



СВЯЗЬ РАДАРНЫХ ДАННЫХ SENTINEL 1 С НАЗЕМНЫМИ ИЗМЕРЕНИЯМИ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ

Родионова Н.В.

*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино*

Всероссийская конференция
Обработка пространственных данных в задачах мониторинга
природных и антропогенных процессов
28-31 августа 2017 г.
ООО «Санаторий Рассвет», г. Бердск



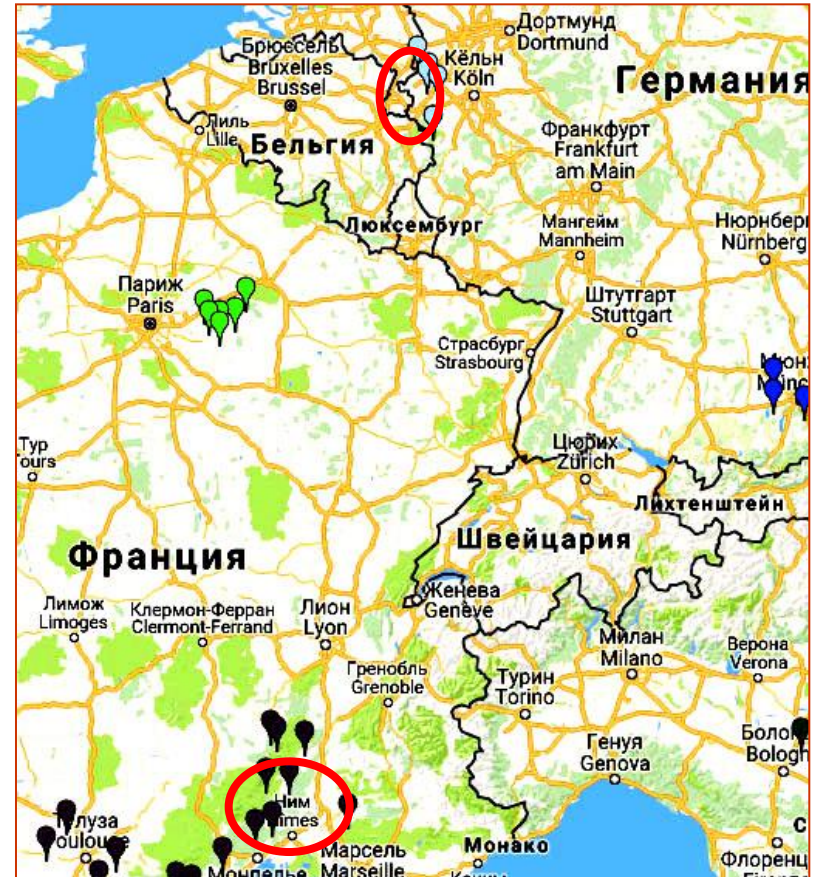
ВВЕДЕНИЕ



В данной работе рассмотрена возможная корреляционная связь между радарным коэффициентом обратного рассеяния (КОР) и наземными измерениями параметров почвы (температуры и влажности) для 4-х станций в Германии и 3-х во Франции с почвами, покрытыми травой или с/х культурами, на основе имеющихся в открытом доступе на сайте International soil moisture network (<https://ismn.geo.tuwien.ac.at/>) наземных измерений температуры и влажности почвы на глубинах от 5 до 30 см и находящихся в открытом доступе радарных данных Sentinel 1 С-диапазона VV+VH поляризации.

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.



Основная цель работы – выяснить есть ли корреляция КОР с наземными измерениями температуры и влажности почвы, на каких поляризациях. В случае высокой корреляции построить регрессионные соотношения, являющиеся шагом к построению модели связи спутниковых и наземных данных.



Наиболее известные модели восстановления параметров почвы по радарным данным

Модели для почвы без растительности

1) полу - эмпирическая модель **Dubois et al. (1995)** с двумя уравнениями для согласованных поляризаций. Условия применимости модели: частоты 1.5 - 11 ГГц, углы зондирования - 30° - 65° и выполнение условий $\sigma_{HH}^0 / \sigma_{VV}^0 < 1$ и $\sigma_{VH}^0 / \sigma_{VW}^0 < -11$ 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.

2) Эмпирическая модель **Oh et al. (1992)** для радарных данных с полной поляризацией.

Съемка Sentinel 1 выполняется как правило на двух поляризациях VV и VH (мода IW), что не позволяет воспользоваться данными моделями.



НАЗЕМНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ



<https://ismn.geo.tuwien.ac.at/>

Таблица 1. Информация о наземных станциях, включенных в обработку.

Название станции	Широта (с.ш.), град	Долгота (в.д.), град	Тип растительности	Текстура почвы на глубине 0-30 см, %
Mejannes-le-Clap, (Франция)	44,222	4,34483	травы	глина- 24, органика- 1,61, песок-42, ил - 34.
CabrieresAvignon, (Франция)	43,88367	5,16483	сельхозугодья, неорошаемые	глина- 19, органика- 2,13, песок-37, ил - 44.
Villevielle, (Франция)	43,79517	4,09083	сельхозугодья, неорошаемые/ деревья или кусты	глина- 19, органика- 2,13, песок-37, ил - 44.
Gevenich, (Германия)	50,9892	6,32355	сельхозугодья, неорошаемые	глина- 22, органика- 0,74, песок-41, ил - 37.
Merzenhausen, (Германия)	50,9303	6,29747	сельхозугодья, неорошаемые	глина- 22, органика- 0,74, песок-41, ил - 37.
Selhausen, (Германия)	50,8691	6,44954	сельхозугодья, неорошаемые	глина- 23, органика- 1,07, песок-37, ил - 40.
Schoeneseiffen, (Германия)	50,5149	6,37559	травы	глина- 20, органика- 1,45, песок-42, ил - 38.

В работе использовались наземные измерения параметров почвы (температуры и влажности на глубинах 5, 10, 20 и 30 см) и температуры воздуха, находящиеся в открытом доступе на сайте International soil moisture network. Были выбраны 9 станций на территории Западной Европы, для которых период проведения наземных измерений совпадал с имеющейся на тот же период времени радарной информацией Sentinel 1 (S1). Информация о наземных станциях, включенных в обработку, дана в Таблице 1.

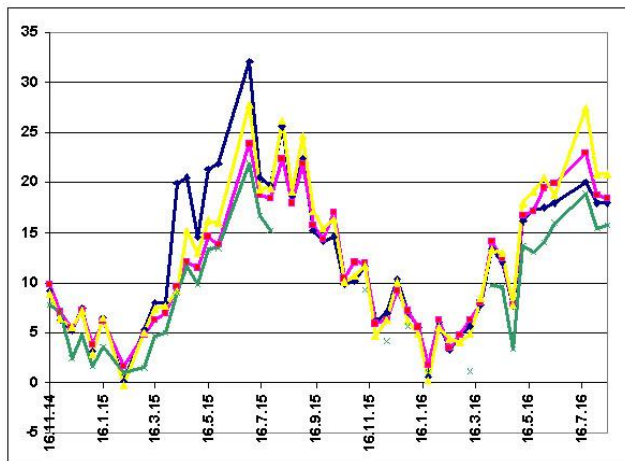


Графики наземных измерений температуры и влажности почвы на глубине 5 см и 20 см для станций в Германии за период 16.11.14- 13.8.16.



Температура почвы, град

Глубина 5 см



Температура почвы, град

Глубина 20 см

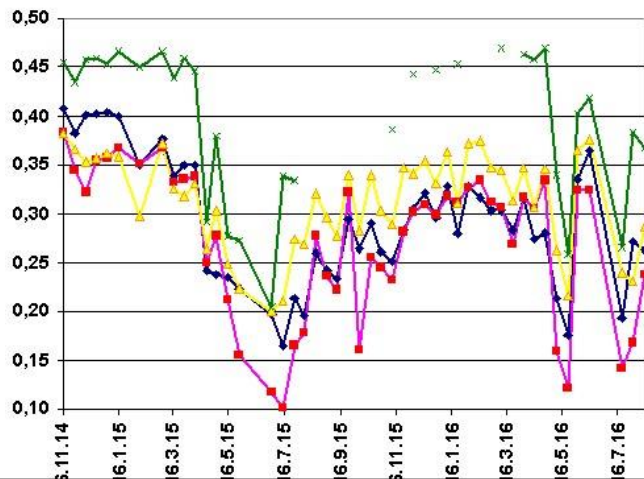


Рис. 1.

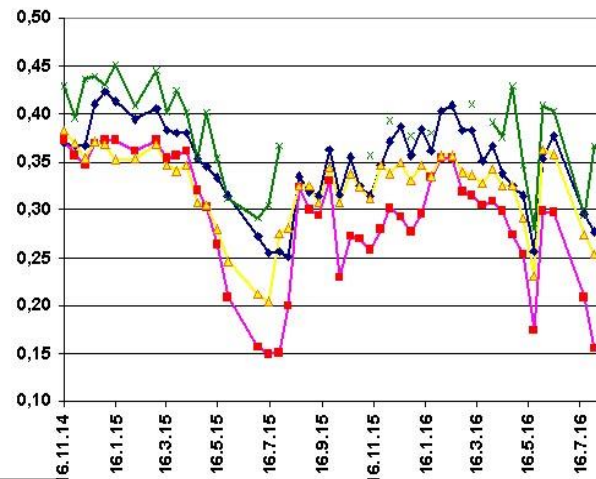
Merzenhausen Gevenich Selhausen Schoeneseiffen

ср. знач. T° 12,4 11,6 12,2 9,1

Влажность почвы



Влажность почвы



- Merzenhausen
- Gevenich
- Selhausen
- Schoeneseiffen

Merzenhausen Gevenich Selhausen Schoeneseiffen

ср. знач. sm 0,286 0,259 0,308 0,374



Графики наземных измерений температуры и влажности почвы на глубине 5 см и 20 см для станций во Франции за период 3.10.14- 27.12.15.



Температура почвы, град

Глубина 5 см

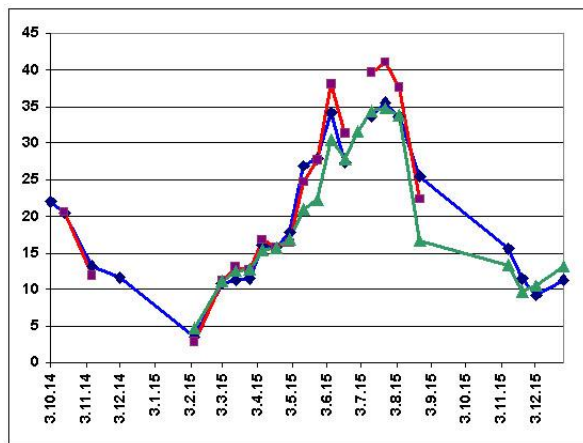
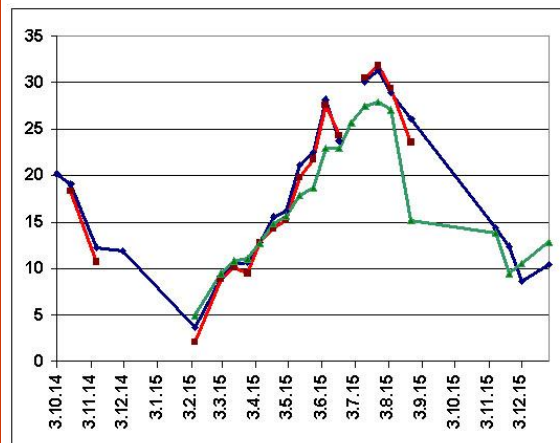


Рис. 2.

Глубина 20 см

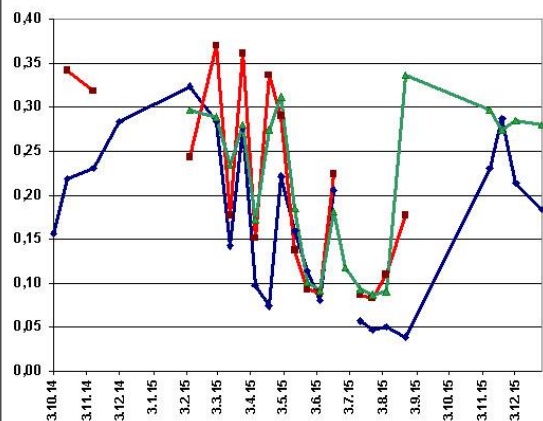


Температура почвы, град

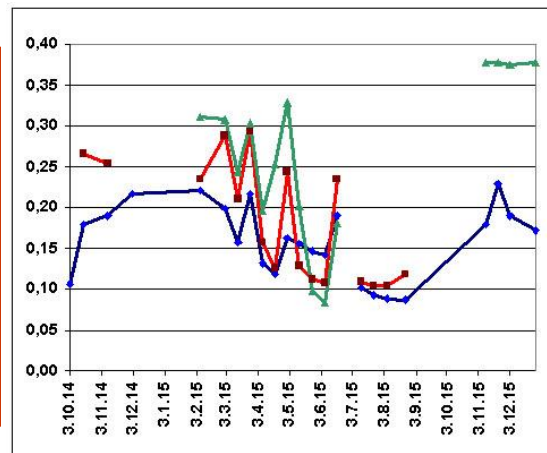
	Avignon	Mejanne	Villeville
ср. знач. Т, град	19,7	21,7	19,5



Влажность почвы



Влажность почвы



	Avignon	Mejanne	Villeville
ср. знач. см	0,173	0,211	0,214



Исходные радарные данные Sentinel 1 A



В работе использовались находящиеся в открытом доступе Sentinel 1 радарные данные С-диапазона IW (interferometric wide swath) моды с поляризациями (VV+VH) и пространственным разрешением 20 м. Работа с изображениями S1 осуществлялась с помощью программы S1Toolbox и позднее SNAP (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-1>).

Предварительная обработка данных включала в себя выделение фрагмента с исследуемой областью и радиометрическую калибровку.

В таблице 2 приведены данные для каждой станции по углу обзора, периоду съемки и количеству точек при усреднении КОР по профилю.

Таблица 2.

Название станции	Угол обзора	Период съемки	Количество точек в профиле
Mejannes-le-Clap,	42 ⁰	15.10.14 – 23.8.15	30
CabrieresAvignon ,	45 ⁰	3.10.14 – 27.12.15	35
Villevielle	40 ⁰	6.2.15 – 27.12.15	20
Gevenich	40 ⁰	16.11.14 – 13.08.16	~10
Merzenhausen	40 ⁰	16.11.14 – 13.08.16	~10
Selhausen	40 ⁰	16.11.14 – 13.08.16	~12
Schoeneseiffen	40 ⁰	16.11.14 – 13.08.16	~10 7

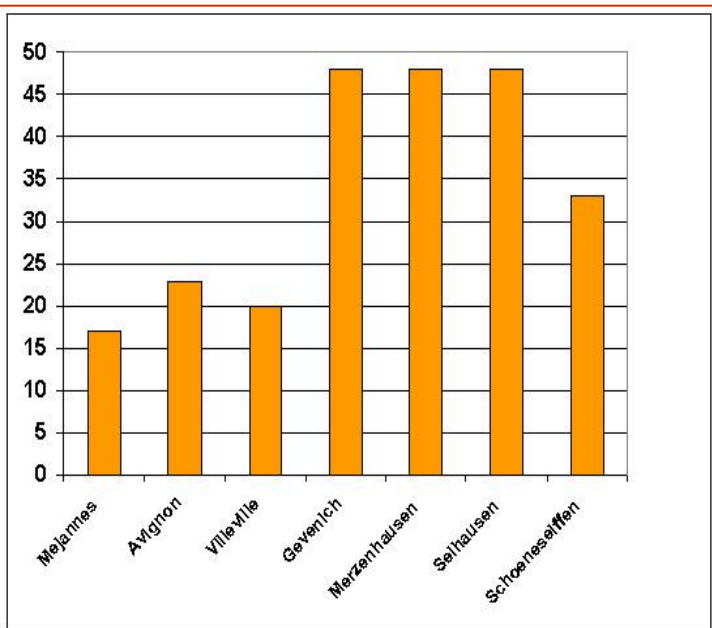


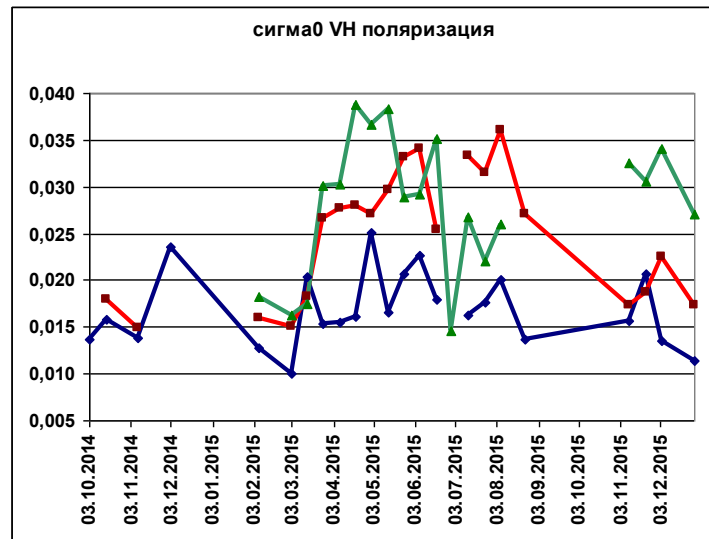
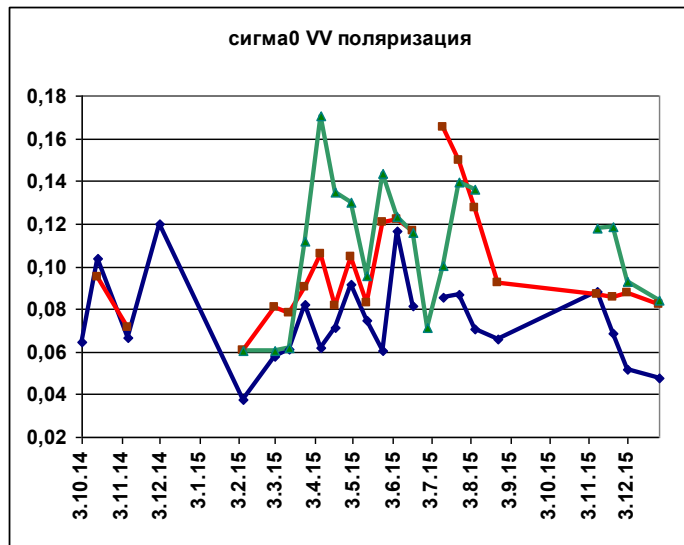
Рис. 3. Количество обработанных сеансов съемки S1



Графики изменений коэффициента обратного рассеяния для станций во Франции за период 3.10.14- 27.12.15 и станций в Германии за период 16.11.14- 13.8.16.



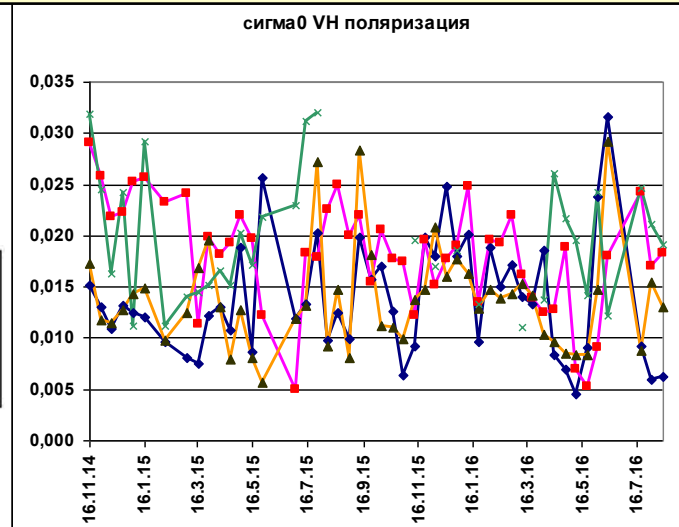
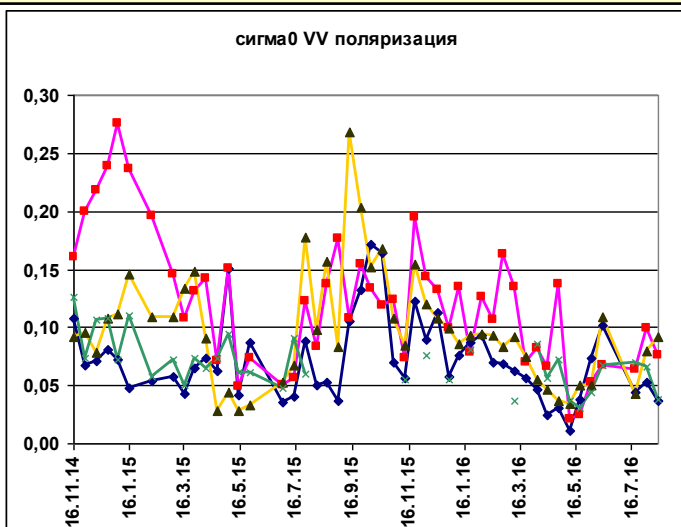
Рис. 4



Legend for Figure 4:
 - Avignon (blue line with diamonds)
 - Mejannes (red line with squares)
 - Villeville (green line with triangles)

	Avignon	Mejannes	Villeville
ср. знач. KOP, VV	0,0746	0,099	0,109

	Avignon	Mejannes	Villeville
ср. знач. KOP, VH	0,017	0,0246	0,028



Legend for bottom-left graph:
 - Merzenhausen (blue line with diamonds)
 - Gevenich (red line with squares)
 - Selhausen (yellow line with triangles)
 - Schoenesseifen (green line with crosses)

	Merzen.	Gevenich	Selhausen	Schoen.
ср. знач. KOP, VV	0,0717	0,121	0,097	0,069

	Merzen.	Gevenich	Selhausen	Schoen.
ср. знач. KOP, VH	0,0138	0,0183	0,0138	0,0196



Коэффициент корреляции Спирмена между коэффициентом обратного рассеяния (КОР) и наземными измерениями температуры почвы (Франция)

Для определения связи между коэффициентом обратного рассеяния и наземными измерениями температуры почвы был подсчитан коэффициент корреляции Спирмена ρ_s между этими переменными. В Таблице 3 приведены значения ρ_s и p- значения для семи наземных станций и двух поляризаций.

	CabrieresAvignon	Mejannes-le-Clap	Villevielle
T^0 , почва 5 см			
σ_{VV}^0	$\rho_s = 0.5, p=0.01$	$\rho_s = 0.9, p=10^{-7}$	$\rho_s = 0.55, p=0.01$
σ_{VH}^0	$\rho_s = 0.48, p=0.02$	$\rho_s = 0.8, p=10^{-4}$	$\rho_s = 0.07, p=0.8$
T^0 , почва 10 см			
σ_{VV}^0	$\rho_s = 0.5, p=0.01$	$\rho_s = 0.91, p=10^{-7}$	$\rho_s = 0.56, p=0.01$
σ_{VH}^0	$\rho_s = 0.45, p=0.03$	$\rho_s = 0.79, p=10^{-4}$	$\rho_s = 0.08, p=0.8$
T^0 , почва 20 см			
σ_{VV}^0	$\rho_s = 0.51, p=0.01$	$\rho_s = 0.88, p=10^{-6}$	$\rho_s = 0.52, p=0.02$
σ_{VH}^0	$\rho_s = 0.46, p=0.02$	$\rho_s = 0.76, p=10^{-4}$	$\rho_s = 0.09, p=0.7$

Таблица 3.1



Промежуточный вывод для станций во Франции

- 1) Есть **положительная** корреляция ($p < 0,05$) между КОР и температурой почвы глубиной от 5 до 30 см для станций во Франции от сильной связи между переменными (станция Mejanne-le-Clap) до умеренной (станций CabrieresAvignon, Villevielle). Значение уровня p говорит о высокой статистической значимости связи между переменными.
- 2) Значение коэффициента корреляции Спирмена для согласованной поляризации VV превышает данный параметр для кросс поляризации VH.
- 3) Для станции Villevielle отсутствует корреляция на кросс- поляризации VH.



Коэффициент корреляции Спирмена между коэффициентом обратного рассеяния (КОР) и наземными измерениями температуры почвы (Германия)

Таблица 3.2

	Gevenich	Merzenhausen	Selhausen	Schoeneseiffen
T^0 , почва 5 см				
σ_{VV}^0	$\rho_s = -0,53, p=6 \cdot 10^{-6}$	$\rho_s = -0,28, p=0,013$	$\rho_s = -0,24, p=0,04$	$\rho_s = -0,27, p=0,05$
σ_{VH}^0	$\rho_s = -0,2, p=0,07$	$\rho_s = -0,06, p=0,32$	$\rho_s = -0,18, p=0,1$	$\rho_s = 0,38, p=0,01$
T^0 , почва 20 см				
σ_{VV}^0	$\rho_s = -0,5, p=2 \cdot 10^{-5}$	$\rho_s = -0,21, p=0,06$	$\rho_s = -0,18, p=0,1$	$\rho_s = -0,26, p=0,06$
σ_{VH}^0	$\rho_s = -0,16, p=0,11$	$\rho_s = 0,001, p=0,5$	$\rho_s = -0,12, p=0,2$	$\rho_s = 0,44, p=0,003$



Промежуточный вывод для станций в Германии

- 1) Есть умеренная **отрицательная** корреляция ($<0,05$) между КОР для **согласованной поляризации** и температурой почвы на глубине 5 см для станций в Германии. Значение уровня p говорит о высокой статистической значимости связи между переменными.
- 2) Отсутствует корреляция на кросс- поляризации для 3-х станций (Gevenich, Merzenhausen, Selhausen). Для станции Schoeneseiffen есть умеренная положительная корреляции для обеих поляризаций.

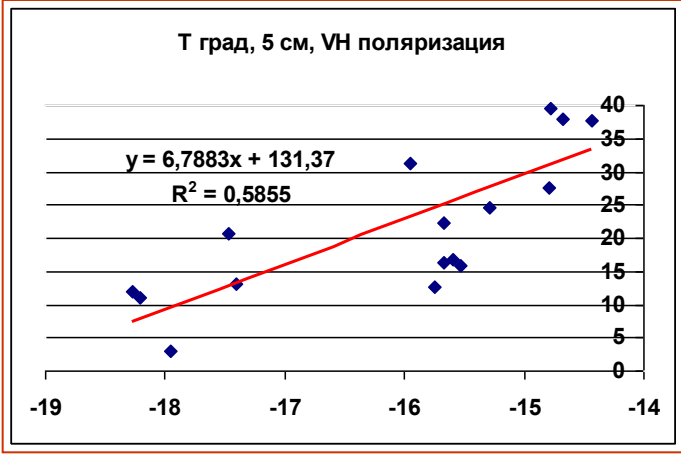
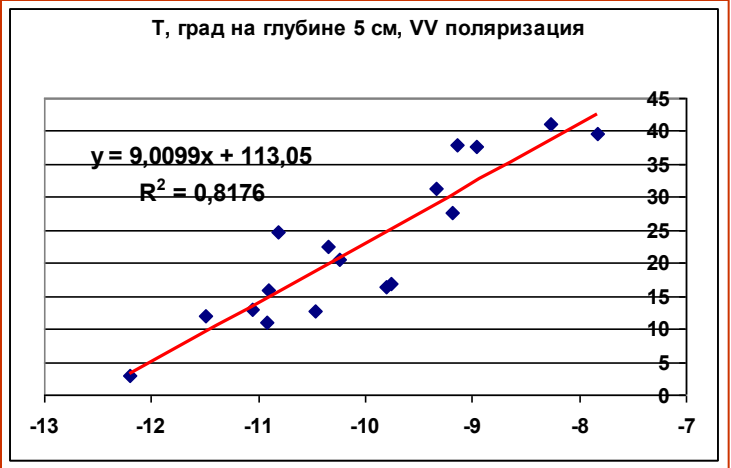
Промежуточный вывод для связи между КОР и температурой почвы

Показана сильная или умеренная положительная, а также умеренная отрицательная связь между коэффициентом обратного рассеяния и температурой почвы. Для 6-ти из 7-ми станций коэффициент корреляции Спирмена на согласованной поляризации VV превышает коэффициент корреляции Спирмена на кросс-поляризации VH .



Регрессионные соотношения между КОР и T⁰ почвы

При наличии сильной связи между переменными можно построить регрессионную модель для определения аналитической связи между спутниковыми и наземными данными. Это сделано для станции **Mejannes-le-Clap (Франция)**. Регрессионные соотношения представляют собой линейную зависимость между переменной $x = \sigma^0$ [дБ] и переменной $y = T^0$ – температурой почвы (рис.5).



Температура почвы, град

Коэффициент обратного рассеяния в дБ

Рис.5. Регрессионные соотношения между σ_{VV}^0 [дБ] (слева) и σ_{VH}^0 [дБ] (справа) и температурой почвы на глубине 5 см для станции Mejannes-le-Clap

Коэффициент детерминации составляет для данных регрессий 0,817 для согласованной поляризации и 0,585 для кросс-поляризации. Таблица для тестирования на уровне значимости 5% в случае выборки N=17 (количество сеансов съемки) и числа переменных k=2 дает критическое значение $R_{крит}^2 = 0,349$. Поскольку для обоих уравнений выполняется соотношение $R_{расч}^2 \gg R_{крит}^2$, то с вероятностью 95% можно утверждать о наличии значимости уравнений регрессии:

$$T_{почва, 5см}^0 = 9,009 \cdot \sigma_{VV}^{дБ} + 113,0$$

$$T_{почва, 5см}^0 = 124,48 + 7,67 \cdot \sigma_{VV}^{дБ} + 1,55 \cdot \sigma_{VH}^{дБ} \quad (1)$$

$$T_{почва, 5см}^0 = 6,788 \cdot \sigma_{VH}^{дБ} + 131,3$$

↑
2-х факторная линейная регрессия, R²=0,83.



Регрессионные соотношения между КОР и T^0 почвы для станции Gevenich (Германия)

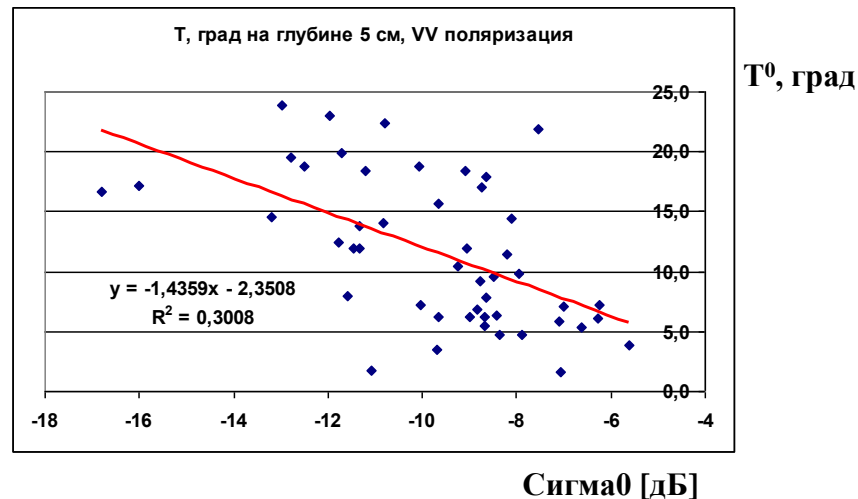


Рис.6. Регрессионное соотношение между сигма0 VV поляризации [дБ] и температурой почвы на глубине 5 см T^0 для станции Gevenich (Германия)

Коэффициент детерминации составляет для данной регрессии 0,3 для согласованной поляризации. Таблица для тестирования на уровне значимости 5% в случае выборки $N=48$ (количество сеансов съемки) и числа переменных $k=2$ дает критическое значение $R^2_{\text{крит}} < 0,2$. Поскольку выполняется соотношение $R^2 > R^2_{\text{крит}}$, то с вероятностью 95% можно утверждать о наличии значимости уравнения регрессии:

$$T^0_{\text{почва 5 см}} = -1,43 \cdot \sigma_{\text{VV}}^{\text{дБ}} - 2,35 \quad (2)$$



Коэффициент корреляции Спирмена между коэффициентом обратного рассеяния (КОР) и наземными измерениями влажности почвы (Франция)

	CabrieresAvignon	Mejannes-le-Clap	Villevielle
влажность почвы, глубина 5 см			
σ_{VV}^0	$\rho_s = -0,06, p=0.78$	$\rho_s = -0.72, p=0,001$	$\rho_s = -0.39, p=0.09$
σ_{VH}^0	$\rho_s = 0.15, p=0.48$	$\rho_s = -0.79, p=10^{-4}$	$\rho_s = 0.2, p=0.4$
влажность почвы, 10 см			
σ_{VV}^0	$\rho_s = -0.05, p=0.83$	$\rho_s = -0.68, p=0,003$	$\rho_s = -0.39, p=0.09$
σ_{VH}^0	$\rho_s = -0.09, p=0.67$	$\rho_s = -0.82, p=10^{-4}$	$\rho_s = 0.2, p=0.3$
влажность почвы, 20 см			
σ_{VV}^0	$\rho_s = -0.08, p=0.7$	$\rho_s = -0.66, p=0,004$	
σ_{VH}^0	$\rho_s = -0.12, p=0.6$	$\rho_s = -0.86, p=10^{-5}$	



Регрессионные соотношения между КОР и влажностью почвы на глубине 5 см для станции Mejjannes-le-Clap (Франция)

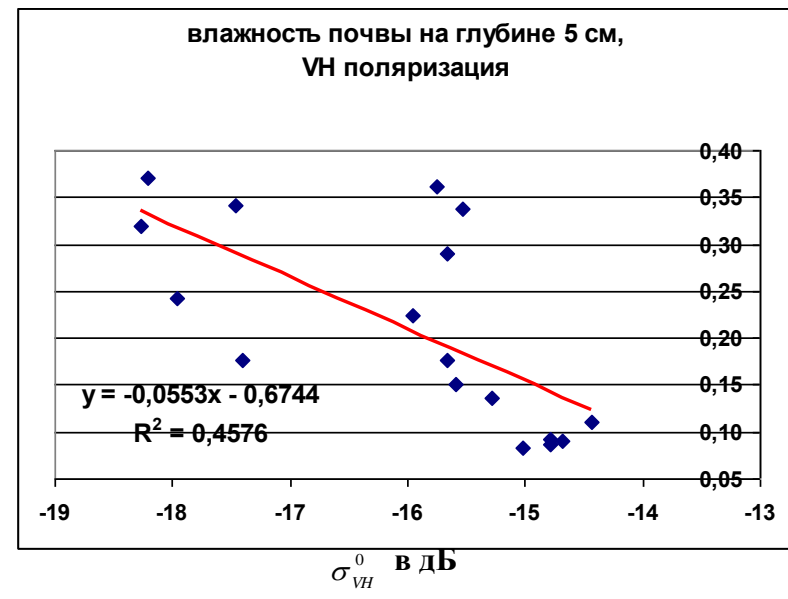
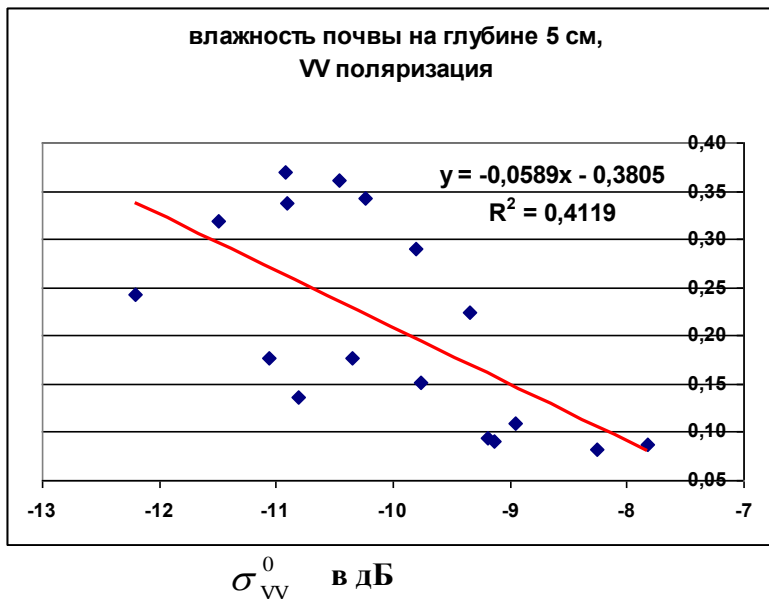


Рис.7. Регрессионные соотношения между σ_{VV}^0 [дБ] (слева) и σ_{VH}^0 [дБ] (справа) и влажностью почвы на глубине 5 см для станции Mejjannes-le-Clap

$$sm_{\text{почва } 5 \text{ см}} = -0,059 \cdot \sigma_{VV}^{\text{дБ}} - 0,38$$

$$R^2=0,41$$

(3)

$$sm_{\text{почва } 5 \text{ см}} = -0,055 \cdot \sigma_{VH}^{\text{дБ}} - 0,67$$

$$R^2=0,45$$

(4)

$R^2 = 0,35$. $R^2 > R^2_{\text{крит}}$ с вероятностью 95% можно утверждать о наличии 16 значимости данных уравнений регрессии

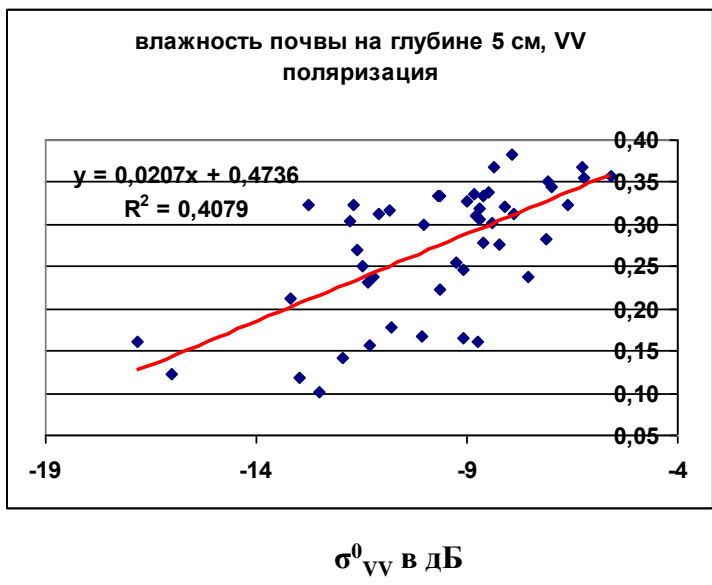


Коэффициент корреляции Спирмена между коэффициентом обратного рассеяния (КОР) и наземными измерениями влажности почвы (Германия)

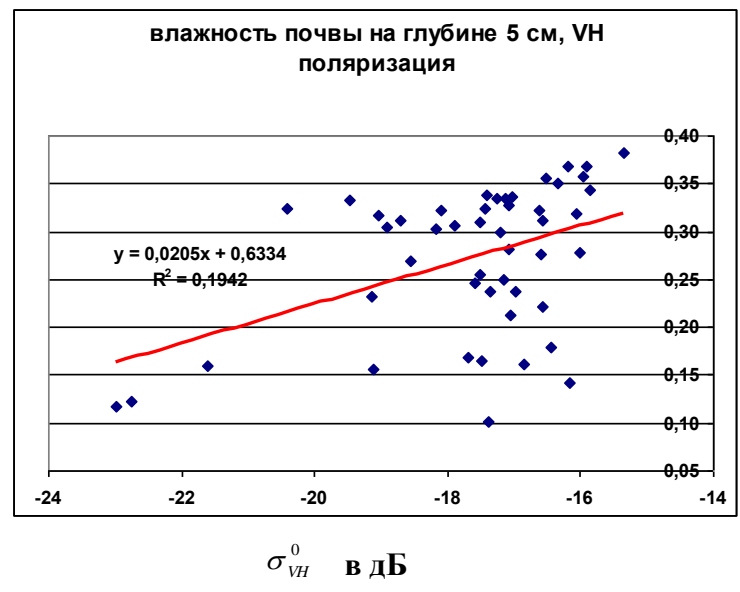
	Gevenich	Merzenhausen	Selhausen	Schoeneseiffen
влажность почвы, глубина 5 см				
σ_{VV}^0	$\rho_s = \mathbf{0,64}$, $p = \mathbf{10^{-6}}$	$\rho_s = 0,32$, $p = 0,012$	$\rho_s = 0,34$, $p = 0,001$	$\rho_s = 0,38$, $p = 0,014$
σ_{VH}^0	$\rho_s = 0,4$, $p = 0,003$	$\rho_s = 0,2$, $p = 0,09$	$\rho_s = 0,43$, $p = 0,001$	$\rho_s = -0,26$, $p = 0,07$
влажность почвы, глубина 20 см				
σ_{VV}^0	$\rho_s = \mathbf{0,64}$, $p = \mathbf{1}$	$\rho_s = 0,33$, $p = 0,01$	$\rho_s = 0,39$, $p = 0,003$	$\rho_s = 0,46$, $p = 0,004$
σ_{VH}^0	$\rho_s = 0,43$, $p = 10^{-4}$	$\rho_s = 0,25$, $p = 0,04$	$\rho_s = 0,36$, $p = 0,006$	$\rho_s = -0,2$, $p = 0,13$



Регрессионные соотношения между КОР и влажностью почвы на глубине 5 см для станции Gevenich (Германия)



Влажность почвы



Влажность почвы

Рис.8. Регрессионные соотношения между σ_{VV}^0 [дБ] и σ_{VH}^0 [дБ] и влажностью почвы на глубине 5 см для станции Gevenich

$$SM_{\text{почва, 5 см}} = 0,02 * \sigma_{VV}^{\text{дБ}} + 0,47 \quad (R^2 = 0,4)$$

$$SM_{\text{почва, 5 см}} = 0,02 * \sigma_{VH}^{\text{дБ}} + 0,63 \quad (R^2 = 0,19)$$

$$SM_{\text{почва, 5 см}} = 0,43 + 0,022 * \sigma_{VV}^{\text{дБ}} - 0,0027 * \sigma_{VH}^{\text{дБ}} \quad (R^2 = 0,43) \quad (5)$$

2-х факторная регрессия.

Коэффициент детерминации повышается при росте числа признаков.



Промежуточный вывод для связи между КОР и влажностью почвы

Показана сильная **отрицательная** корреляция ($p < 0,05$) между коэффициентом обратного рассеяния и влажностью почвы на глубине от 5 до 30 см для станции **Mejannes-le-Clap** (Франция). Коэффициент корреляции Спирмена на кросс-поляризации VH превышает коэффициент корреляции Спирмена на согласованной поляризации VV.

На двух других станциях во Франции CabrieresAvignon и Villevielle корреляция между КОР и влажностью почвы отсутствует.

Показана умеренная **положительная** корреляция ($p < 0,05$) между коэффициентом обратного рассеяния и влажностью почвы на глубине от 5, 20 см для станции **Gevenich** в Германии. Причем, коэффициент корреляции Спирмена на согласованной поляризации VV превышает коэффициент корреляции Спирмена на кросс-поляризации VH. Для остальных трех станций в Германии (Merzenhausen, Selhausen, Schoeneseiffen) корреляция между КОР и влажностью почвы слабая.



Краткий промежуточный итог по корреляции между КОР и наземными измерениями температуры и влажности почвы на 3-х станциях во Франции и 4-х станциях в Германии

- 1) Для станций во Франции получена положительная корреляция ($p < 0,05$) температуры почвы с КОР с бóльшим значением на согласованной поляризации, и отрицательная корреляция с влажностью почвы с бóльшим значением на кросс- поляризации. Для двух станций корреляция с влажностью почвы отсутствует,
- 2) Для станций в Германии получена отрицательная корреляция температуры почвы с КОР с бóльшим значением на согласованной поляризации, и положительная корреляция с влажностью почвы с бóльшим значением также на согласованной поляризации.

В литературе [1-3] есть данные только о положительной корреляции КОР с параметрами почвы (температуры и влажности).



Интерпретация

Факторы, влияющие на чувствительность РСА к влажности почвы:

- 1- параметры сенсора: длина волны, поляризация, угол обзора,
- 2- для обратного рассеяния от с/х территории: влажность почвы, шероховатость поверхности, диэлектрические и геометрические свойства растительности на местности на период съемки.



Влияние текстуры почвы на КОР



Jackson и Schmugge (1989) нашли, что молекулы воды поглощаются частицами почвы и эффективно лишают подвижности (связывают) их диполи, препятствуя связанной воде взаимодействовать с сигналом радара. Текстура почвы влияет на ^{из-за} изменений в диэлектрических свойствах почвы через влагоемкость текстурных составляющих почвы. Песчаные почвы содержат более высокое количество свободной воды (free water), чем глинистая почва (Srivastava et al., 2006). Таким образом, коэффициент корреляции Спирмена между КОР и влажностью почвы выше для песчаных почв (Blumberg et al., 2000).

В С-диапазоне уменьшение содержания глины в почве приводит к увеличению чувствительности сигнала радара к влажности почвы (Ulaby et al., 1978), что опять же связано с большим количеством свободной воды. Полную влажность W определяют из соотношения $W = W_t + W_u$, где W_u - объемная доля свободной воды и W_t - объемная доля связанной воды. В незамерзшей почве часть влаги находится в связанном состоянии, а часть - в свободном. Максимальное содержание связанной влаги W_t (объемная доля) в почве является одной из основных характеристик почвы. Диэлектрическая проницаемость связанной влаги ниже, чем у свободной воды.

Зависимость диэлектрической проницаемости свободной влаги от частоты и температуры хорошо описывает модель Дебая (Шарков, 1995).

В работе (Беляева и др., 2003) предложена эмпирическая формула для оценки значений максимального содержания связанной влаги в почве W_t' как функции процентного содержания глины C (clay) и гумуса H (organic). Формула основана на диэлектрических данных сельскохозяйственных почв Западной Сибири и имеет следующий вид:

$$W_t' = (0,22 \pm 0,03) \cdot C + (1,25 \pm 0,21) \cdot H \quad (6)$$

Mejannes-le-Clap	$W_t' \in (0,06-0,083)$,
CabrieresAvignon, Villevielle	$W_t' \sim (0,058-0,079)$

Gevenich, Merzenhausen	$W_t' \sim (0,049 - 0,066)$
Selhausen	$W_t' \sim (0,055 - 0,073)$
Schoeneseiffen	$W_t' \sim (0,053 - 0,071)$



Влияние текстуры почвы на КОР для станций во Франции

Для станций во Франции количество свободной воды в почве практически одинаково, исходя из формулы (6), в которую входят глина и гумус. Но нет учета процентного содержания песка и ила, оказывающий существенное влияние на содержание свободной воды в почве.

	Песок, %	Ил, %
Mejannes-le-Clap	42	34
CabrieresAvignon, Villevielle	37	44

- 1) 5% разница в содержании песка и 10% - в содержании ила, возможно, является одной из причин, почему для станции Mejannes-le-Clap сильная корреляция КОР с температурой и влажностью почвы, тогда как для станций CabrieresAvignon и Villevielle умеренная корреляция с температурой и отсутствие корреляции с влажностью. Кроме того есть различие в надпочвенной растительности. Для станции Mejannes-le-Clap – это трава, а для станций CabrieresAvignon и Villevielle – это сельхозугодья, неорошаемые.
- 2) Для станций CabrieresAvignon и Villevielle механический состав почвы одинаков. Но для станции Villevielle нет корреляции КОР с температурой почвы на кросс- поляризации. Возможной причиной этого различия является, что в надпочвенной растительности у Villevielle, помимо сельхозугодий, есть деревья и кусты.



Влияние текстуры почвы на КОР для станций в Германии

Для станций в Gevenich, Merzenhausen количество свободной воды в почве несколько превышает это количество для станций Selhausen и Schoeneseiffen. Кроме того, для станций Gevenich и Merzenhausen на 4% больше песка и 3% меньше ила в сравнении со станцией Selhausen.

Gevenich, Merzenhausen	$W'_t \sim (0,049 - 0,066)$
Selhausen	$W'_t \sim (0,055 - 0,073)$
Schoeneseiffen	$W'_t \sim (0,053 - 0,071)$

	Песок, %	Ил, %
Gevenich, Merzenhausen	41	37
Selhausen	37	40
Schoeneseiffen	42	38

Следовало бы ожидать более высокое значение ККС для станций Gevenich и Merzenhausen, исходя от количества свободной воды в почве. Что и происходит для станции Gevenich. Но не для станции Merzenhausen, несмотря на ту же механическую структуру почвы.

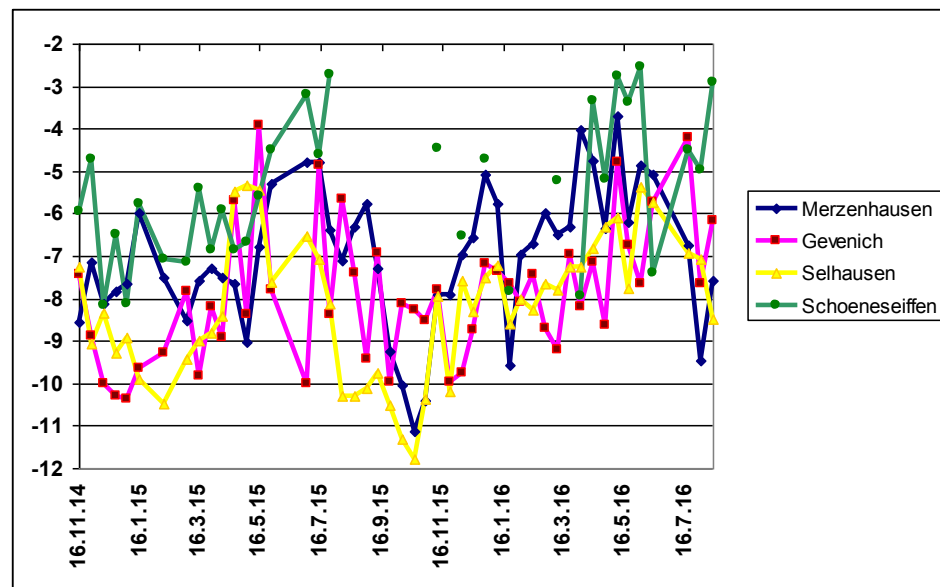
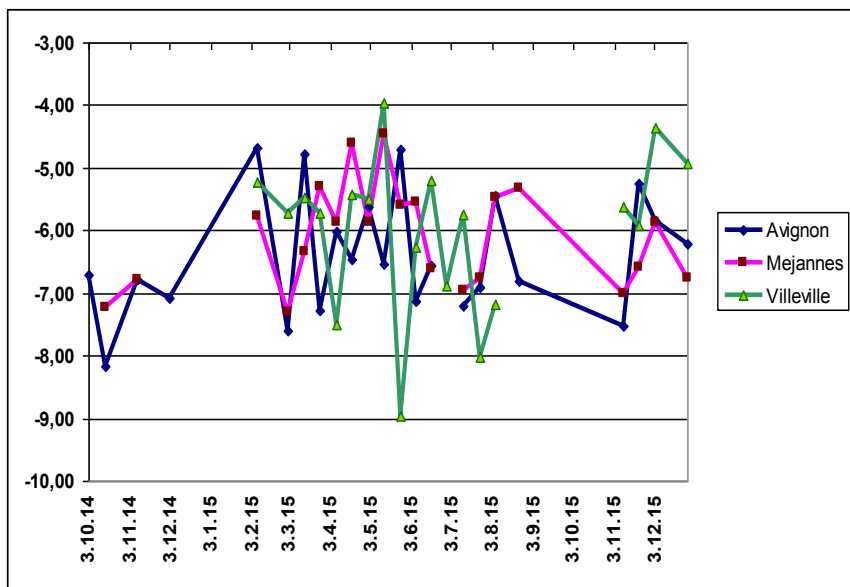


Деполяризационное отношение, (Ulaby et al., 1986)



$$\chi = \sigma_{VH}^0 (dB) - \sigma_{VV}^0 (dB) \quad (7)$$

Деполяризационное отношение чувствительно как к шероховатости поверхности (см) (Ulaby et al., 1986), так и к высоте с/х культур (см) на полях (Gherboudj et al., 2011). В соответствии с результатами авторов (Gherboudj et al., 2011), чем меньше высота растений при фиксированной шероховатости поверхности, тем меньше χ . И чем больше шероховатость поверхности при фиксированной высоте растений, тем меньше χ .



	Avignon	Mejannes	Villeville
ср. знач. X	-6,41	-6,52	-5,70

	Merzenhausen	Gevenich	Selhausen	Schoeneseiffen
ср. знач. X	-7,02	-7,91	-8,19	-5,57

Рис. 9. Деполяризационное отношение для станций во Франции (слева) и Германии (справа)



Обратное рассеяние от поверхности почвы, покрытой растительностью, в соответствии с моделью водяного облака (Water Cloud Model- WCM) (Attema, Ulaby, 1978) представляется следующей формулой:

$$\sigma^0 = \sigma_{veg}^0 + \sigma_{veg+soil}^0 + \tau^2 \cdot \sigma_{soil}^0$$

σ_{veg}^0 - радарное обратное рассеяние, вызванное только растительностью (объемное рассеяние),

$\sigma_{veg+soil}^0$ - многократное взаимодействие, включающее как растительность, так и почву (можно пренебречь в случае слабого переотражения между растительностью и почвой),

$\tau^2 \cdot \sigma_{soil}^0$ - рассеяние от голой почвы, ослабленное слоем растительности (поверхностное рассеяние);

τ^2 - двунаправленный удельный коэффициент пропускания растительностью, ослабляющий микроволны, когда они дважды проходят через растительный покров.

Значение σ_{veg}^0 можно определить из соотношения (Attema, Ulaby, 1978):

$$\sigma_{veg}^0 = A \cdot w_c \cdot \cos \theta \cdot (1 - \tau^2) \quad \tau^2 = \exp(-2 \cdot B \cdot w_c \cdot \sec \theta)$$

где A и B – параметры, зависящие от геометрической структуры растительного покрова (эмпирические параметры), а также от поляризации и длины волны сенсора; w_c - VWC- vegetation water content; θ - угол обзора.

w_c определяем из эмпирической зависимости между деполаризационным отношением $\sigma_{VH}^0 / \sigma_{VW}^0$ и w_c , полученной для с/х культуры 'соя' в работе (Roo, Ulaby, Dobson, 1998) для волн С-диапазона:

$$\frac{\sigma_{VH}^0}{\sigma_{VW}^0} = b_1 \cdot w_c^{b_2} \quad b_1=0,2766 \text{ и } b_2=0,3404$$

Параметры A и B взяты из статьи (Gherboudj et al., 2011) для С- диапазона, угла обзора 45° и трех с/х культур в период зрелости (пшеница, горох, чечевица). Учет влияния растительности не привел к увеличению коэффициента корреляции Спирмена между σ^0 и наземными измерениями температуры и влажности почвы .

Заключение

- 1) Показано наличие как положительной, так и отрицательной корреляции коэффициента обратного рассеяния с наземными измерениями температуры и влажности почвы.
- 2) Показано, что корреляция зависит от механического состава почвы и шероховатости поверхности,
- 3) Получены регрессионные соотношения между КОР и параметрами почвы в случае высокого коэффициента детерминации.

СПАСИБО!



ЛИТЕРАТУРА



1. *Srivastava H.S., Patel P., Navalgund R.R.* How far SAR has fulfilled its expectation for soil moisture retrieval// SPIE Digital Library. 6410. 2006. Nov.13-17. Paper No. 64100. P.1-12.
2. *Khaldoune J., van Bochove E., Bernier M., Nolin M.C.* An approach for mapping frozen soil of agricultural land under snow cover using RADARSAT-1 and RADARSAT-2// IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceeding. 2008. 3. P.III-382-III-385.
3. *Khaldoune J., van Bochove E., Bernier M., Nolin M.C.* Mapping Agricultural Frozen Soil on the Watershed Scale Using Remote Sensing Data. // Applied and Environmental Soil Science. Vol. 2011, Article ID 193237, 16 p. doi: 10.1155/2011/193237
4. Шарков Е.А. Анализ и развитие релаксационных моделей диэлектрических свойств воды для задач дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. - 1995. №6. - С.18-28
5. Беляева Т.А , Бобров А.П, Бобров П.П., Галлеев О.В., Мандрыгина В.Н. Определение параметров моделей диэлектрической проницаемости почв с различной плотностью и различным содержанием гумуса по данным экспериментальных измерений в частотном диапазоне 0,1-20 ГГц// Иссл. Земли из космоса, 2003, №5, с. 28-34
6. *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.
7. Oh, Y., Sarabandi K., Ulaby F.T. An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces// IEEE Trans. GRS, 30, pp 370-381, 1992.
8. Ulaby F.T., Moore R.K., Fung A.K. Microwave remote sensing: active and passive. From Theory to Application, Vol. III. Dedham, MA: Artech House. 1986.
9. I. Gherboudj, R. Magagi, A. A. Berg, B. Toth. Soil moisture retrieval over agricultural fields from multi-polarized and multi-angular RADARSAT-2 SAR data// Remote Sensing of Environment 115 (2011) 33–43.