

Связь радарных данных Sentinel 1 с наземными измерениями температуры почвы

Н.В. Родионова

*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
Фрязино, 141190, Россия
E-mail: rnv@ire.rssi.ru*

В работе исследуется связь радарных данных Sentinel 1 с температурой почвы, измеренной на пяти наземных станциях, находящихся на территории Финляндии, Польши и Франции, за период 2014–2016 гг. Наземные измерения температуры и влажности почвы доступны на сайте International soil moisture network (<https://ismn.geo.tuwien.ac.at>). Наземные станции располагаются на широтах от 43° до 67° с.ш. и различаются почвами от почв хвойных бореальных лесов (Финляндия) до торфяных болотистых почв в Польше и почв, покрытых травой или с.-х. культурами, во Франции. Показано наличие положительной корреляции коэффициента обратного рассеяния с температурой почвы на глубине 5; 10; 20 и 30 см для четырех из пяти станций наземных измерений параметров почвы (отсутствует корреляция только для станции в Польше для болотистой местности). Показано, что при наличии корреляции для обеих поляризаций (VV и VH) коэффициент корреляции Спирмена ρ_s для согласованной поляризации превышает ρ_s для кросс-поляризации. В случаях наличия сильной связи между переменными построены регрессионные соотношения, связывающие коэффициент обратного рассеяния с температурой почвы. Рассмотрено влияние надпочвенной растительности и механического состава почвы на коэффициент корреляции.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, радарные данные С-диапазона, поляризация, температура почвы, коэффициент обратного рассеяния, коэффициент корреляции Спирмена

Одобрена к печати: 21.06.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-135-148

Введение

В данной работе рассмотрена корреляционная связь между коэффициентом обратного рассеяния (КОР) и параметрами почвы для пяти станций на территории Европы (Финляндия, Польша, Франция) с различной текстурой почв от почв хвойных бореальных лесов (Финляндия) до торфяных болотистых почв в Польше и почв, покрытых травой или с.-х. культурами, во Франции 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.

В работе (Khaldoune et al., 2008) была установлена эмпирическая зависимость между коэффициентом обратного рассеяния и температурой почвы на глубине 5 см. Измерения проводились с помощью космического аппарата Radarsat 1 в С-диапазоне для HH-поляризации для сельскохозяйственных полей в Канаде. Целью работы авторов статьи (Khaldoune et al., 2008) был анализ взаимодействия между различными параметрами наземных измерений почвы и радарным КОР, особенно для зимних условий при промерзании почвы, покрытой сухим снегом. Полученные авторами (Khaldoune et al., 2008) регрессионные соотношения между КОР и наземными измерениями температуры почвы на глубине 5 см показали положительную корреляцию между этими величинами с разными коэффициентами детерминации в зависимости от текстуры почвы. Наименьший коэффициент детерминации 0,2–0,35 был для суглинистых почв.

Температурные зависимости КОР на НН-поляризации в L-диапазоне (PALSAR) исследовались авторами статьи (Музалевский и др., 2013) для почвенного покрова арктической тундры в условиях мерзлого деятельного слоя. Показана положительная корреляция между КОР и температурой мерзлой почвы на глубине 5 см.

Наземные данные

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: <https://ismn.geo.tuwien.ac.at/>. Были выбраны пять станций на территории Западной Европы, для которых период проведения измерений совпадал с имеющейся на этот же период времени радарной информацией Sentinel 1 (S1). Характеристики станций, включенных в обработку, даны в *табл. 1*. Это высокоширотная станция SOD103 в Финляндии с почвами бореальных хвойных лесов с высоким содержанием глины и органики. Станции Biebrza-S-1, -soil-8 в Польше (болотные торфяники), для которых характерно наличие очень высоких значений влажности почвы, превышающих почти в два раза значения влажности почвы (ВП) для других рассмотренных станций. Для станций во Франции наибольшим отличием в текстуре почвы является очень малое содержание органики, а также меньшее содержание глины и большее содержание песка в сравнении с почвами на станциях SOD103 и Biebrza-S-1.

Таблица 1. Информация о наземных станциях, включенных в обработку

Станции	Широта (с. ш.), град.	Долгота (в. д.), град.	Тип растительности	Текстура почвы, %			
				глина	органика	песок	ил
SOD103, Финляндия	67,35917	26,68594	Хвойные деревья, вечнозеленые	40	33,6	20	40
Biebrza-S-1, -soil-8, Польша	53,6328	22,97976	Трава	32	39,4	35	33
SMOSMANIA CabrieresAvignon, Франция	43,88367	5,16483	Сельхозугодья, неорошаемые	19	2,13	37	44
Mejannes-le-Clap, Франция	44,222	4,34483	Трава	24	1,61	42	34
Villevielle, Франция	43,79517	4,09083	Сельхозугодья, неорошаемые/ деревья или кусты	19	2,13	37	44

На *рис. 1* приведены графики изменений температуры воздуха, температуры и влажности почвы на глубине 5 см во времени по наземным измерениям для рассматриваемых пяти станций. Для станции SOD103 измерения даны за период 16.10.2015–10.10.2016, для станции Biebrza — 26.4.2015–7.6.2016, для станции CabrieresAvignon — 3.10.2014–27.12.2015, для станции Mejannes-le-Clap — 15.10.2014–23.8.2015 и для стан-

ции Villevielle — 6.2.2015–27.12.2015. Отсчеты на графиках следуют через 12 дней в соответствии с сеансами съемки S1 каждой территории. Кроме того, для одной из станций, а именно CabrieresAvignon, показан временной ход значений температуры почвы на глубинах 5; 10; 20 и 30 см.

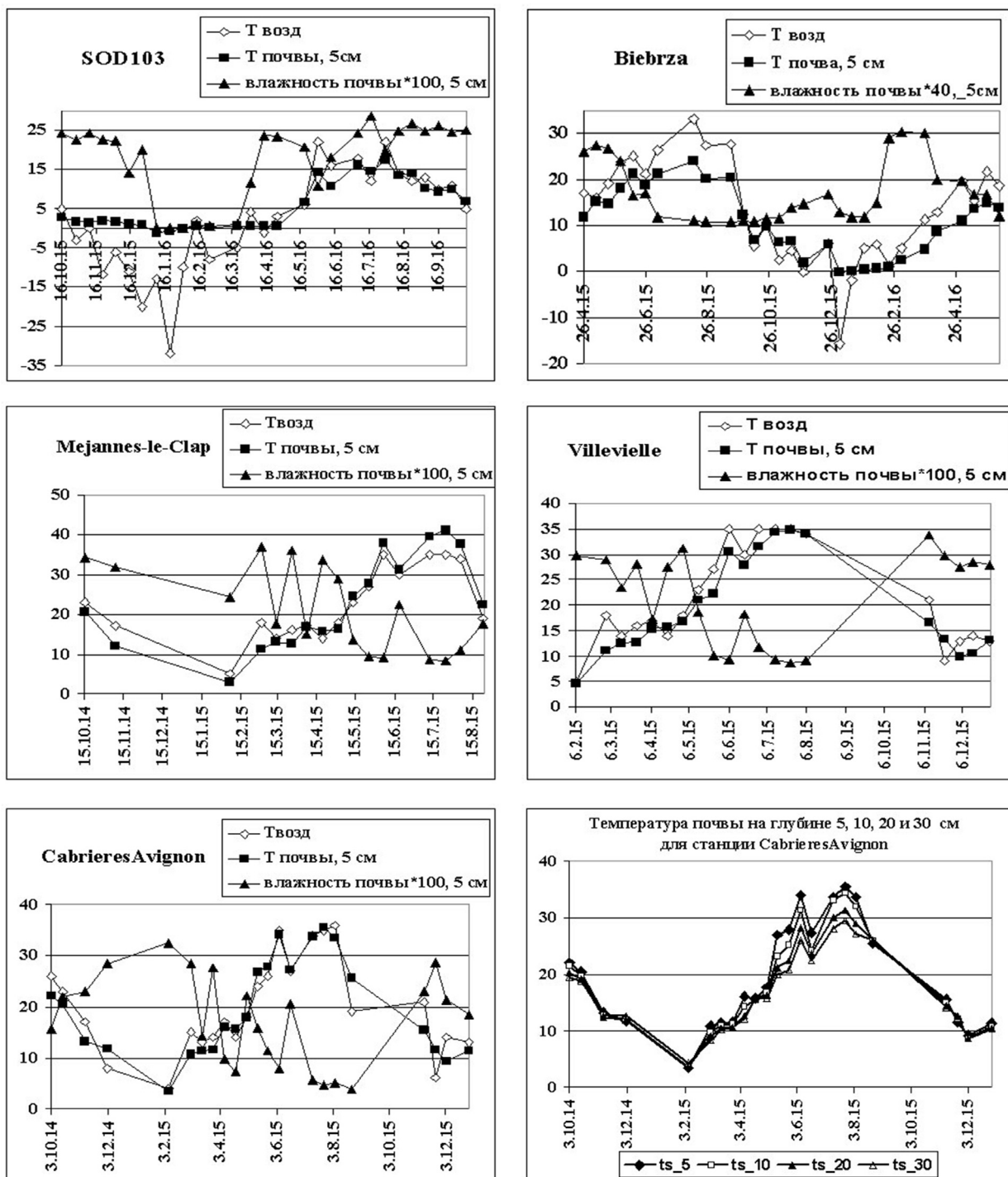


Рис. 1. Графики наземных измерений температуры и влажности почвы на глубине 5 см и температуры воздуха для станций SOD103, Biebrza, Mejanne-le-Clap, Villevielle и CabrieresAvignon и график изменения температуры почвы на глубинах 5, 10, 20 и 30 см для станции CabrieresAvignon

Следует отметить, что для станций во Франции в условиях средиземноморского климата годовой ход температуры почвы весьма близок к годовому году температуры воздуха.

Следует также отметить характерное отличие временных изменений температуры и влажности почвы для более северных станций (Финляндия, Польша), где наблюдается положительная корреляция между этими параметрами почвы, и для южных станций (Франция) с отрицательной корреляцией между температурой и влажностью почвы, что подтверждается приведенными в *табл. 2* значениями коэффициента корреляции Спирмена ρ_s (Лагутин, 2003) между переменными из наземных измерений. Коэффициент корреляции Спирмена применяют как при линейной, так и нелинейной связи между переменными. Вычисления ρ_s выполнялись с помощью свободно распространяемого пакета AtteStat. В *табл. 2* даны значения ρ_s и p -значения (доверительный интервал 95%) для пяти наземных станций (значения, выделенные полужирным шрифтом, указывают на наличие корреляции). Вычислялась корреляция между температурой воздуха и температурой почвы на глубине 5 см и между температурой и влажностью почвы на глубине 5 см.

Таблица 2. Коэффициент корреляции Спирмена между переменными из наземных измерений на глубине 5 см

Параметры	Станции				
	SOD103	Biebrza	CabrieresAvignon	Mejannes-le-Clap	Villevielle
ρ_s					
$T_{\text{возд}} - T_{\text{почва 5 см}}$	0,87 ($p = 2,3 \cdot 10^{-9}$)	0,9 ($p = 1,7 \cdot 10^{-13}$)	0,9 ($p = 1,7 \cdot 10^{-9}$)	0,9 ($p = 3,2 \cdot 10^{-7}$)	0,9 ($p = 1,7 \cdot 10^{-7}$)
$T_{\text{почва 5 см}} - \text{ВП}_{5 \text{ см}}$	0,7 ($p = 7,2 \cdot 10^{-5}$)	-0,15 ($p = 0,44$)	-0,7 ($p = 0,00012$)	-0,8 ($p = 4,4 \cdot 10^{-5}$)	-0,7 ($p = 0,00046$)

Сильная положительная связь между температурой воздуха и температурой почвы на глубине 5 см есть для всех пяти станций. Между температурой и влажностью почвы на глубине 5 см есть сильная положительная связь для станции SOD103 (Финляндия) и сильная отрицательная связь для станций во Франции при отсутствии корреляционной связи для станции в Польше.

Радарные данные Sentinel 1

В работе используются 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.

Среднее значение коэффициента обратного рассеяния σ^0 от поверхности вычислялось для каждой станции по выборке порядка 30 точек. В *табл. 3* для каждой станции приведены данные по количеству обработанных сеансов съемки S1, углу обзора и количеству точек при усреднении КОР по профилю.

Таблица 3. Данные по сеансам съемки

Станции	Количество обработанных сеансов съемки $S1$	Угол обзора, град.	Период съемки	Количество точек в профиле
SOD103	28	37,5	16.10.15–10.10.16	30
Biebrza-S-1, -soil-8	29	38	26.4.15–7.6.16	25
CabrieresAvignon	23	45	3.10.14–27.12.15	35
Mejannes-le-Clap	17	42	15.10.14–23.8.15	30
Villevielle	20	40	6.2.15–27.12.15	20

На рис. 2 по каждой станции показаны графики изменения среднего значения коэффициента обратного рассеяния σ^0 для выделенных профилей на поверхности за период съемки с временным разрешением 12 дней для поляризаций VV и VH. Вертикальными линиями на графиках показаны отклонения от среднего — значения СКО.

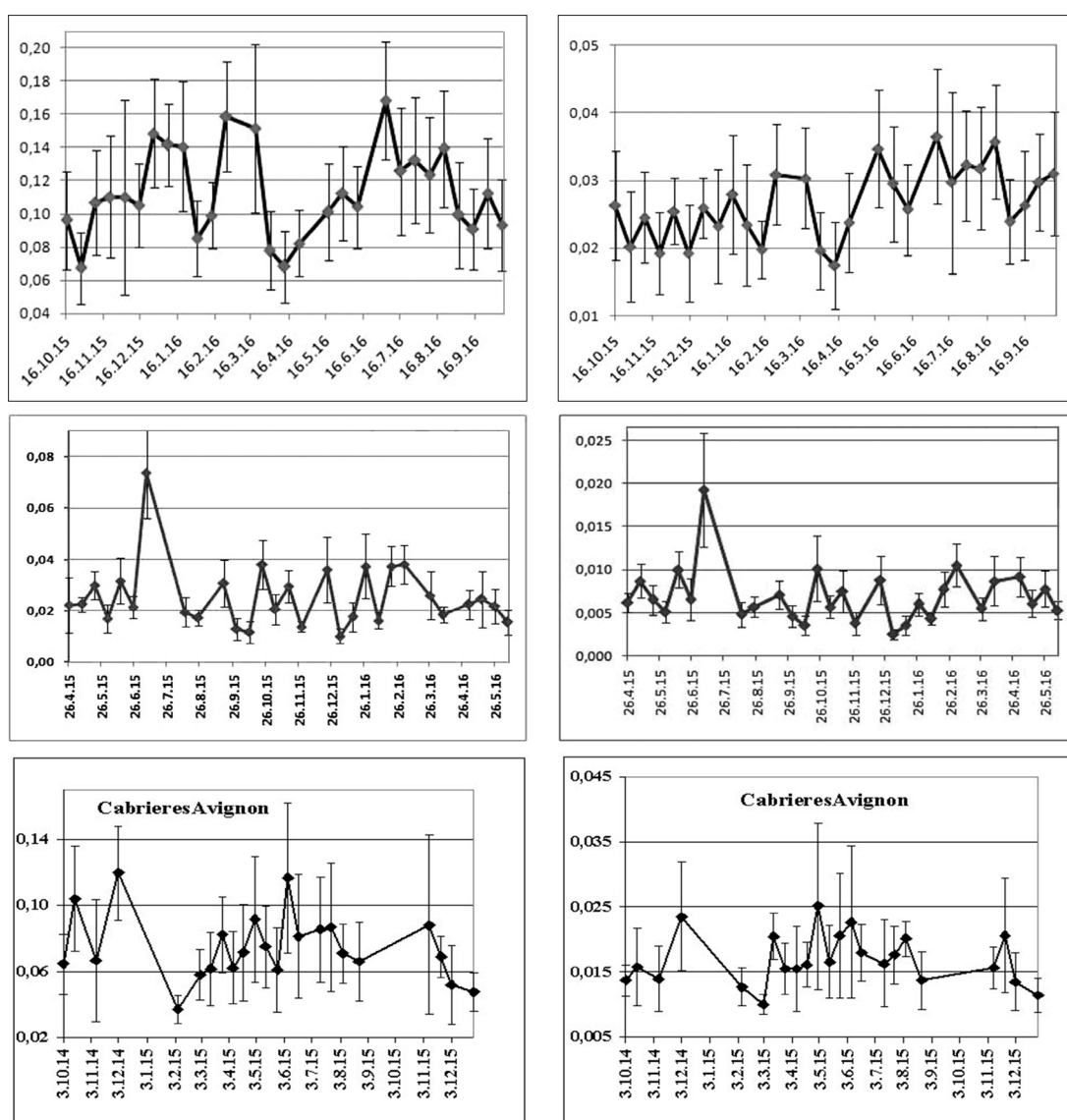


Рис. 2. Изменение среднего значения коэффициента обратного рассеяния для выделенных профилей на поверхности за период съемки с временным разрешением 12 дней. VV поляризация — слева, VH поляризация — справа. Вертикальные линии — значения СКО

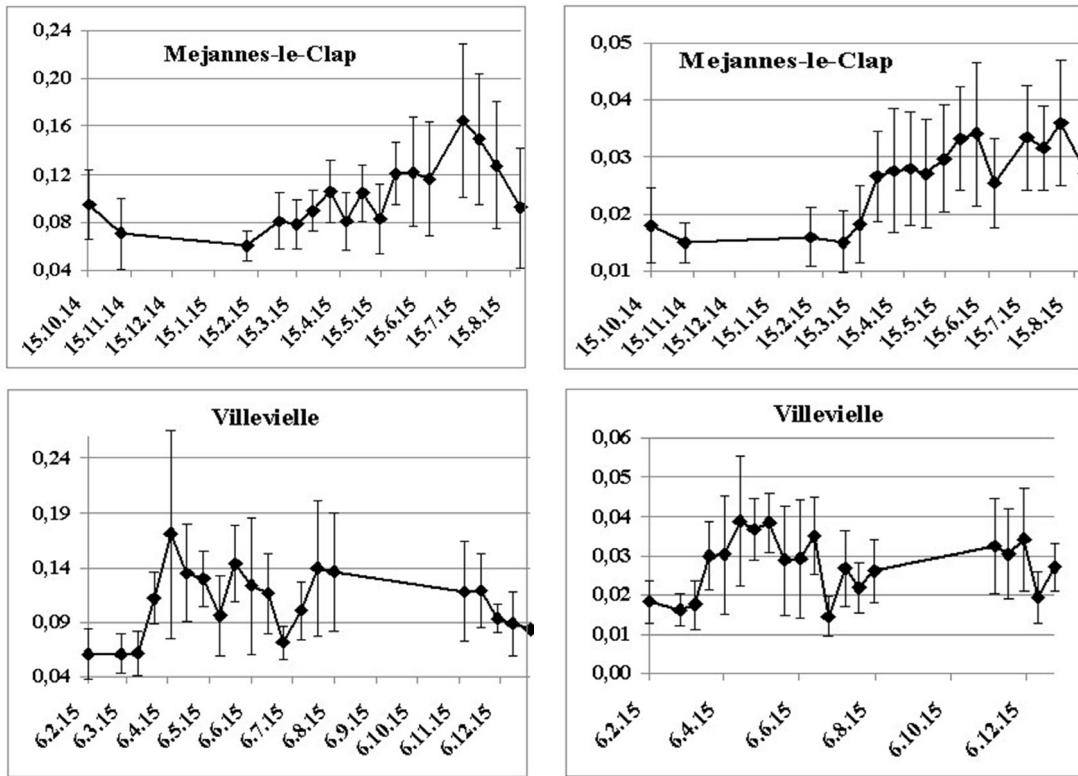


Рис. 2 (продолжение). Изменение среднего значения коэффициента обратного рассеяния для выделенных профилей на поверхности за период съемки с временным разрешением 12 дней. VV поляризация — слева, VH поляризация — справа. Вертикальные линии — значения СКО

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

Для определения связи между коэффициентом обратного рассеяния и наземными измерениями температуры почвы был подсчитан коэффициент корреляции Спирмена ρ_s между этими переменными. В табл. 4 приведены значения ρ_s и p -значения для пяти наземных станций на двух поляризациях (значения, выделенные полужирным шрифтом, указывают на наличие корреляции; пустые ячейки соответствуют отсутствию наземных данных).

Таблица 4. Коэффициент корреляции Спирмена ρ_s между коэффициентом обратного рассеяния и наземными измерениями температуры почвы

		Станции				
		SOD103	Biebrza	CabrieriesAvignon	Mejanne-le-Clap	Villevielle
T^0 , почва 5 см						
σ_{VV}^0	ρ_s	0,13	0,1,	0,5	0,9	0,55
	p	0,5	0,6	0,01	10^{-7}	0,01
σ_{VH}^0	ρ_s	0,55	0,3	0,48	0,8	0,07
	p	0,002	0,1	0,02	10^{-4}	0,8
T^0 , почва 10 см						
σ_{VV}^0	ρ_s	0,19	0,02	0,5	0,91	0,56
	p	0,33	0,9	0,01	10^{-7}	0,01

σ_{VH}^0	ρ_s	0,57	0,23	0,45	0,79	0,08
	p	0,0016	0,2	0,03	10^{-4}	0,8
T^0 , почва 20 см						
σ_{VV}^0	ρ_s		-0,02	0,51	0,88	0,52
	p		0,9	0,01	10^{-6}	0,02
σ_{VH}^0	ρ_s		0,17	0,46	0,76	0,09
	p		0,4	0,02	10^{-4}	0,7
T^0 , почва 30 см						
σ_{VV}^0	ρ_s			0,52	0,85	0,53
	p			0,01	10^{-5}	0,02
σ_{VH}^0	ρ_s			0,46	0,74	0,1
	p			0,03	0,0007	0,7

Значение ρ_s для станции Mejjannes-le-Clap свидетельствует о сильной положительной связи σ^0 и T^0 почвы, а значение уровня p указывает на высокую статистическую значимость связи между переменными. Значение коэффициента Спирмена для остальных станций (кроме Biebrza) свидетельствует об умеренной положительной связи между переменными с высокой статистической значимостью связи между ними, причем для станции Villevielle данный вывод справедлив только для согласованной поляризации, а для станции SOD103 — только для кросс-поляризации.

На основе приведенных в *табл. 4* значений ρ_s можно сделать следующие выводы:

- есть наличие положительной корреляции ($p < 0,05$) коэффициента обратного рассеяния с температурой почвы для четырех из пяти станций наземных измерений параметров почвы (отсутствует корреляция только для станции в Польше с болотистой местностью);
- при наличии корреляции для обеих поляризаций коэффициент корреляции Спирмена ρ_s для согласованной поляризации превышает ρ_s для кросс-поляризации;
- для станции SOD103 (хвойный лес) есть корреляция только для кросс-поляризации.

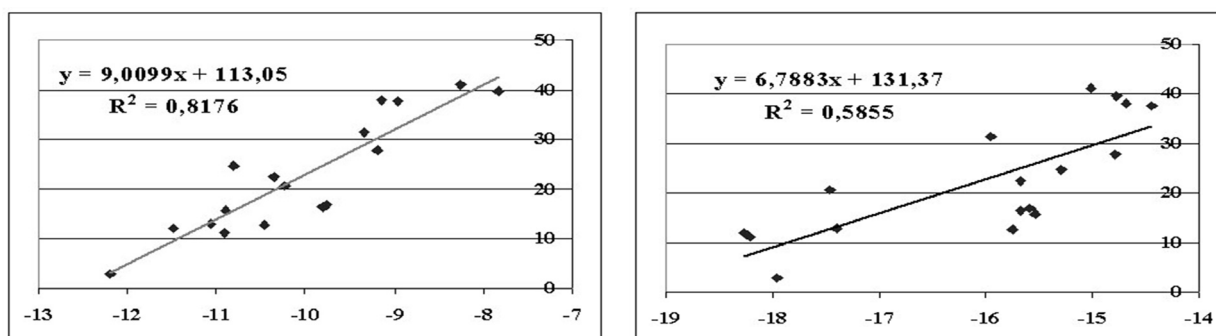


Рис. 3. Регрессионные соотношения между σ_{VV}^0 [дБ] (слева) и σ_{VH}^0 [дБ] (справа) и температурой почвы на глубине 5 см для станции Mejjannes-le-Clap

При наличии сильной связи между переменными можно построить регрессионные соотношения, связывающие коэффициент обратного рассеяния с температурой почвы. В данном случае это сделано для станции Mejjannes-le-Clap (рис. 3), для которой, к примеру, для почвы на глубине 5 см, $\rho_s = 0,9$ для VV-поляризации и $\rho_s = 0,8$ для VH-поляризации. Регрессионные соотношения представляют собой линейную зависимость между переменной $x = \sigma^0$ [дБ] и переменной $y = T^0$ — температурой почвы.

Коэффициент детерминации $R^2_{расч}$ 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 $N=17$ (N — количество сеансов съемки) и числа переменных $k=2$ дает критическое значение $R^2_{крит} = 0,349$. Поскольку для обоих уравнений выполняется соотношение $R^2_{расч} > R^2_{крит}$, то с вероятностью 95% можно утверждать о наличии значимости уравнений регрессии:

$$T^0_{почва, 5 см} = 9,009 \sigma_{VV}^{\partial B} + 113,0, \quad (1)$$

$$T^0_{почва, 5 см} = 6,788 \sigma_{VH}^{\partial B} + 131,3. \quad (2)$$

При умеренном уровне связи между переменными, как, например, для станции CabrieresAvignon, регрессионные соотношения показаны на *рис. 4*.

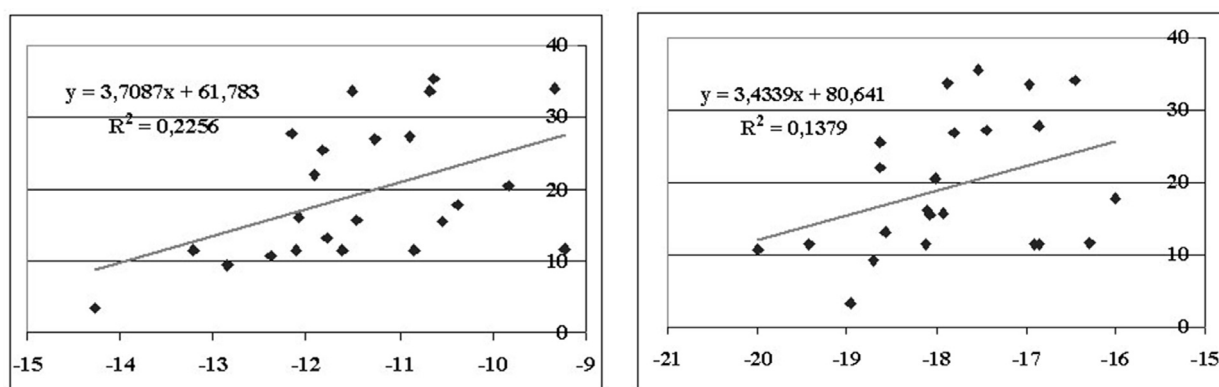


Рис. 4. Регрессионные соотношения между σ_{VV}^0 [дБ] (слева) и σ_{VH}^0 [дБ] (справа) и температурой почвы на глубине 5 см для станции CabrieresAvignon

Коэффициент детерминации $R^2_{расч}$ составляет для данных регрессий 0,225 в случае согласованной поляризации и 0,137 — для кросс-поляризации. Таблица для тестирования на уровне значимости 5% в случае выборки $N=23$ и $k=2$ дает критическое значение $R^2_{крит} = 0,259$.

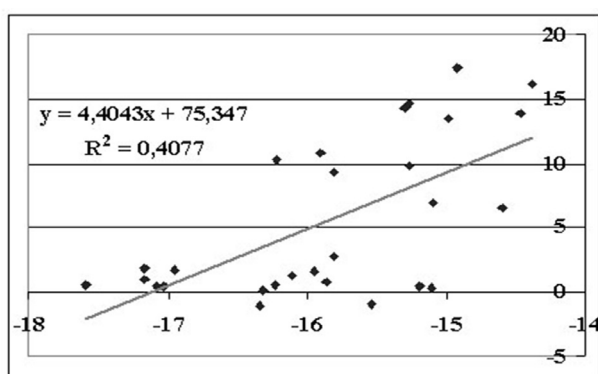


Рис. 5. Регрессионное соотношение между σ_{VH}^0 [дБ] и температурой почвы на глубине 5 см для станции SOD103

Поскольку для обоих уравнений выполняется соотношение $R^2_{расч} < R^2_{крит}$, то с вероятностью 95% можно утверждать об отсутствии значимости данных уравнений регрессии. Аналогичный вывод справедлив для станции Villevielle.

Для станции SOD103 с почвами бореального леса есть умеренная связь КОР VH-поляризации с температурой почвы на глубине 5 и 10 см при высокой статистической значимости связи между переменными (*табл. 4*). Регрессионные соотношения для SOD103 показаны на *рис. 5* для связи КОР VH-поляризации с температурой почвы на глубине 5 см.

Коэффициент детерминации $R_{расч}^2$ составляет для данной регрессии 0,407. Таблица для тестирования на уровне значимости 5% в случае выборки $N=28$ и числа переменных $k=2$ дает критическое значение $R_{крит}^2=0,213$. Поскольку выполняется соотношение $R_{расч}^2 > R_{крит}^2$, то с вероятностью 95% можно утверждать о наличии значимости данного уравнения регрессии.

Влияние надпочвенной растительности на связь КОР с температурой почвы

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

$$\sigma^0 = \sigma_{veg}^0 + \sigma_{veg+soil}^0 + \tau^2 \sigma_{soil}^0, \quad (3)$$

где σ_{veg}^0 — радарное обратное рассеяние, вызванное только растительностью (объемное рассеяние); $\sigma_{veg+soil}^0$ — многократное взаимодействие, включающее как растительность, так и почву; $\tau^2 \sigma_{soil}^0$ — рассеяние от голой почвы, ослабленное слоем растительности (поверхностное рассеяние); τ^2 — двунаправленный удельный коэффициент пропускания растительностью при эффекте ослабления микроволн, когда они дважды проходят через растительный покров. Членом $\sigma_{veg+soil}^0$ в выражении (3) можно пренебречь в случае слабого переотражения между растительностью и почвой (для станций в Польше и Франции).

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

$$\sigma_{veg}^0 = Aw_c \cdot \cos \theta \cdot (1 - \tau^2), \quad (4)$$

$$\tau^2 = \exp(-2Bw_c \cdot \sec \theta), \quad (5)$$

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.

Для оценки значения w_c , входящего в формулы (4) и (5), воспользуемся эмпирической зависимостью между деполаризационным отношением $\sigma_{VH}^0/\sigma_{VV}^0$ и w_c , полученной для с.-х. культуры соя в работе (De Roo, Ulaby, Dobson, 1998) для волн С-диапазона:

$$\frac{\sigma_{VH}^0}{\sigma_{VV}^0} = b_1 w_c^{b_2} \quad (6)$$

со значениями $b_1 = 0,2766$ и $b_2 = 0,3404$.

Чтобы оценить значения параметров A и B в выражениях (4) и (5), воспользуемся данными, приведенными в статье (Gherboudj et al., 2011) для С-диапазона, углов обзора 30° и 45°

и трех с.-х. культур в период зрелости (пшеница, горох, чечевица). В данной работе использовались параметры для угла 45° и с.-х. культуры горох, на *рис. 6* показан график изменения τ^2 по формуле (5) для наземной станции CabrieresAvignon.

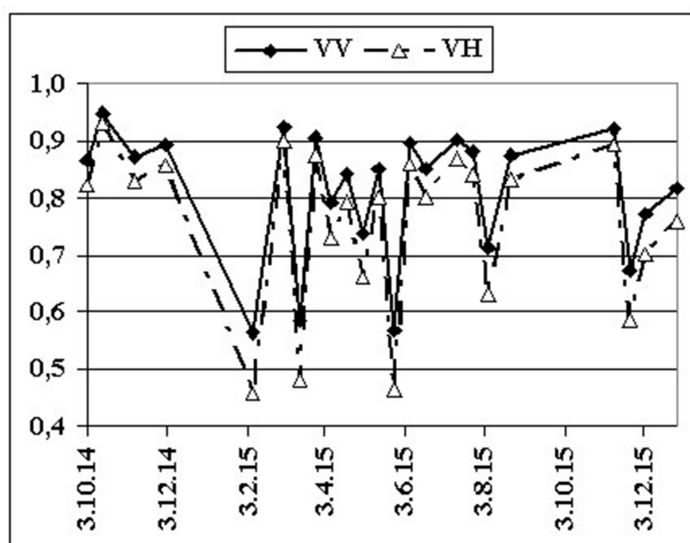


Рис. 6. Изменение значений τ^2 для станции CabrieresAvignon

Чем меньше значение τ^2 , тем больше ослабляется радарный сигнал, проходя через растительный покров. На основании графика на *рис. 6* наибольшее ослабление радарного сигнала из-за растительного покрова отмечается весной и в начале лета, причем более сильно ослабляется сигнал VH-поляризации. Помимо ослабления сигнала при прохождении через растительный покров к поверхности почвы и обратно есть и объемное рассеяние сигнала растительностью, определяемое параметром σ_{veg}^0 в формуле (3). Вычисление данного значения по формуле (4) показывает незначительность σ_{veg}^0 в сравнении σ_{soil}^0 даже после умножения σ_{soil}^0 на τ^2 . Учет влияния вегетации на σ_{soil}^0 по формулам (3)–(6) не привел к увеличению коэффициента корреляции Спирмена между σ_{soil}^0 и наземными измерениями температуры почвы. Результат получен для станций во Франции и Польше.

Для станции SOD103 (Финляндия) в уравнении (3) необходим учет всех трех слагаемых. Влияние почвы на КОР уменьшено в данном случае из-за объемного рассеяния лесным покровом, определяемого кросс-поляризацией, и переотражения ствол – подстилающая поверхность. Последнее можно оценить только при наличии данных с полной поляризацией, чего нет у S1-данных.

Однако в ряде работ отмечается, что для хвойных лесов большая часть обратного рассеяния приходит именно от поверхности земли (Bourgeau-Chavez, Kasischke, Rutherford, 1999), и состояние влажности подстилающей поверхности имеет главное влияние на временной ход радарного отклика от леса, несмотря на затухание радарного сигнала при прохождении через лесной покров (по данным ERS-1 и наземным наблюдениям) (Rignot et al., 1994). Данная информация позволяет принять для станции SOD103 полученный в настоящей работе коэффициент корреляции между КОР и температурой почвы.

Влияние текстуры почвы на связь обратного рассеяния с температурой почвы

В наиболее часто используемых моделях восстановления влажности почвы в дистанционном зондировании в С-диапазоне, например, в модели Wang- Schmugge (Wang, Schmugge, 1980), модели Hallikainen (Hallikainen et al., 1985), используются данные о механическом составе почвы, а именно содержании песка и глины. Именно эти две компоненты почвы, а также гумус (Бобров, Кондратьева, Мустакова, 2013) определяют количество свободной и связанной воды в почве, отсюда и ее диэлектрическую проницаемость, зависящую от температуры воды.

Текстура почвы влияет на параметр σ_{soil}^0 из-за изменений в диэлектрических свойствах почвы через влагоемкость ее текстурных составляющих. Авторы статьи (Jackson, Schmugge, 1989) нашли, что молекулы воды поглощаются частицами почвы и эффективно лишают подвижности (связывают) их диполи, препятствуя связанной воде взаимодействовать с сигналом радара. В С-диапазоне уменьшение содержания глины в почве приводит к увеличению чувствительности сигнала радара к влажности почвы (Ulaby, Baltivala, Dobson, 1978), что связано с большим количеством свободной воды. Песчаные почвы содержат более высокое количество свободной воды, чем глинистая почва (Srivastava, Patel, Navalgund, 2006). Таким образом, коэффициент корреляции Спирмена между σ^0 и влажностью почвы выше для песчаных почв (Blumberg et al., 2000). На *рис. 7* приведены графики механического состава почв для рассматриваемых наземных станций. Для станции Mejan-nes-le-Clap с высокой корреляцией между спутниковыми и наземными данными для обеих поляризаций отмечаем наибольшее процентное содержание песка в почве и наименьшее органики.

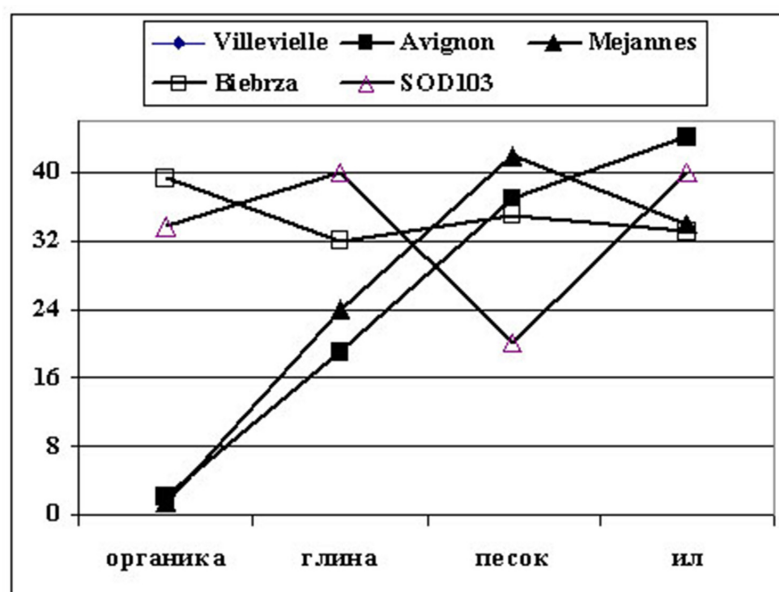


Рис. 7. Процентное содержание органики, глины, песка и ила в почве для рассматриваемых наземных станций

Заключение

В работе исследуется связь радарных данных сенсора Sentinel 1 с данными измерений температуры почвы на глубинах от 5 до 30 см на пяти наземных станциях, находящихся на территории Финляндии, Польши и Франции, за период 2014–2016 гг. Станции располагаются на широтах от 43° до 67° с.ш. и различаются почвами от почв хвойных бореальных лесов (Финляндия) до торфяных болотистых почв в Польше и почв, покрытых травой или с.-х. культурами, во Франции.

Показано наличие положительной корреляции коэффициента обратного рассеяния с температурой почвы для четырех из пяти станций наземных измерений параметров почвы (отсутствует корреляция только для станции в Польше для болотистой местности). Показано, что при наличии корреляции для обеих поляризаций коэффициент корреляции Спирмена ρ_s для согласованной поляризации превышает ρ_s для кросс-поляризации. Показано, что для станции SOD103 (хвойный лес) есть корреляция только для кросс-поляризации.

В случае сильной связи между переменными (станция Mejanne-le-Clap) построены регрессионные соотношения, связывающие коэффициент обратного рассеяния с температурой почвы. Коэффициент детерминации R^2 для согласованной поляризации составляет $R^2 \approx 0,8$ и для кросс-поляризации $R^2 \approx 0,6$ для глубины почвы 5 см. В случае умеренной связи между переменными (станции SOD103, CabrieresAvignon, Villevielle) можно утверждать как о наличии (станция SOD103), так и об отсутствии значимости уравнений регрессии (станции CabrieresAvignon, Villevielle). Полученные результаты свидетельствуют о влиянии механического состава почв на коэффициент детерминации.

Показано, что учет влияния надпочвенной растительности не привел к увеличению коэффициента корреляции между коэффициентом обратного рассеяния и температурой почвы.

Литература

1. Бобров П.П., Кондратьева О.В., Мустакова М.М. Влияние содержания органического вещества в почвах на диэлектрическую проницаемость в диапазоне частот 10 кГц – 8,5 ГГц // Вестн. СибГАУ. 2013. № 5(51). С. 95–97.
2. Лагутин М.Б. Наглядная математическая статистика. М.: Бином. 2013. 472 с.
3. Музалевский К.В., Миронов В.Л., Боике Дж., Швалева А.А., Евтюшкин А.В., Филатов А.В. Измерение температуры мерзлого деятельного слоя почвенного покрова арктической тундры по данным космического радара ALOS PALSAR // Изв. ВУЗов. Физика. 2013. Т. 56. № 10-3. С. 91–93.
4. Attema E.P.W., Ulaby F.T. Vegetation modeled as a water cloud // Radio Sciences. 1978. Vol. 13. P. 357–364.
5. Blumberg D.G., Freilikh V., Lyalko I.V., Vulfson L.D., Kotlyar A.L., Shevchenko V.N., Ryabokononko A.D. Soil moisture (water-content) assessment by an airborne scatterometer // Remote Sensing of Environment. 2000. Vol. 71. P. 309–319. DOI: 10.1016/S0034-4257(99)00087-5.
6. Bourgeau-Chavez L.L., Kasischke E.S., Rutherford M.D. Evaluation of ERS SAR Data for Prediction of Fire Danger in a Boreal Region // Intern. J. Wildland Fire. 1999. Vol. 9. No. 3. P. 183–194.
7. De Roo R.D., Ulaby F.T., Dobson M.C. Using Microwave radar for soil moisture inversion under soybean canopies // Proc. 1998 IGARSS Symp. 6–10 July 1998. Seattle. WA. USA. Part 1. 1998. P. 94–96.
8. Gherboudj I., Magagi R., Berg A.A., Toth B. Soil moisture retrieval over agricultural fields from multi-polarized and multi-angular RADARSAT-2 SAR data // Remote Sensing of Environment. 2011. Vol. 115. P. 33–43.
9. Hallikainen M.T., Ulaby F.T., Dobson M.C., El-Rayes M.A., Wu L.-K. Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil-Part 1: Empirical Models and Experimental Observations // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1985. Vol. GE-23. No. 1. P. 25–34.
10. Jackson T.J., Schmugge T.J. Passive microwave remote-sensing system for soil moisture. Some supporting research // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1989. Vol. 27. No. 2. P. 225–235. DOI: 10.1109/36.20301.

11. 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 Proc. 2008. Vol. 3. P. III-382–III-385.
12. 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 // Remote Sensing of Environment. 1994. Vol. 49. No. 2. P. 145–154.
13. Srivastava H.S., Patel P., Navalgund R.R. How far SAR has fulfilled its expectation for soil moisture retrieval // SPIE Digital Library. 2006. Nov. 13–17. Vol. 6410. Paper No. 64100. P. 1–12.
14. Ulaby F.T., Baltivala P.P., Dobson M.C. Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture, and soil texture: Part 1 — bare soil // IEEE Trans. Geosciences Electronics. 1978. Vol. 16. P. 286–295. DOI: 10.1109/TGE.1978.294586.
15. Wang J.R., Schmugge T.J. An empirical model for the complex dielectric permittivity of soils as a function of water content // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1980. Vol. GE-18. No. 4. P. 288–295.

Sentinel 1 data correlation with ground measurements of soil temperature

N.V. Rodionova

*V.A. Kotelnikov FIRE RAS, Fryazino 141190, Russia
E-mail: rnv@ire.rssi.ru*

The goal of this study is to analyze interactions between Sentinel 1 radar images and soil temperature resulting from *in situ* field data. Ground-based measurements of temperature and soil moisture for five stations in Finland, Poland and France during 2014–2016 are available on the website of the International soil moisture network. The ground stations are located at latitudes from 43° N to 67° N, and soils differ from soils of boreal forests (Finland) to the marshy peat soils in Poland, and grass and agricultural crops soils in France. Results indicated the positive correlation between backscatter coefficient and soil temperature for four stations (excluding Poland station). It was shown that Spearman correlation coefficient for VV polarization exceeds correlation coefficient for VH polarization. The regression relationships between the backscatter coefficient and soil temperature was constructed in the case of high correlation. The influence of vegetation and mechanical soil composition on the correlation coefficient was examined.

Keywords: remote sensing, C-band radar data, polarization, soil temperature, backscattering coefficient, Spearman's correlation coefficient

*Accepted: 21.06.2017
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-135-148*

References

1. Bobrov P.P., Kondrat'eva O.V., Mustakova M.M., Vliyanie soderzhaniya organicheskogo veshchestva v pochvakh na dielektricheskuyu pronitsaemost' v diapazone chastot 10 kGts – 8,5 GGts (Effect of soil organic matter on the dielectric permittivity at the frequencies 10 kHz – 8.5 GHz), *Vestnik SibGAU*, 2013, No. 5 (51), pp. 95–97.
2. Lagutin M.B., *Naglyadnaya matematicheskaya statistika* (Teaching mathematical statistics), Moscow: Binom, 2013, 472 p.
3. Muzalevskii K.V., Mironov V.L., Boike Dzh., Shvaleva A.A., Evtyushkin A.V., Filatov A.V., Izmerenie temperatury merzlogo deyatel'nogo sloya pochvennogo pokrova arkticheskoi tundry po dannym kosmicheskogo radara ALOS PALSAR (The ability to measure the temperature of the frozen active topsoil of the arctic tundra based on the ALOS PALSAR data), *Izvestiy VUZov. Fizika*, 2013, Vol. 56, No. 10-3, pp. 91–93.
4. Attema E.P.W., Ulaby F.T., Vegetation modeled as a water cloud, *Radio Sciences*, 1978, Vol. 13, pp. 357–364.
5. Blumberg D.G., Freilikher V., Lyalko I.V., Vulfson L.D., Kotlyar A.L., Shevchenko V.N., Ryabokononko A.D., Soil moisture (water-content) assessment by an airborne scatterometer, *Remote Sensing of Environment*, 2000, Vol. 71, pp. 309–319. DOI: 10.1016/S0034-4257(99)00087-5.
6. Bourgeau-Chavez L.L., Kasischke E.S., Rutherford M.D., Evaluation of ERS SAR Data for Prediction of Fire Danger in a Boreal Region, *Intern. J. Wildland Fire*, 1999, Vol. 9, No. 3, pp. 183–194.
7. De Roo R.D., Ulaby F.T., Dobson M.C., Using Microwave radar for soil moisture inversion under soybean canopies, *Proc. 1998 IGARSS Symp.*, 6–10 July 1998, Seattle, WA, USA, Part 1, pp. 94–96.
8. Gherboudj I., Magagi R., Berg A.A., Toth B., Soil moisture retrieval over agricultural fields from multi-polarized and multi-angular RADARSAT-2 SAR data, *Remote Sensing of Environment*, 2011, Vol. 115, pp. 33–43.

9. Hallikainen M.T., Ulaby F.T., Dobson M.C., El-Rayes M.A., Wu L.-K., Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil-Part 1: Empirical Models and Experimental Observations, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1985, Vol. GE-23, No. 1, pp. 25–34.
10. Jackson T.J., Schmugge T.J., Passive microwave remote-sensing system for soil moisture. Some supporting research, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1989, Vol. 27, No. 2, pp. 225–235. DOI: 10.1109/36.20301.
11. 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 Proc.*, 2008, Vol. 3, pp. III-382–III-385.
12. 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, *Remote Sensing of Environment*, 1994, Vol. 49, No. 2, pp. 145–154.
13. Srivastava H.S., Patel P., Navalgund R.R., How far SAR has fulfilled its expectation for soil moisture retrieval, *SPIE Digital Library*, 2006, Vol. 6410, Paper No. 64100, pp. 1–12.
14. Ulaby F.T., Baltivala P.P., Dobson M.C., Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture, and soil texture: Part 1 — bare soil, *IEEE Trans. Geosciences Electronics*, 1978, Vol. 16, pp. 286–295. DOI: 10.1109/TGE.1978.294586.
15. Wang J.R., Schmugge T.J., An empirical model for the complex dielectric permittivity of soils as a function of water content, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1980, Vol. GE-18, No. 4, pp. 288–295.