



**СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ОТ
ЕСТЕСТВЕННЫХ ПОКРОВОВ ПОДМОСКОВЬЯ В
СЕЗОН 2015-2016 ГОДОВ ПО РАДАРНЫМ ДАННЫМ
SENTINEL 1A**

**Родионова Н.В.
(ФирЭ им. В.А.Котельникова РАН)**

**XIV Открытая Всероссийская конференция “Современные
проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”
14- 18 ноября 2016 г., ИКИ РАН**



ВВЕДЕНИЕ



Радарные данные, начиная с 1991 года, доступны на непрерывной основе (большой частью коммерческой) от разных сенсоров (ERS-1,2, JERS, SIR-C/X-SAR, RADARSAT-I, II, ENVISAT-ASAR, ALOS-PALSAR и другие). Запуск 3 апреля 2014 года 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 года. 25 апреля 2016 года состоялся запуск Sentinel 1B, что позволяет сократить время между повторными съемками исследуемых территорий до 6 дней.

Обратное рассеяние от поверхности определяется ее диэлектрической проницаемостью, шероховатостью и растительностью.

Информация о диэлектрической проницаемости поверхности, и соответственно, влажности, играет важную роль в численном предсказании погоды, наводнений, сельском хозяйстве, контроль за парниковыми газами и т.д.

В работе рассмотрены вопросы изменения во времени коэффициента обратного рассеяния (КОР) от лесных покровов и неиспользуемых земель на территории Подмосковья за годичный период 2015-2016 годов по 29 сеансам съемки Sentinel 1A с 10 марта 2015 года по 4 марта 2016 года. Использовалась IW (interferometric wide swath) мода S1 с поляризациями (VV+VH) и пространственным разрешением 20 м.

Основной целью данной работы является получение информации о диэлектрической проницаемости поверхности, используя радарные данные S1 и существующие модели, связывающие обратное рассеяние с параметрами поверхности.



Сезонные изменения коэффициента обратного рассеяния (КОР) леса

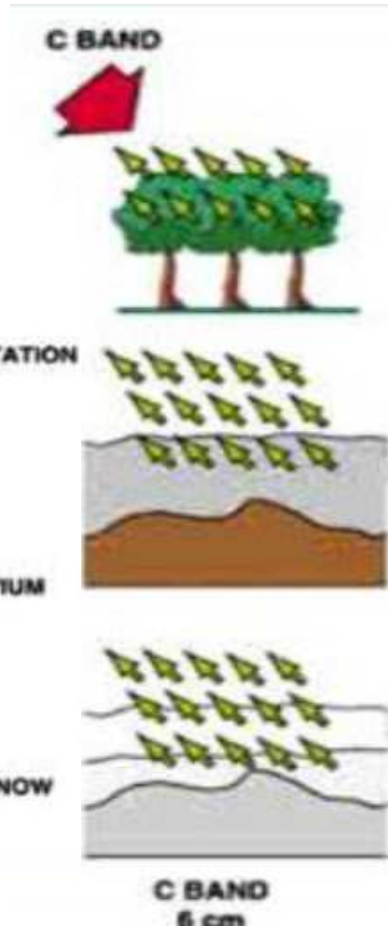


- Одними из первых для измерения сезонных вариаций обратного отражения леса в С-диапазоне были использованы радарные данные ERS-1 (VV поляризация, угол зондирования 23°) (Rignot et al., 1994). Исследовалось обратное отражение от таежных лесов Аляски между августом и декабрем 1991 года с временным разрешением в 3 дня. Одновременно измерялась 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 коэффициента обратного рассеяния 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 годов). В работе (Thiel et al., 2007) использовались данные ENVISAT ASAR для исследования тайги в Иркутской области.



Особенности радарного обратного рассеяния от леса в С-диапазоне



Обратное рассеяние радарного сигнала от леса формируется, в основном, за счет двух путей рассеяния: прямого отражения от элементов дерева и переотражения ствол - подстилающая поверхность.

Обратное радарное рассеяние от леса определяется не только объемный рассеянием от лесного покрова, но также от подстилающей поверхности, поскольку при наклонном угле падения волна проникает через лесной покров и достигает поверхности земли.

- Вычисления относительной величины вклада в обратное рассеяние от различных путей рассеяния показывают, что прямое рассеяние от земли важно в негустом открытом лесном покрове и для случаев замерзшего покрова. Взаимодействие ствол-земля доминирует, когда почва и растительность влажные. Очевидно, что рассеяние от кроны доминирует в присутствии листьев, когда почва и растения влажные, тогда как рассеяние от подстилающей поверхности доминирует в отсутствие листьев, когда почва и растения сухие или замерзшие.

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).

Появление снега сопровождается уменьшением σ^0 , что предполагает значительное уменьшение диэлектрических свойств почвы и растительности при замерзании. При глубине снега больше 10 см σ^0 растет со временем. Суровое замерзание, как ожидается, стабилизирует σ^0 от леса, потому, что почти вся жидкая вода внутри почвы и растений замерзла, и диэлектрическая постоянная их достигает минимума (low minimum). Свежий выпавший снег оказывает слабое влияние на σ^0 , он почти прозрачен для сигнала радара.



Исследуемая территория - Парк Лосиный Остров



Лосиный Остров - один из первых национальных парков в России (создан в 1983 году), 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% лесопокрытой площади. В целом леса с доминированием сосны занимают 21% лесопокрытой площади, ели— 15%, лиственницы— более 1%, березы— 45%, липы — 12%, дуба— около 3% (Справочник "Национальные парки России". Москва: Изд-во Центра охраны дикой природы, 1996 г.).

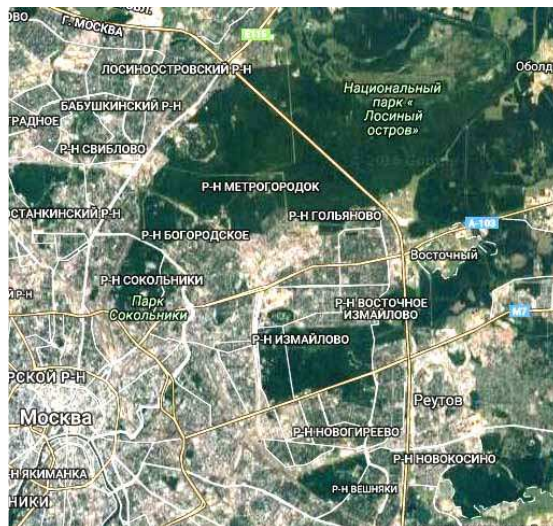
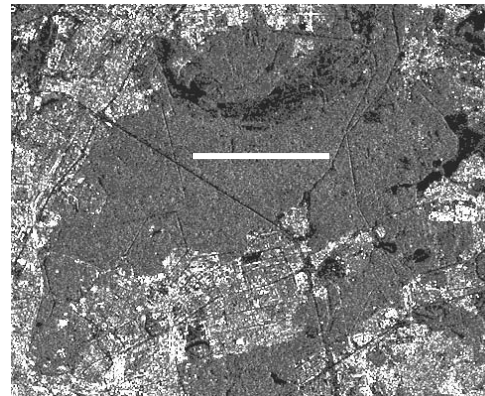
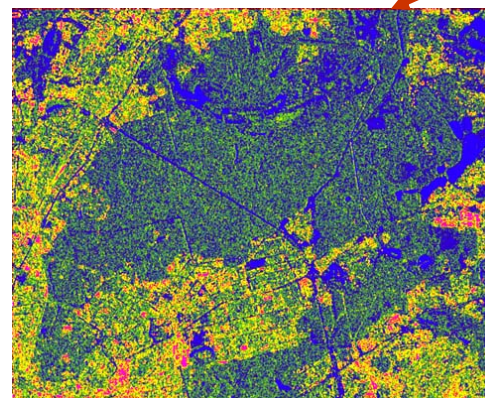


Рис. 1. Google map



VV



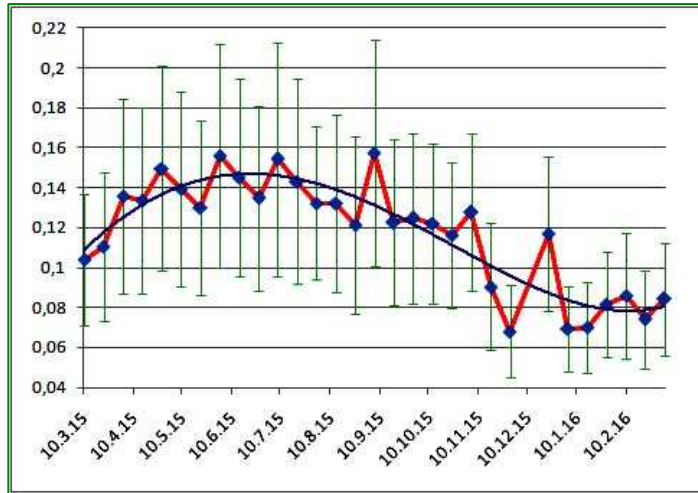
Одно из 29 сеансов съемки - радарное изображение Sentinel 1A после калибровки за 8 июля 2015 года. Угол зондирования равен $\sim 39^\circ$. Размеры изображения 1955*1589 пикселей.

Текстурное изображение в кодировке RGB: красный цвет - 'контраст', зеленый - 'энтропия' и синий - 'второй обратный момент' (Haralick, 1973).

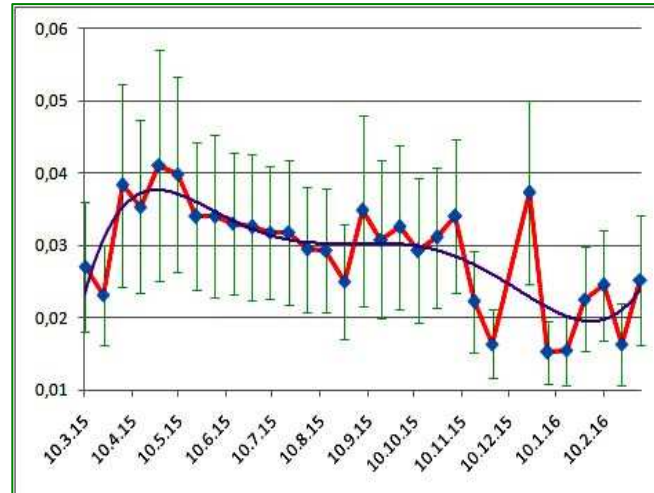
Текстурная сегментация помогает выделить на изображении поверхности с преобладанием объемного рассеяния - лес Лосиный остров (зеленый цвет), двойного переотражения - строения - красно-желтый цвет, поверхностного рассеяния - объекты с гладкой поверхностью (вода, дороги, почва без растительности) - синий цвет. Белой линией выделен профиль леса, где вычислялось среднее значение KOP по выборке порядка из 400 точек.



Рис. 2. Графики изменения среднего значения коэффициента обратного рассеяния для выделенного профиля леса в Лосином Острове за период с 10.3.15 по 4.3.16 с временным разрешением 12 дней. Вертикальные линии – значения СКО



VV



VH

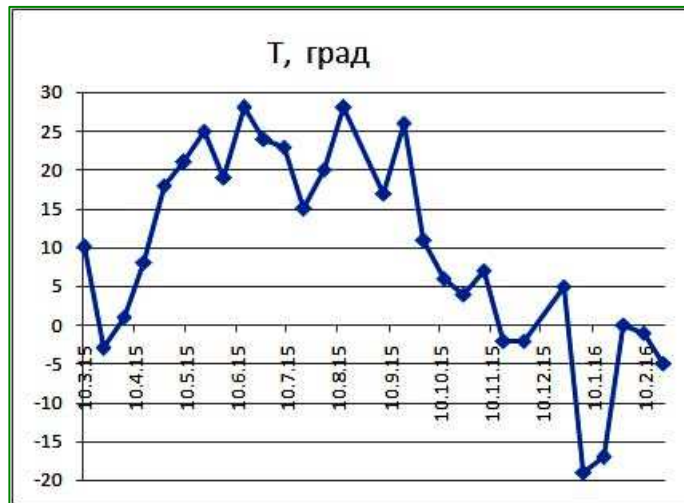


Рис. 3. Изменение температуры (град) в Москве с 10.3.15 по 4.3.16

Обнаружена сильная положительная корреляция между значениями σ^0 леса и значениями температуры воздуха T^0 . Показатель корреляции Спирмена равен для VV поляризации $r_{VV}=0.73$ ($p=4.6 \times 10^{-6}$) (высокая теснота связи) и для VH поляризации $r_{VH}=0.56$ ($p=0,0011$) (σ_{VH}^0 умеренная теснота связи). с высокой статистической значимостью связи. между переменными.

Особенности сезонных изменений σ^0 профиля леса Лосиный Остров в течение 2015-2016 года:

- рост значений σ^0 от марта к маю,
- для VV поляризации наибольшие значения σ^0 наблюдаются в летний сезон с уменьшением значений к осени и еще большему уменьшению в зимнем сезоне. Для VH поляризации есть тренд к понижению значений от весны к лету с некоторым ростом значений осенью, и последующим уменьшением значений в зимний сезон
- зимой значения наименьшие для обеих поляризации, меняющиеся значительно при изменении температуры среды
- разность между максимальным и минимальным средним значением σ^0 для VV поляризации составляет 3,6 дБ, и для VH поляризации 4,3 дБ.



Интерпретация графиков сезонного изменения σ^0 леса.

Временные вариации радарного рассеяния от леса интерпретировались с помощью модели обратного рассеяния MIMICS (Michigan microwave canopy scattering model) (Ulaby et al., 1990). В модели MIMICS была найдена зависимость диэлектрических свойств элементов растительности от их влажности, частоты сигнала радара и температуры воздуха на базе лабораторных измерений:

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

где A, B, C – реальные функции, зависящие только от объемной влажности, 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; D2 – комплексная величина, зависящая от частоты f и температуры воздуха t.

Из-за отсутствия данных о влажности элементов дерева, рассмотрим, как влияет t^0 воздуха на ϵ лесного покрова в модели MIMICS. Для этого рассмотрим функцию D2(f, t) в (1), вычисляя по этой формуле значения ϵ в некоторых условных единицах, как функцию температуры.

Реальную и мнимую части ϵ для элементов дерева, зависящие от температуры, тогда можно представить в следующем виде:

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

где $f=5.405$ ГГц, $\epsilon_\infty = 4.9$,

$$\epsilon_s = 88.045 - 0.4147 \cdot T + 6.295 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 1.075 \cdot 10^{-5} \cdot T^3$$

$$f_0 [\text{ГГц}] = 1 / (1.1109 \cdot 10^{-1} - 3.824 \cdot 10^{-3} \cdot T + 6.938 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 5.096 \cdot 10^{-7} \cdot T^3)$$

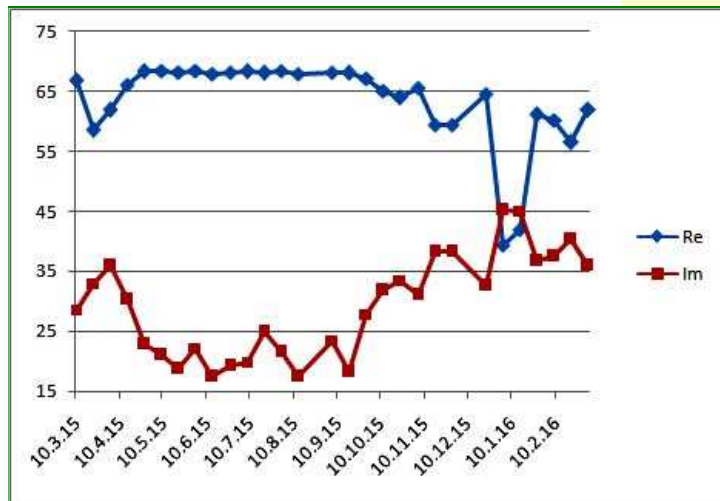


Рис. 3. Значения в усл.ед. $\text{Re}(\epsilon)$ и $\text{Im}(\epsilon)$, зависящие от t^0 , в модели MIMICS за период с 10.3.15 по 4.3.16

$\text{Re}(\epsilon(T))$ в модели MIMICS, зависящая T^0 , имеет наибольшие значения летом и осенью, почти не меняясь за эти сезоны. Уменьшение реальной части отмечается весной и зимой (при перепаде T^0 в 24 град уменьшение составило порядка 25 усл.ед.) (23.12.15 $t=+5^0\text{C}$, а через 12 дней 4.1.16 $t=-19^0\text{C}$), $\text{Im}(\epsilon(T))$ в модели MIMICS, зависящая от t^0 , зеркально повторяет сезонный ход t воздуха, т.е. в зимний период мнимая часть почти в 2 раза превышает значение в летне-осенний период.



Краткий промежуточный итог



Особенности зимы 2015/2016

Зимний сезон 2015-2016 годов отметился очень теплым декабрем. Так, 23.12.15 температура воздуха составляла $+5^{\circ}\text{C}$, а через 12 дней 4.1.16 температура снизилась до -19°C . Такой перепад температур отразился на значительном уменьшении среднего значения σ^0 для обеих поляризаций при перепаде температуры в 24° . Для VV поляризации уменьшение составляло -2.3 дБ, для VH поляризации -3.9 дБ. При этом в модели MIMICS $\text{Re}(\epsilon)$, зависящая от температуры, уменьшилась на 25 усл.ед., а $\text{Im}(\epsilon(T))$ выросла на 12.5 усл.ед., что характеризует увеличение потерь в среде

Промежуточный итог для леса

В работе получен ход во времени коэффициента обратного рассеяния от леса в Подмоскowie (Лосиный Остров) за период с 10 марта 2015 года по 4 марта 2016 года по 29 сеансам съемок Sentinel 1. Обнаружена сильная положительная корреляция между значениями σ^0 леса и значениями температуры воздуха T^0 . Показатель корреляции Спирмена равен для VV поляризации $r_{VV}=0.73$ и для VH поляризации $r_{VH}=0.56$ при высокой статистической значимости связи между переменными.

Интерпретация полученных данных осуществлялась на основе модельных формул Ulaby et al. изменения диэлектрической проницаемости элементов лесного покрова.

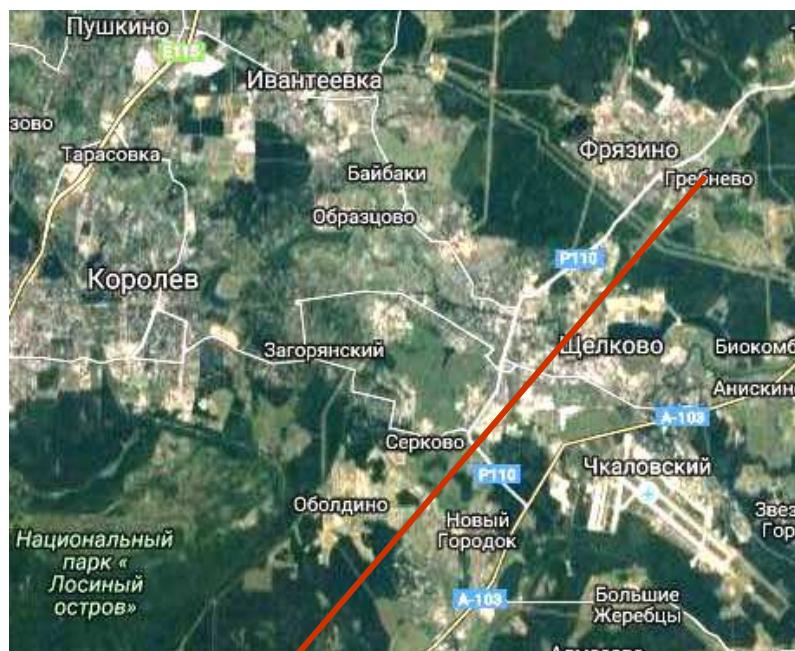
Интерпретация годового хода изменения σ^0 леса через изменения температуры воздуха и связанными с этим изменениями диэлектрической проницаемости деревьев в соответствии с моделью MIMICS, уже на этом первом этапе, когда не рассматривалась влияние влажности как деревьев, так и почвы, вследствие отсутствия данных, позволила связать изменение σ^0 леса в течение года с изменениями температуры воздуха, и благодаря модели MIMICS, с изменениями диэлектрической проницаемости деревьев, в той ее части, которая зависит от температуры.



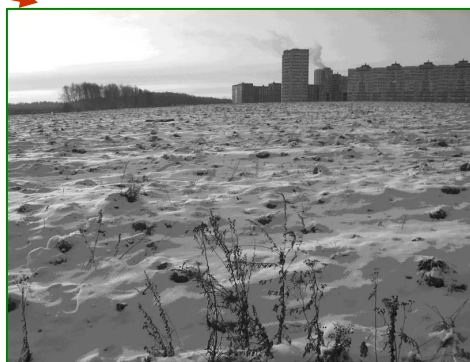
Возможность оценки влажности почвы по радарным данным Sentinel 1



Исследуемый участок, Фрязино
Московская обл.



25.06.16, $t^0 = 28^0 \text{ C}$



03.01.16, $t^0 = -17^0 \text{ C}$

Основной целью определения изменений обратного рассеяния от открытой или покрытой растительностью почвы является 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 много-временных данных.

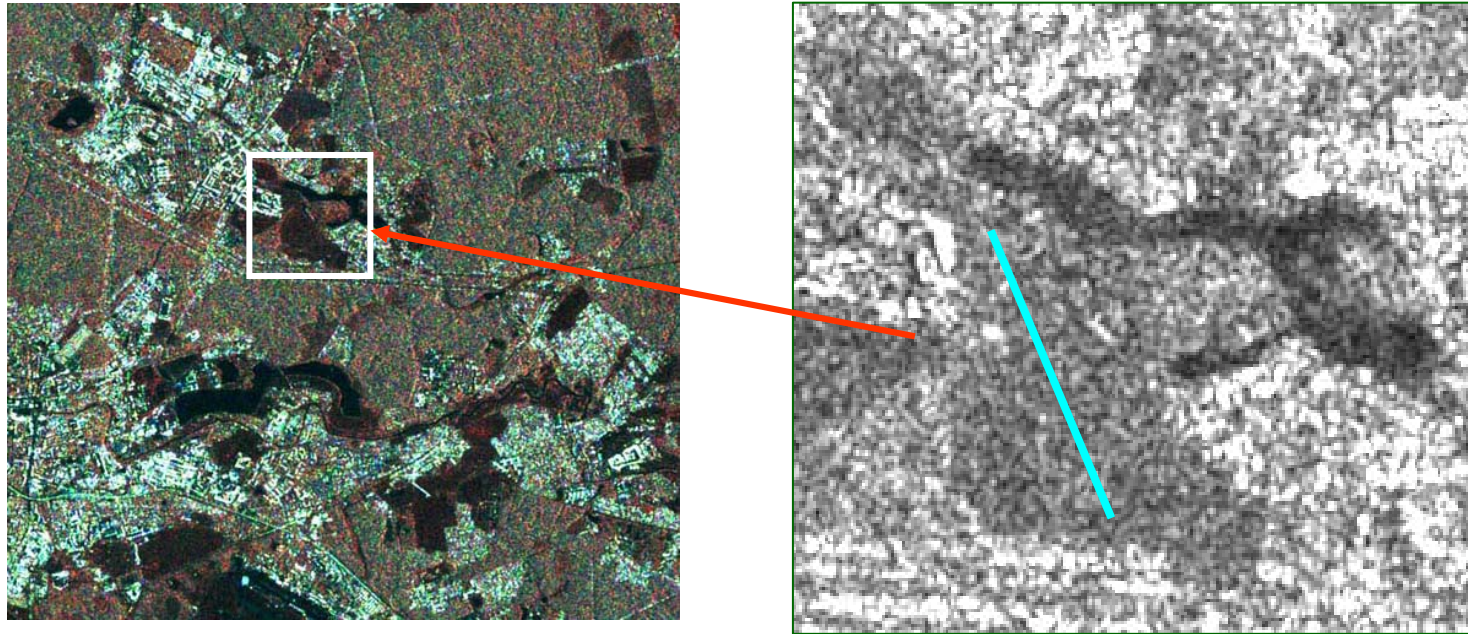


Рис. 4. Изображение S1 города Фрязино и окрестностей (слева) в псевдоцвете (23.12.15 –red, 4.1.16- green, 16.1.16- blue), VV поляризация. Красным прямоугольником выделен исследуемый участок поля, показанный справа (тип почвы –дерново-подзолистые)

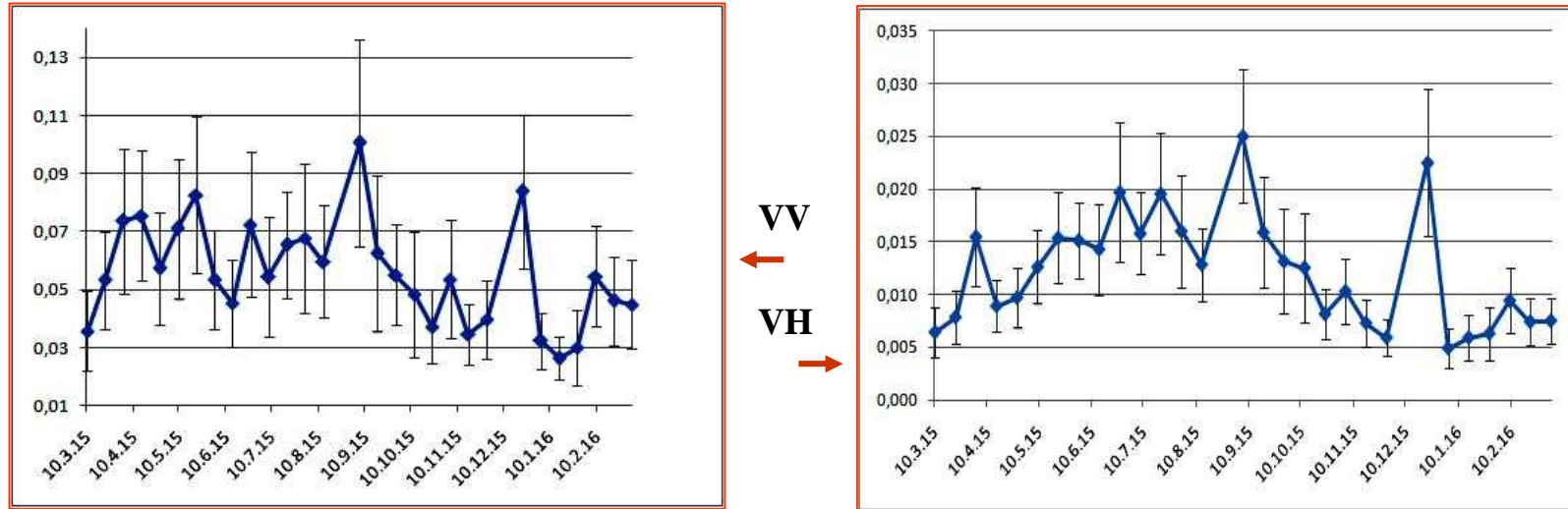


Рис. 5. Изменение среднего значения КОР профиля на поле за период с 10.3.15 по 4.3.16. Вертикальные линии – значения SKO



Коэффициенты корреляции (Лагутин, 2003)



Для опровержения гипотезы о независимости двух выборок можно подсчитать коэффициент корреляции этих выборок.

Коэффициент корреляции Пирсона

Условия применения: нормальные выборки (требуется проверка на нормальность распределения выборок),

Недостатки: не является робастной статистикой (не устойчив к ошибочным выбросам),

Коэффициент корреляции Спирмена

Условия применения: не требуется проверки на нормальность распределения выборок,

Относится к робастной статистике

Коэффициент корреляции Кэнделла

Более строгий, чем ККС, и сильно с ним коррелирует

Проведенный корреляционный анализ между парами переменных σ^0 поля и температуры воздуха T^0 показал, что показатель корреляции Спирмена $r_{VV}=0.56$ ($p=0.0016$) и $r_{VH}=0.71$ ($p=1,8 \cdot 10^{-5}$), что свидетельствует об умеренной и высокой, соответственно, тесноте связи между переменными при средней и высокой силе статистической значимости.

Интересно, что для леса ККС выше для VV поляризации, а для поля – для VH поляризации.

Следует отметить значительное изменение среднего значения σ^0 для обеих поляризаций при перепаде температуры в 24^0 с 23.12.2015 ($+5^0C$) к 4.01.2016 (-19^0C). Изменение составляет для VV поляризации -4,1 дБ и для VH поляризации -6,6 дБ. Эти изменения почти в 2 раза больше, чем для леса.



Возможность восстановления влажности почвы по модели Dubois et al., 1995



Одним из методов по восстановлению влажности почвы по радарным данным является полу-эмпирической модель Dubois et al. В этой модели КОР с согласованной поляризацией (VV и HH) определяются через параметры радара (угол зондирования и частоту) и параметры почвы – диэлектрическую проницаемость и шероховатость поверхности из системы двух нелинейных уравнений с двумя неизвестными. Условия применимости модели: частоты 1.5 - 11 ГГц, углы зондирования - 30° - 65° и выполнение 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 35% с точностью определения 4.2 % и до значений $ks \leq 2.5$, с точностью определения 0.4 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 поляризация VV, и применить можно лишь одно из двух уравнений в модели Dubois et al. при двух неизвестных ϵ' и ks , где ϵ' - реальная часть диэлектрической проницаемости.

Уравнение Dubois et al. для VV поляризации такое:

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

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

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

Для случая с двумя поляризациями в работе Rao et al. (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. получено регрессионное соотношение, связывающее значение s с $\sigma_{VH}^0 / \sigma_{VV}^0$ для тестовых участков, где s менялась от 0.25 см до 3 см:

$$y = 0.12 \cdot x + 1.85, \quad \text{где } y = s[\text{см}], \quad x = \sigma_{VH}^0 / \sigma_{VV}^0 \quad [\text{дБ}], \quad R^2 = 0.702.$$

Воспользуемся данной регрессией и подставим ее в формулу (4). Далее для получения значения объемной влажности почвы значения ϵ' подставляются в полиномиальное соотношение Topp et al. (Topp et al., 1980):

$$m_v = -5.3 \cdot 10^{-2} + 2.92 \cdot 10^{-2} \cdot \epsilon' - 5.5 \cdot 10^{-4} \cdot \epsilon'^2 + 4.3 \cdot 10^{-6} \cdot \epsilon'^3 \quad (5) \quad 12$$



Среднее значение объемной влажности почвы по модели Dubois et al.

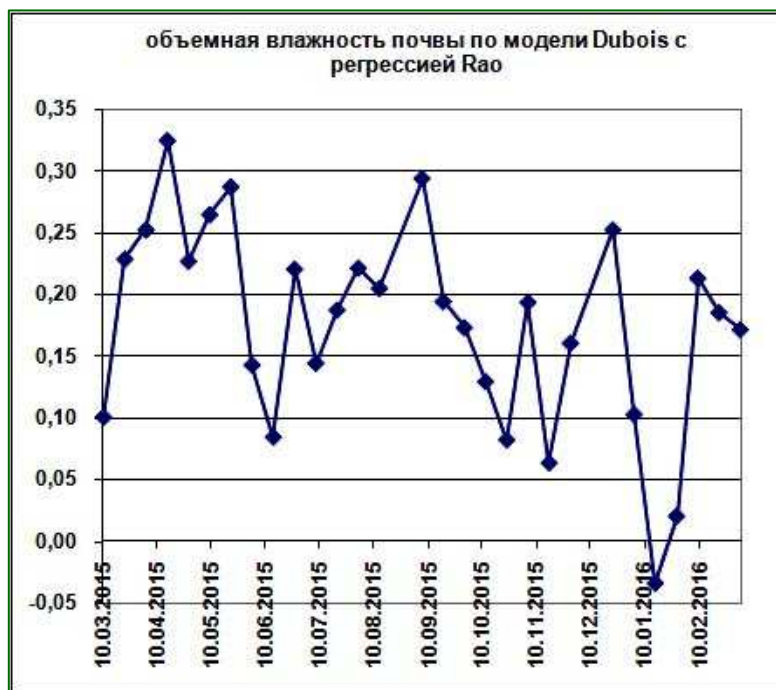


Рис. 7. Оценка сезонных изменений среднего значения объемной влажности почвы на профиле по модели Dubois et al.

Авторы Rao et al. (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 графике рис. 7 для зимнего периода значения объемной влажности почвы 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. в данном случае неправомерно.

Коэффициент корреляции Спирмена между объемной влажностью почвы, определенной по модели Dubois et al., и T^0 воздуха равен 0,32 ($p=0.086$), что свидетельствует о слабой силе связи между переменными (по шкале Чеддока).



Обратное рассеяния от поверхности, покрытой снегом



Описание обратного рассеяния сигнала от поверхностей, покрытых снегом, дано в моделях рассеяния, которые подтверждены экспериментами (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, ослабленное снежным слоем.

В зависимости от содержания жидкой воды снег рассматривается как сухой или мокрый. Первый определяется как снег, состоящий из кристаллов льда в воздухе, при температурах ниже 0°C . Мокрый снег обнаруживается в сезон таяния, когда температура воздуха 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 которой значительно отличается от льда.

Диэлектрическая проницаемость сухого снега является чисто реальной величиной, показывающей отсутствие диэлектрических потерь в среде.

Диэлектрическая проницаемость 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 проницаемость снежного покрова. Увеличение поглощения приводит к значительному уменьшению обратного рассеяния (Mätzler, 1987).



Оценка параметров снежного покрытия

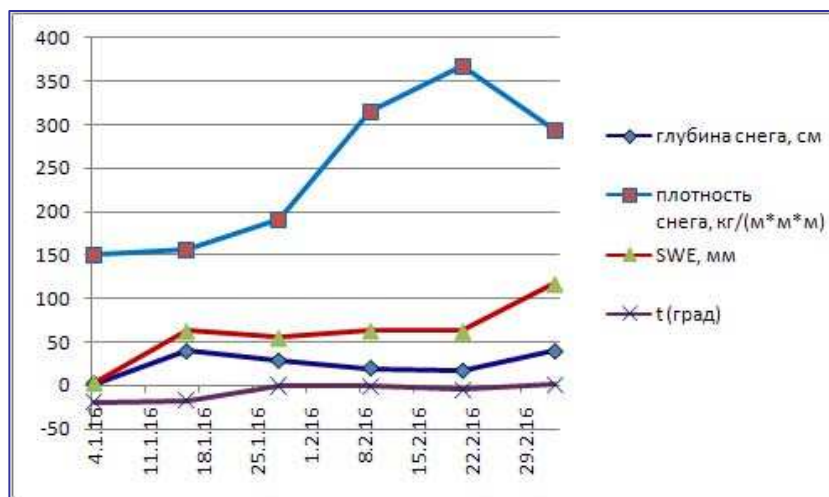
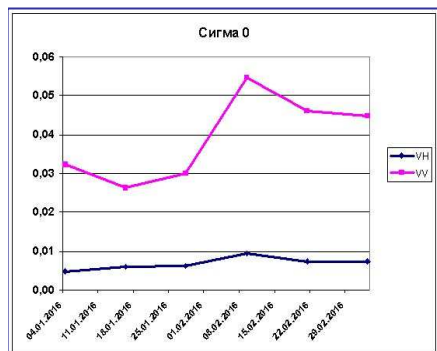


Рис. 8. Параметры снежного покрова

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).

Зима сезона 2015-2016 годов в Подмоскowie отличалась аномально теплым декабрем. На данную территорию в декабре был только один сеанс съемки Sentinel 1 от 23.12.15, когда температура равнялась +5°C, и снег на поле полностью растаял. Снежное покрытие поля наблюдалось в следующих 6 сеансах съемки S1 с 4.01.2016 по 4.03.2016.

Отметим увеличение σ^0 на 2.6 дБ 9.02.16 (сухой снег, $t=-1^{\circ}\text{C}$) относительно соседнего дня съемки 28.01.16 (мокрый снег, $t=0^{\circ}\text{C}$). Мокрый снег имеет очень малое σ^0 , поскольку он непрозрачен из-за высокого коэффициента поглощения воды, что доказано экспериментально и путем моделирования (Pettinato et al., 2004; Nagler, Rott, 2000). Для сухого снега отмечаем уменьшение значения σ^0 на 0.9 дБ при увеличении толщины слоя снега с 2 см 4.01.16 ($t=-19^{\circ}\text{C}$) до 40 см 16.01.16 ($t=-17^{\circ}\text{C}$), что согласуется с работой (Tadono et al., 2001), где показано, что σ^0 уменьшается с увеличением толщины слоя сухого снега вплоть до 80 см для измеренных данных. После этого порогового значения никаких изменений σ^0 с толщиной слоя снега не происходит.



Краткий промежуточный итог

В данной работе получен ход во времени коэффициента обратного рассеяния от поверхности почвы в Подмосковье за период с 10 марта 2015 года по 4 марта 2016 года по 29 сеансам открытых данных Sentinel 1 в С-диапазоне для VV и VH поляризаций.

Коэффициент корреляции Спирмена r между парами переменных σ^0 поля и температуры T^0 показал, что $r_{VV}=0.56$ и $r_{VH}=0.71$, что свидетельствует о средней и высокой, соответственно, силе связи между переменными при средней и высокой силе статистической значимости.

Сделана попытка оценить значения влажности почвы неиспользуемых земель в районе города Фрязино Московской области по радарным данным S1 за годичный период 2015-2016. Восстановление влажности почвы по одному уравнению Dubois et al. для VV поляризации и регрессии Rao et al. возможно при соблюдении ряда условий. Коэффициент корреляции Спирмена между объемной влажностью почвы, определенной по модели Dubois et al., и T^0 воздуха равен 0,32 ($p=0.086$), что свидетельствует о слабой силе связи между переменными.

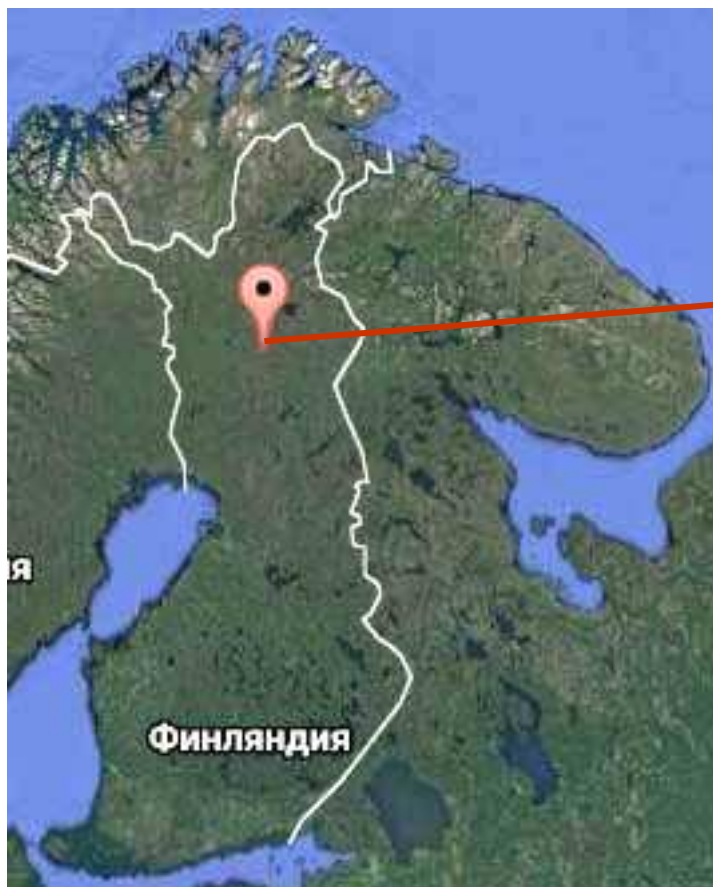
Для снежного периода показано изменение во времени значений эквивалентного слоя воды для исследуемого участка поля.



Финляндия, SOD103 - 67°24'N, 26°41'E



International Soil Moisture Network –ISMN : <http://www.ipf.tuwien.ac.at/insitu>



Озеро Melalampi на Викимапии

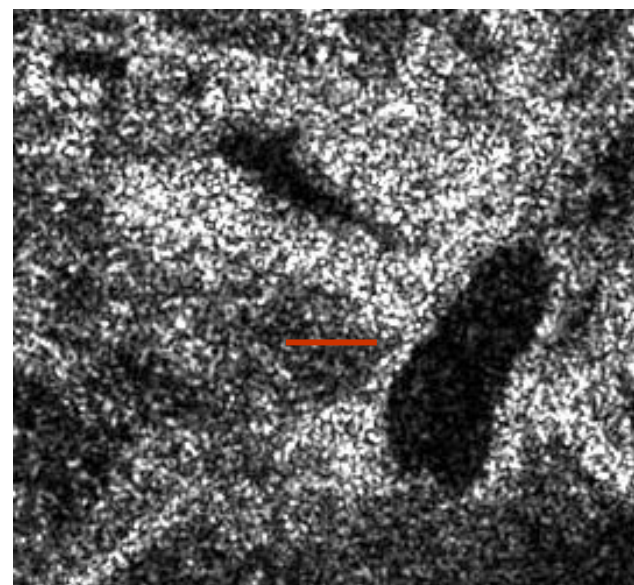


Рис.9. Профиль в районе наземных измерений вблизи озера Мелалампи в Лапландии (изображение справа – аэрофотосъемка)

Типы почвы –подзолистые (почвы хвойных бореальных лесов)

VV поляризация, 8.1.2016, угол 37.5°



Финляндия, SOD103 - 67°24'N, 26°41'E



Наземные измерения 16.10.15 – 10.10.16

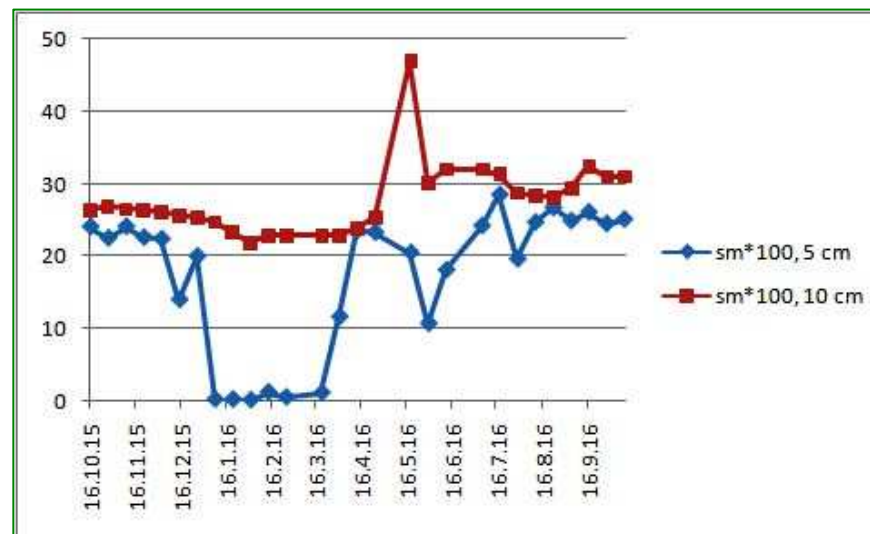
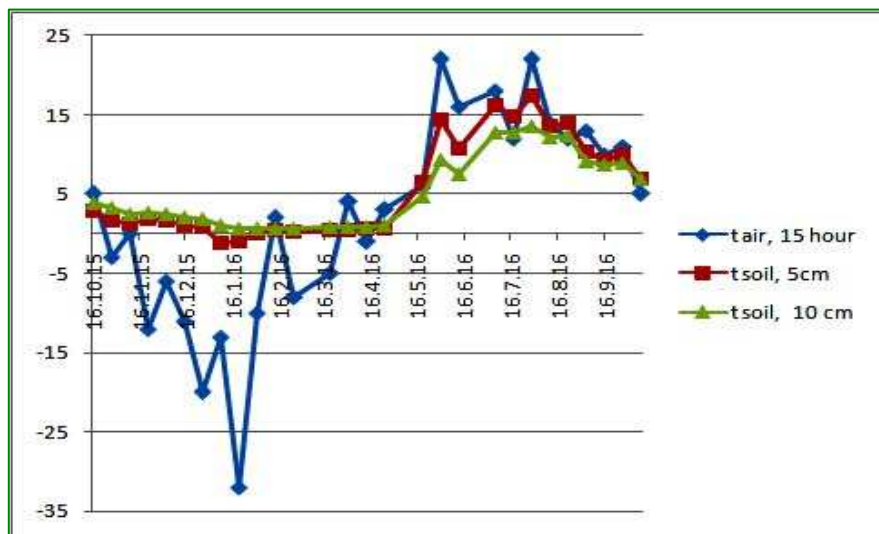


Рис. 10. Графики наземных измерений температуры воздуха и температуры и влажности почвы в верхнем 5 и 10 см слоях (данные следуют с периодом в 12 дней в соответствии с сеансами съемки S1 на данную территорию)

Коэффициент корреляции Спирмена между переменными по наземным измерениям

Коэффициент корреляции Спирмена	T ⁰ , почва 5 см	T ⁰ , почва 10 см	Влажн. почвы (5 см)	Влажн. почвы (10 см)
T ⁰ , возд	0,875 (p=2,3*10 ⁻⁹)	0,817 (p=1,1*10 ⁻⁷)	0,52 (p=0,0048)	0,72 (p=1,8*10 ⁻⁵)
T ⁰ , почва, 5 см		0,97 (p=0)	0,688 (p=7,2*10 ⁻⁵)	0,856 (p=6,5*10 ⁻⁹)
T ⁰ , почва, 10 см				0,87 (p=1,7*10 ⁻⁹)



Финляндия, SOD103 - 67°24'N, 26°41'E

Sentinel 1 радарные измерения коэффициента обратного рассеяния в период от 16.10.15 по 10.10.16 по 28 сеансам съемки

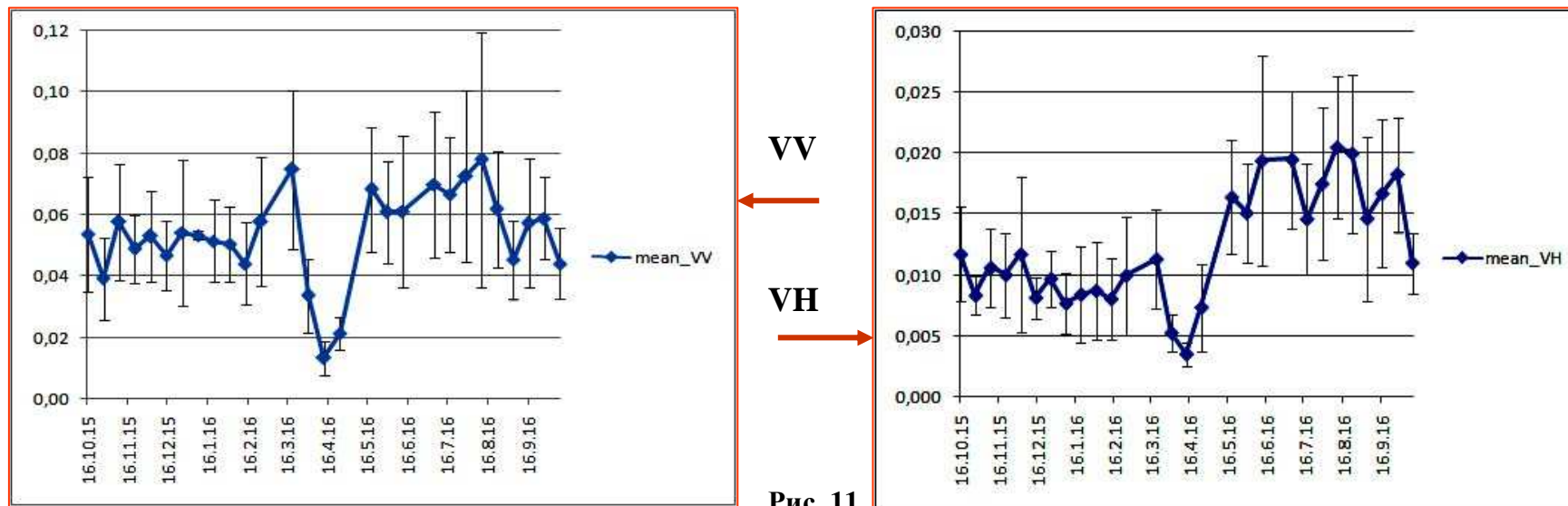


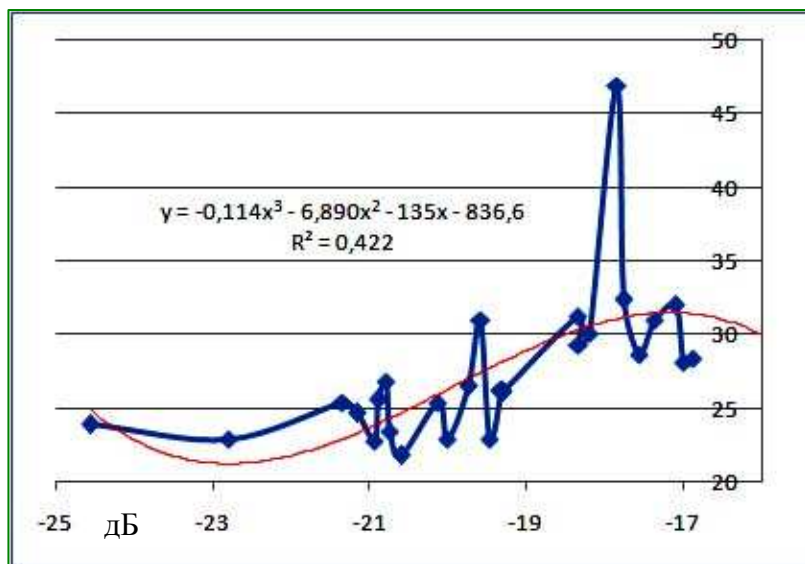
Рис. 11.

Коэффициент корреляции Спирмена между коэффициентом обратного рассеяния, наземными измерениями параметров почвы и температуры воздуха

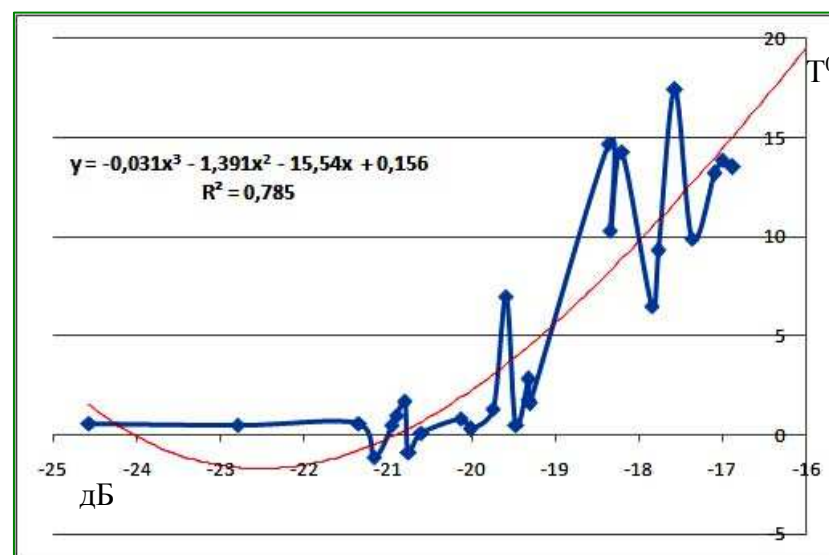
Коэффициент корреляции Спирмена	T ⁰ , возд.	T ⁰ , почва 5 см	T ⁰ , почва 10 см	Влажн. почвы (5 см)	Влажн. почвы (10 см)
σ_{VV}^0	0.48, p=0.01	0.54, p=0.003	0.56, p=0.002	0.12, p=0.5	0.46, p=0,01
σ_{VH}^0	0.74, p=8.5*10 ⁻⁶	0.83, p=6*10 ⁻⁸	0.82, p=9.4*10 ⁻⁸	0.5, p=0,007	0.75, p=3.4*10 ⁻⁶



Регрессионные соотношения между радарными данными на VH поляризации и наземными измерениями на SOD103



x- σ_{VH}^0 [дБ]
у – влажность почвы (глубина 10 см), %
 R^2 – величина достоверности аппроксимации.



x- σ_{VH}^0 [дБ]
у – температура почвы (глубина 5 см), град
 R^2 – величина достоверности аппроксимации.

Рис. 12. Регрессионные соотношения между σ_{VH}^0 (дБ) и влажностью почвы на глубине 10 см и температурой почвы на глубине 5 см



Сравнение параметров почвы для SOD103, вычисленных по радарным данным S1 в модели Dubois et al. с наземными измерениями

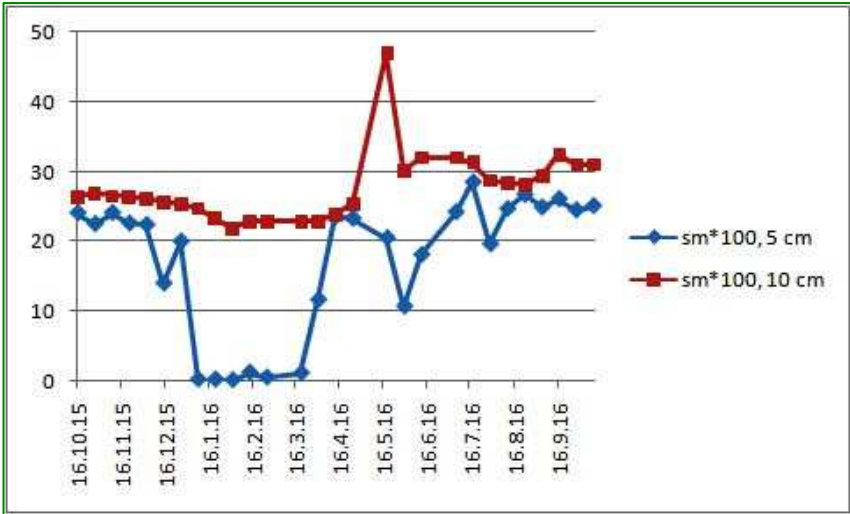


Рис.13. Влажность почвы по наземным данным

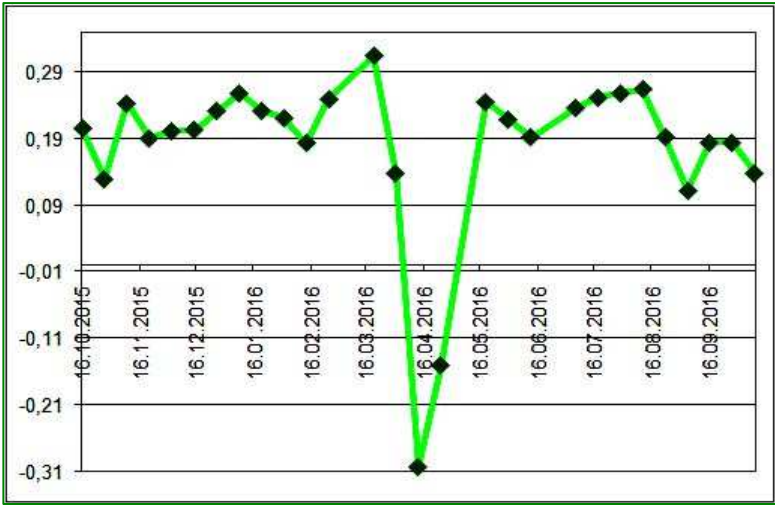


Рис. 14. Влажность почвы по модели Dubois et al.

Коэфф. корр. Спирмена	sm, 5 cm	sm, 10 cm
Dubois	-0,27 P=0,16	0,03 P=0,88



Сравнение параметров почвы, вычисленных по радарным данным S1 в модели Dubois et al. с параметрами почвы, вычисленными по регрессионному соотношению для поля во Фрязино

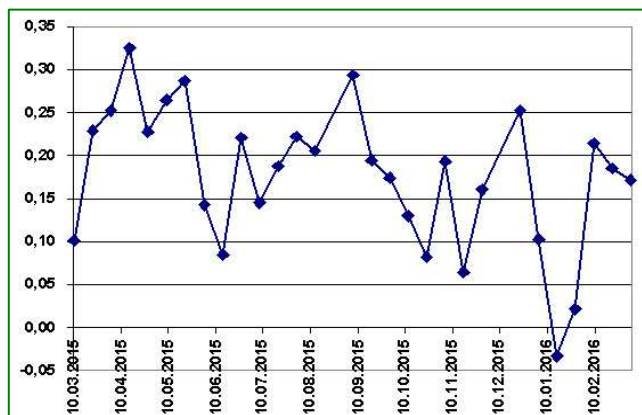


Рис. 15. Влажность почвы по модели Dubois et al.

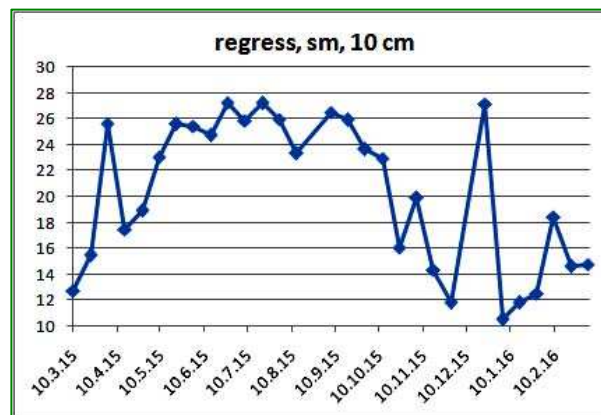


Рис.16. Влажность почвы по регрессионному соотношению

Коэффициент корреляции Спирмена между значениями влажности почвы, вычисленными по модели Dubois и по регрессионному соотношению, равен **0,53**, ($p=0,003$).

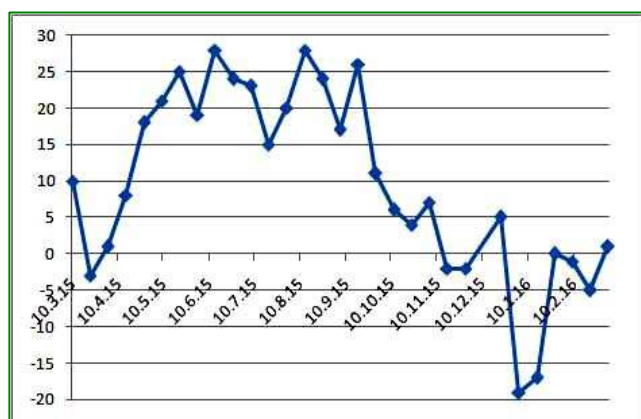


Рис. 17. Изменение температуры (град) в Москве с 10.3.15 по 4.3.16

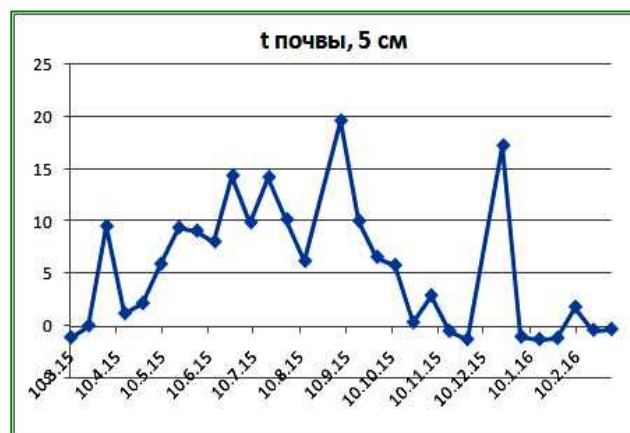


Рис. 18. Температура почвы в слое 5 см на поле во Фрязино по регрессионному соотношению

Коэффициент корреляции Спирмена между температурой воздуха и вычисленной по регрессионному соотношению температурой почвы в слое 5 см равен **0,69** ($p=2,9*10^{-5}$)



Заключение

Наличие в открытом доступе данных о наземных измерениях параметров почвы (температуры поверхности почвы и влажности поверхности почвы) по территории России значительно помогли бы надежно связать спутниковые радарные данные с высоким разрешением со значениями влажности и температуры почвы в слоях 0-5 см и 10 см.

СПАСИБО!



Литература



1. *Лагутин М.Б.* Наглядная математическая статистика. В двух томах.-М.: П-центр, 2003.
2. *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 Intern. GRS Symp. (IGARSS' 2012). Jul 2012. Munich, Germany, 2012. P.4859-4862.
3. *Dubois P.C., van Zyl J.J., Engman T.* Measuring soil moisture with imaging radars// IEEE Trans. GRS. 1995. V.33. № 4. P.916-926.
4. *Fung A.K.* Comparison of Model Predictions with Backscattering and Emission Measurements from Snow and Ice. In *Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications*, 1st ed.; Artech House Publishers: Boston, MA, USA, 1994. P. 425–450.
5. *Mätzler C.* Applications of the Interaction of Microwaves with the Natural Snow Cover// Remote Sens. Reviews. 1987. V.2. P. 259-387.
6. *Mätzler C.* Microwave Permittivity of Dry Snow// IEEE Trans. GRS. 1996. V.34(2). P. 573-581.
7. *Nagler T., Rott H.* Retrieval of wet snow by means of multitemporal SAR data// IEEE Trans. GRS. 2000. V. 38. №. 2. P. 754-765.
8. *Pettinato S, Poggi P, Macelloni G, Paloscia S, Pampaloni P, Crepaz A.* Mapping snow cover in Alpine areas with ENVISAT/SAR images// Envisat and ERS Symposium, September 6–10. Proceeding ESA ISBN 92–9092–883–2Salzburg, Austria, 2004.
9. *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. Remote Sens. December 2013.V.41(4). P. 865–872: DOI 10.1007/s12524-013-0274-3.
10. *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. Environ. 1994. V. 49. P. 145-154.



10. *Rott H. and Mätzler C.* Possibilities and Limits of Synthetic Aperture Radar for Snow and Glacier Surveying// *Annal. Glaciology*. 1987. V. 9. P. 195-199.
11. *Rykhus R., Lu Z.* Monitoring a boreal wildfire using multi-temporal Radarsat-1 intensity and coherence images// *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. March 2011. V. 2. № 1. P.15–32.
12. *Salcedo A. Ana Paula.* 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
13. *Tadono T, Fukami K, Shi J.* Estimation of Snow Hydrological Parameters Using Single-parameter, Multi-temporal SAR images// *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '01*. 2001.
14. *Tadono T, Fukami K, Shi J.* Estimation of Snow Hydrological Parameters Using Single-parameter, Multi-temporal SAR images// *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '01*. 2001.
15. *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.
16. *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 Publishers: Boston, MA, USA, 1986. P. 1797–1982
17. *Ulaby F.T., Sarabandi K., McDonald K., Whitt M., Dobson D.C.* Michigan microwave canopy scattering model// *Int. J. Remote Sens*. 1990. V. 11. P.1223-1254.
18. *Walker J.P., Panciera R., Monerris A.* Basis of an Australian radar soil moisture algorithm theoretical baseline document// Monash University, Melbourne, 2013.
http://users.monash.edu.au/~jpwalker/reports/GARADA_Deliverable%232.pdf