., Kakovkina A.Yu., Khromets E.A.* Ob opyte izmerenija dijelektricheskoy pronicaemosti "zhivoj" drevesiny (On the experience of living wood permittivity measurement) // Proc. of III All-Russian Conference "Ultra-wideband signals in radiolocation and communication" Murom, 26.06–01.07.2010 (digital) P. 169–174.
- Mironov V.L., Kosolapova L.G., Savin I.V.* Dijelektricheskaja model' taloj i merzloj organicheskoy pochvy na chastote radiometra AMSR (Dielectric Model of Thawed and Frozen Organic Soil at the Frequency of AMSR Radiometer) // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2015. No. 5. P. 9–15.
- Nacional'nye parki Rossii (National parks in Russia). Moscow: BCC press, 1996.
- Arslan A.N., Pulliainen J., Hallikainen M.* Observations of L-band and C-band backscatter and a semi-empirical backscattering model approach from a forest-snow-ground system // *Prog. Electromagn. Res.* 2006. V. 56. P. 263–281.
- Besic N., Vasile G., Chanussot J., Stankovic S., Ovarlez J.-P., D'Urso G., Boldo D., Dedieu J.-P.* Stochastically based wet snow mapping with SAR data // *IEEE Int. GRS Symp. (IGARSS' 2012)*. July 2012. Munich, Germany. 2012. P. 4859–4862.
- Bourgeau-Chavez L.L., Kasischke E.S., Rutherford M.D.* Evaluation of ERS SAR data for prediction of fire danger in a boreal region // *Int. J. of Wildland Fire*. 1999. V. 9. № 3. P. 183–194.
- Dubois P.C., van Zyl J.J., Engman T.* Measuring soil moisture with imaging radars // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 1995. V. 33. № 4. P. 916–926.
- Fung A.K.* Comparison of model predictions with backscattering and emission measurements from snow and ice // *Microwave Scattering and Emission Models and their applications*, 1st ed. Boston, MA, USA: Artech House Publ., 1994. P. 425–450.
- Gareth Rees W.* Remote sensing of snow and ice. 2nd ed. CRC Press, Taylor and Francis Group: 2006.
- Koskinen J.T., Pulliainen J.T., Luojus K.P., Takala M.* Monitoring of snow-cover properties during the spring melting period in forested areas // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 2010. V. 48. P. 50–58.
- Magagi R., Bernier M., Bouchard M.C.* Use of ground observations to simulate the seasonal changes in the backscattering coefficient of the subarctic forest // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 2002. V. 40. P. 281–297.
- Mätzler C.* Applications of the interaction of microwaves with the natural snow cover // *Rem. Sens. Rev.* 1987. V. 2. P. 259–387.
- Mätzler C.* Microwave permittivity of dry snow // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 1996. V. 34. № 2. P. 573–581.
- Nagler T., Rott H.* Retrieval of wet snow by means of multi-temporal SAR data // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 2000. V. 38. № 2. P. 754–765.
- Pettinato S., Poggi P., Macelloni G., Paloscia S., Pampaloni P., Crepaz A.* Mapping snow cover in Alpine areas with ENVISAT/SAR images // *Proc. Envisat and ERS Symp.* September 6–10. Salzburg, Austria, 2004.
- Rao S.S., Kumar S.D., Das S.N., Nagaraju M.S.S., Venugopal N.V., Rajankar P., Laghate P., Reddy M.S., Joshi A.K., Sharma J.R.* Modified Dubois model for estimating soil moisture with dual polarized SAR data // *J. Indian Soc. Rem. Sens.* December 2013. V. 41. № 4. P. 865–872. doi: 10.1007/s12524-013-0274-3.
- Rignot E., Way J.B., McDonald K., Vierck L., Williams C., Adams P., Payne C., Wood W., Shi J.* Monitoring of environmental

- conditions in taiga forests using ERS-1 SAR // *Rem. Sens. Env.* 1994. V. 49. P. 145–154.
- Rott H., Mätzler C.* Possibilities and limits of synthetic aperture radar for snow and glacier surveying // *Annal. Glaciol.* 1987. V. 9. P. 195–199.
- Rykhus R., Lu Z.* Monitoring a boreal wildfire using multi-temporal Radarsat-1 intensity and coherence images // *Geomatics, Nat. Hazards and Risk.* March 2011. V. 2. № 1. P. 15–32.
- Salcedo A.P.* Estimation of snow parameters (SWE and SCA) and sea ice monitoring using SAR data. 2010. [http://aulavirtual.ig.conae.gov.ar/moodle/pluginfile.php/513/mod\\_page/content/71/Seminario\\_final\\_Salcedo.pdf](http://aulavirtual.ig.conae.gov.ar/moodle/pluginfile.php/513/mod_page/content/71/Seminario_final_Salcedo.pdf)
- Tadono T., Fukami K., Shi J.* Estimation of snow hydrological parameters using single-parameter, multi-temporal SAR images // *Geosci. Rem. Sens. Symp. IGARSS '01.* 2001.
- Thiel Ch., Thiel Ca., Reiche J., Leiterer R., Schmullius C.* Analysis of ASAR and PALSAR data for optimising forest cover mapping – A GSE forest monitoring study // *Conf. ForestSat2007, Montpellier (F), 5 November – 7 November 2007.*
- Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P.* Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines // *Water Resour. Res.* 1980. V. 16. № 3. P. 574–582.
- Ulaby F.T., Moore R.K., Fung A.K.* Active microwave sensing of land // *Microwave Remote Sensing, Active and Passive: From Theory to Applications.* Artech House Publ.: Boston, MA, USA, 1986. P. 1797–1982.
- Ulaby F.T., Sarabandi K., McDonald K., Whitt M., Dobson D.C.* Michigan microwave canopy scattering model // *Int. J. Rem. Sens.* 1990. V. 11. P. 1223–1254.
- Van Doninck J., Peters J., Lievens H., De Baets B., Verhoest N.E.C.* Accounting for seasonality in a soil moisture change detection algorithm for ASAR Wide Swath time series // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2012. V. 16. P. 773–786. doi: 10.5194/hess-16-773-2012.
- Walker J.P., Panciera R., Moneris A.* Basis of an Australian radar soil moisture algorithm theoretical baseline document. Monash Univ., Melbourne, 2013. [http://users.monash.edu.au/~jpwalker/reports/GARADA\\_Deliverable%232.pdf](http://users.monash.edu.au/~jpwalker/reports/GARADA_Deliverable%232.pdf)
- Wegmüller U.* The effect of freezing and thawing on the microwave signatures of bare soil // *Rem. Sens. Env.* 1990. V. 33. P. 123–135.