

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.12.9>

УДК: 537.876.23

## ОСОБЕННОСТИ РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ВЛАЖНОСТИ ТУНДРОВЫХ ПОЧВ В Р-ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

К.В. Музалевский

Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН,  
660036, Красноярск, ул. Академгородок, д. 50, стр. 38

Статья поступила в редакцию 24 ноября 2023 г.

**Аннотация.** В данной работе в Р-диапазоне частот (409 МГц) теоретически исследуются особенности микроволнового излучения тундровых почв в процессе протаявания деятельного слоя. В вертикальном сечении, почвы деятельного слоя характеризовались профилями объемной влажности, весового содержания органического вещества, временными рядами физической температуры. Радиояркая температура деятельного слоя тундровых почв рассчитывалась на основе феноменологической модели радиотеплового излучения слоисто-неоднородного неизотермического полупространства. При моделировании радиояркой температуры использовалась диэлектрическая модель, позволяющая рассчитать действительную и мнимую части относительной комплексной диэлектрической проницаемости тундровых почв с высоким содержанием органического вещества 35%-80%, в диапазоне температур от  $-30$  °С до  $+25$  °С. Показано, что по мере протаявания деятельного слоя тундровых почв наблюдается явление интерференции излучательной способности, амплитуда которой определяется видом вертикального профиля содержания органического вещества. Для рассмотренных видов профилей влажности и содержания органического вещества, интерференцией излучательной способности можно пренебречь при протаявании деятельного слоя на глубину более 18.5 см. В случае, если объемная влажность протаявающей части деятельного слоя почв меньше (или близка к) максимальному содержанию

связанной воды, то явление интерференции излучательной способности не наблюдается. Выполненные оценки показали, что средняя глубина зондирования влажности для рассмотренных тундровых почв не превышает 4.5 см.

**Ключевые слова:** микроволновая радиометрия, деятельный слой, тундровые почвы, влажность почв.

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках научной тематики Госзадания ИФ СО РАН.

**Автор для переписки:** Музалевский Константин Викторович  
[rsdkm@ksc.krasn.ru](mailto:rsdkm@ksc.krasn.ru)

## Введение

Глубина зондирования влажности минеральных почв микроволновыми радиометрами с рабочими частотами в L-диапазоне (1.4 ГГц) ограничена поверхностным слоем толщиной от 0-2.5 см [1, 2] до ~5 см [3]. В настоящее время широко ведутся исследования по применению радиоволн в более низкочастотном Р-диапазоне частот (750 МГц) для дистанционного радиометрического зондирования влажности почв [4-9]. На примере минеральных почв теоретические исследования показывают, что на частоте 750 МГц в зависимости от вертикального распределения влаги в поверхностном слое глубина зондирования может варьироваться от 0.8 см до 10.5 см [4]. В ходе экспериментов по радиометрическому измерению влажности минеральных почв на частоте 750 МГц, глубина зондирования оценивалась ~7 см – ~10 см [4-6]. Данные оценки получены в среднем для всех профилей влажности, наблюдаемых в экспериментах в ходе естественного увлажнения и высыхания почвенного покрова, не покрытого растительностью. В засушливый период глубина зондирования достигала ~28 см, а для почв с влажностью выше среднего характеризовалось глубиной зондирования ~5 см [7]. Близкие оценки по глубине зондирования влажности  $\leq 7$  см получены при моделировании на частоте 435 МГц отражения волн от высыхающей после орошения минеральной почвы [10-11]. Показано [10-11], что глубина зондирования существенно определяется

профилем влажности. Вместе с тем, в литературе слабо изучена возможность микроволнового радиометрического дистанционного зондирования влажности тундровых почв в Р-диапазоне частот. Однако, проводились теоретические и экспериментальные исследования возможности измерения влажности (и профилей влажности) протаявшего деятельного слоя тундровых почв в Р-диапазоне частот (435 МГц) на основе применения метода поляриметрического радарного зондирования [12-17]. В данных работах утверждается принципиальная возможность восстановления профиля влажности тундровых почв в протаявшем деятельном слое на глубину до 40-100 см.

Экспериментальные данные свидетельствуют о весьма сложной слоистой структуре деятельного слоя тундровых почв, в вертикальном сечении которого влажность, гранулометрический состав, содержание органического вещества имеют различные закономерности профилей в зависимости от ландшафтных условий [18-20]. При этом для моделирования и интерпретации данных дистанционного зондирования [15, 16] используются диэлектрические модели неспособные учесть в Р-диапазоне частот взаимосвязь комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) тундровых почв со взаимными температурными изменениями количества связанной (незамерзшей) почвенной воды и льда, а также со значительным диапазоном вариации содержания органического вещества. В случае, если влажность тундровой почвы будет близка к максимальному содержанию связанной воды (весовое содержание которой может достигать до 40% при содержании органического вещества 80%), то фазовый переход первого рода почвенной воды в лед (при переходе температуры почвы через  $T_s = 0$  °С) может не наблюдаться [21], а существенный контраст КДП на границе между слоем почвы с  $T_s > 0$  °С и  $T_s < 0$  °С может практически отсутствовать. Что может привести к ошибочной оценке глубины оттаивания деятельного слоя и неверной интерпретации данных дистанционного зондирования за счет прогнозируемого явления интерференции на основе используемых в работах [15, 16] диэлектрических моделей.

В данной работе на основе физической диэлектрической модели тундровых почв [21], экспериментальных данных о профилях влажности, содержания органического вещества [18-20] и температуры деятельного слоя [22], измеренных на тестовых участках Северного склона Аляски, исследуются особенности радиотеплового излучения деятельного слоя тундровых почв в Р-диапазоне на частоте 409 МГц (зарезервирована для радиоастрономических наблюдений). Основной целью данных исследований является оценка влияния температурно-влажностного состояния деятельного слоя тундровых почв на глубинность зондирования и возможность определения их влажности.

## **1. Экспериментальные данные. Эталонные модели деятельного слоя**

Излучательная способность деятельного слоя тундровых почв непокрытых растительным или снежным покровом, с плоскими границами раздела сред, высоким содержанием органического вещества, может быть поставлена в зависимость следующему достаточному набору геофизических параметров: влажность, температура, содержание органического вещества, комплексная диэлектрическая проницаемость (КДП), зависящих от вертикальной координаты. Из экспериментальных данных следует [18-20], что влажность, температура и содержание органического вещества по вертикальному сечению имеют разнообразные законы изменения в зависимости от конкретной точки наблюдений. Для анализа радиотеплового излучения деятельного слоя тундровых почв ограничимся эталонным набором модельных вертикальных профилей этих параметров.

В работах [18-20], представлены экспериментальные данные о весовом содержании органического вещества и объемной влажности тундровых почв на различных глубинах деятельного слоя, которые были получены в ходе полевых экспедиционных работ на тестовых участках (см. таб. 1) Северного склона Аляски, США: Franklin Bluffs (FB), Sagwon (Sag), Happy Valley (HV), Ice Cut (ICC), Howe Island (HI).

Таблица 1. Источник данных, название и местоположение тестовых участков.

Названия тестовых участков	Широта, °	Долгота, °	Источник данных
FB (Franklin Bluffs Moist Tundra)	69.81	-148.77	[18, 19]
HI (Howe Island Pit)	70.32	-147.99	[20]
HV-1,2 (Happy Valley)	69.16	-148.84	[18, 19]
HV-GRD (Happy Valley Grid)	69.15	-148.85	[20]
ICC-1,2 (Ice Cut)	69.04	-148.82	[18, 19]
SagMNT (Sagwon MNT Grid)	69.433	-148.671	[20]
SagMAT2 (Sagwon MAT2 Grid)	69.43	-148.70	[20]
SagMNT2 (Sagwon MNT2 Grid)	69.432	-148.671	[20]
SGW-1,2 (Sagwon)	69.48	-148.56	[18, 19]

Имеющиеся данные в [18, 19], [20, см. таб. 19а, 19б] позволили сформировать эталонные профили влажности (см. рис. 1) и весового содержания органического вещества (включает разложившуюся и не разложившуюся органику) (см. рис. 2). Сложные зависимости глубинного распределения влаги в деятельном слое не позволяют описать имеющееся разнообразие профилей влажности одной универсальной формулой. Измеренные влажности почвы, имеющие близкие зависимости в вертикальном сечении деятельного слоя, были сгруппированы и качественно описаны аналитическими зависимостями (см. рис. 1, профили 1-7, и см. таб. 2, профили «1-7 (рис. 1)»). В целом для всех тестовых участков характерна высокая объемная влажность почв, которая в поверхностном слое <10 см варьируется от 29% до 77% и в среднем составляет  $53 \pm 17\%$ . Вертикальное распределение весового содержания органического вещества на различных тестовых участках имеет более регулярную структуру, которая может быть сгруппирована в две общие закономерности (см. рис. 2), описываемые формулами, приведенными в таб. 2 (см. профили «1 и 2 (рис. 2)»). При этом наблюдается значительная вариация весового содержания органического вещества в поверхностном слое почвы <10 см от 33% до 87%, которое в среднем составляет  $68 \pm 17\%$  (см. рис. 2). С увеличением глубины

содержание органического вещества уменьшается и на глубинах свыше 35 см деятельный слой представлен преимущественно минеральными почвами.

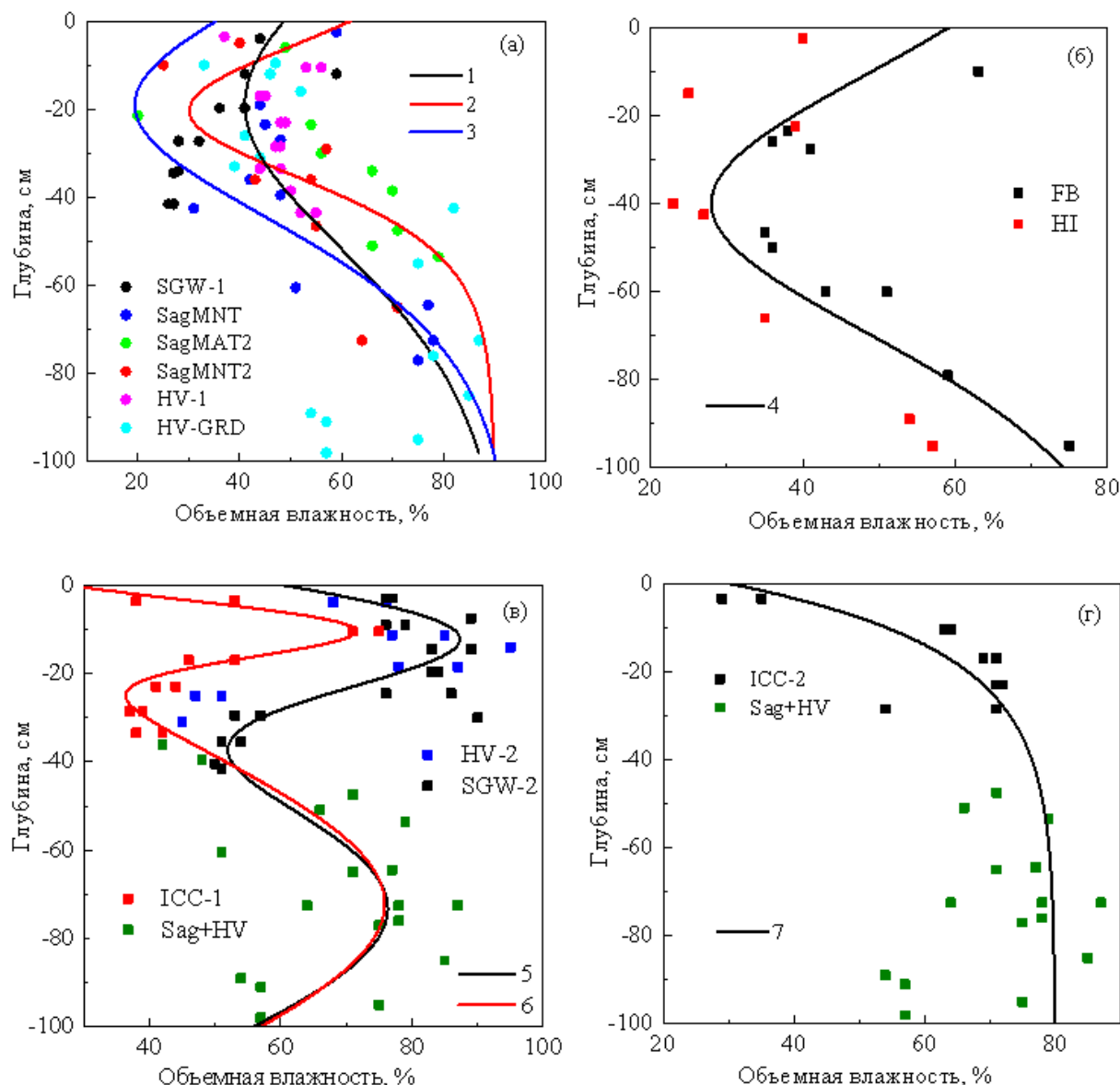


Рис. 1. Измеренные и эталонные профили влажности деятельного слоя тундровых почв тестовых участков.

(Темно-зеленые точки на графиках (в) и (г) заимствованы из данных для тестовых участков Sag и HV (а) с целью возможности построения глубинного профиля ниже 40 см.).

Временные ряды профилей температуры (см. рис. 3), измеренные автоматической почвенно-климатической метеостанцией на тестовом участке FB в 2015 году [22] использовались в качестве эталонных для дальнейшего моделирования радиояростной температуры. Температурные профили свидетельствуют о начале процесса оттаивания поверхности почвы с 143 дня

2015 г. Глубина протаявания деятельного слоя немного превышает 82 см, начиная примерно с 220 дня 2015 г.. Сезонный процесс замерзания поверхности почвы начинается после 257 дня 2015 г.

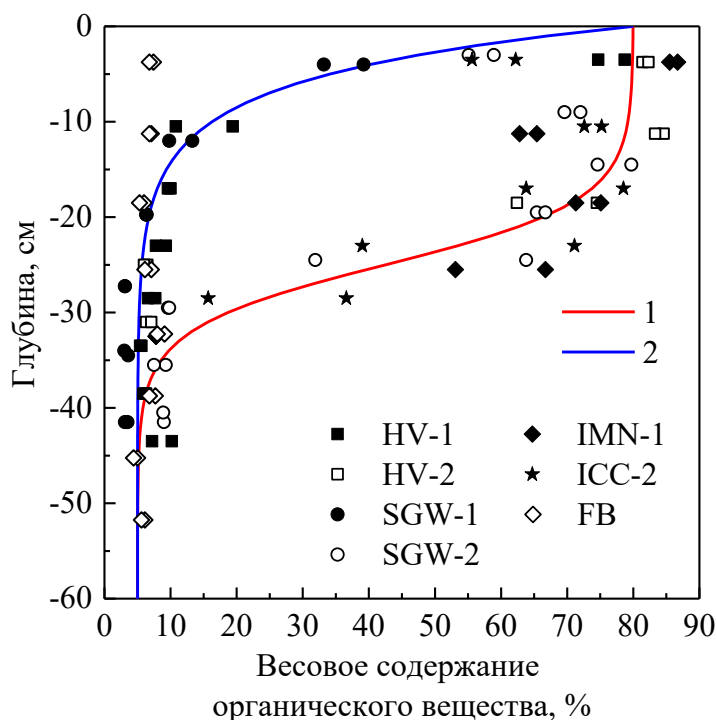


Рис. 2. Эталонные профили весового содержания органического вещества на тестовых участках.

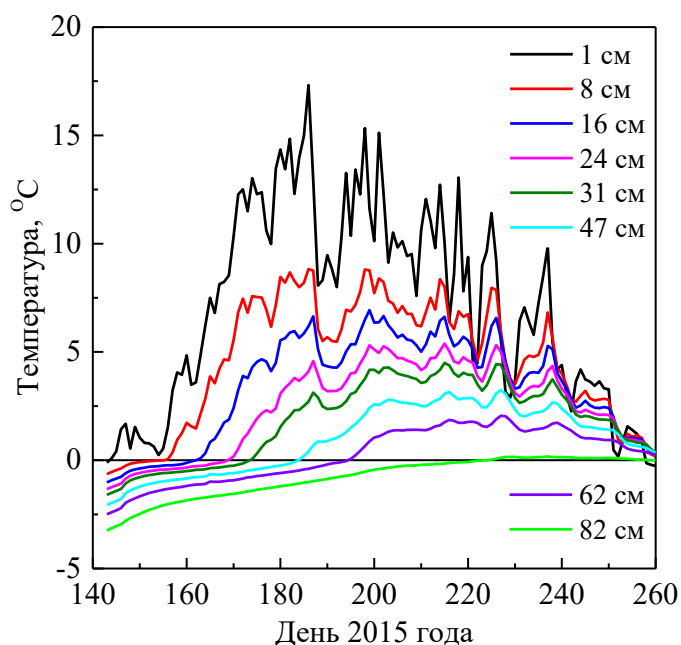


Рис. 3. Временной ход температуры почвы, измеренной на тестовом участке FB, на различных глубинах деятельного слоя.

Таблица 2. Формулы и параметры для расчета профилей влажности и содержания органического вещества в тундровых почвах на тестовых участках.

Профили	Формулы и параметры					
	$y = y_0 + 4A \frac{\exp[-(z - z_0)/\Delta z]}{\{1 + \exp[-\frac{z - z_0}{\Delta z}]\}^2}$					
	$y_0$	$A$	$z_0$	$\Delta z$		
1 (рис. 1а)	0.944	-0.527	-19	24		
2 (рис. 1а)	1	-0.7	-19	12		
3 (рис. 1а)	0.944	0.75	-19	19		
4 (рис. 1б)	0.88	-0.6	-40	22		
	$y = A_1 \exp\left(-\left[\frac{z - z_1}{\Delta z_1}\right]^2\right) + A_2 \exp\left(-\left[\frac{z - z_2}{\Delta z_2}\right]^2\right)$					
	$A_1$	$z_1$	$\Delta z_1$	$A_2$	$z_2$	$\Delta z_2$
5 (рис. 1в)	0.73	-10.4	18.4	0.76	-73.3	47.8
6 (рис. 1в)	0.53	-9.8	9.1	0.76	-72.2	51.9
	$y = y_0 + A \exp[-(z - z_0)/\Delta z]$					
	$y_0$	$A$	$z_0$	$\Delta z$		
7 (рис. 1г)	0.8	-0.5	0	15.2		
2 (рис. 2)	5	75	0	5.28		
	$y = y_0 + A \frac{\exp[-(z - z_0)/\Delta z]}{1 + \exp[-(z - z_0)/\Delta z]}$					
	$y_0$	$A$	$z_0$	$\Delta z$		
1 (рис. 2)	80	-75	-25	3.3		

## 2. Модель радиотеплового излучения и метод восстановления влажности тундровых почв

Рассматривается случай тундровых почв, с плоскими границами раздела, не покрытых растительным или снежным покровом. В этом случае для моделирования радиояркостной температуры деятельного слоя тундровых почв может быть использована феноменологическая модель радиотеплового излучения для слоисто-неоднородного неизотермического полупространства [23].



$$Tb_p^{RT}(\theta, \varepsilon_s(z)) = \eta_p^{RT}[\theta, \varepsilon_s(z)]T_{eff}(\kappa(z))$$

$$T_{eff} = 2k_0 \int_0^\infty dz T_s(z) \kappa(z) e^{-2k_0 \int_0^z \kappa(\xi) d\xi},$$
(1)

где  $\eta_p^{RT} = [1 - |R_p(\theta, \varepsilon_s(z))|^2]$  – излучательная способность почвы,

$R_p(\theta, \varepsilon_s(z))$  – коэффициент отражения волны от слоистого полупространства, рассчитывается методом итераций Бреховских [24],

$\theta$  – угол наблюдения радиояркой температуры,

$T_{eff}$  – эффективная температура почвы,

$k_0 = 2\pi f/c$  – волновое число свободного пространства,

$f = 409$  МГц – частота электромагнитного поля,

$c$  – скорость света в вакууме.

Индекс  $p$  может принимать значения  $H$  и  $V$ , обозначающие горизонтальную и вертикальную поляризации, соответственно. Профиль относительной КДП почвы  $\varepsilon_s(z)$ , является функцией содержания органического вещества ( $OM$ ), температуры  $T_s$  и объемной влажности  $W$  почвы. В общем случае данные параметры являются функцией вертикальных координат, тогда  $\varepsilon_s(z) = \varepsilon_s(OM(z), T_s(z), W(z))$ . Нормированный коэффициент поглощения выражается формулой  $\kappa(z) = \text{Im}\sqrt{\varepsilon_s(z)}$ . Для расчета КДП почв деятельного слоя будет использоваться диэлектрическая модель [21]. Данная модель позволяет рассчитать действительную и мнимую части КДП почв с высоким содержанием органического вещества от  $OM = 35\%$  до  $OM = 80\%$ , в диапазоне температур от  $T_s = -30$  °С до  $T_s = +25$  °С. (Будем пренебрегать погрешностями модели при низком содержании органического вещества менее 35%). Модель (1) в совокупности с эталонными профилями содержания органического вещества, объемной влажности и температуры (см. рис. 1-3 и таб. 2) позволяют решить прямую задачу по расчету радиояркой температуры слоисто-неоднородного неизотермического деятельного слоя тундровых почв. Отметим, что при вычислении (1) слоисто-неоднородная среда от  $z = 0$  см до  $z = -100$  см разбивалась на 1000 элементарных слоев, при этом для получения непрерывных значений  $T_s(z)$  данные представленные на рис. 3 интерполировались

по вертикальному сечению на указанной сетке (значения глубже 82 см были вычислены на основе линейной экстраполяции). Количество элементарных слоев было выбрано из условия достижения погрешности в расчете радиояркостной температуры менее 0.1%.

Метод восстановления влажности почвы будет основан на решении обратной задачи в приближении однородного изотермического полупространства. Радиояркостная температура однородного изотермического полупространства, содержащего почву не покрытой растительным или снежным покровом с плоской границей, может быть вычислена по формуле:

$$Tb_p^{hom}(\theta, \varepsilon_s) = \eta_p[\theta, \varepsilon_s]T_s, \quad (2)$$

где  $\eta_p = [1 - |R_p(\theta, \varepsilon_s)|^2]$  – излучательная способность почвы,

$R_p(\theta, \varepsilon_s)$  – коэффициент отражения Френеля,

$\varepsilon_s$  – КДП почвы,

$T_s$  – физическая температура почвы.

КДП почвы является функцией  $\varepsilon_s = \varepsilon_s(OM, T_s, W)$ , которая также рассчитывается с использованием диэлектрической модели [21]. Если в уравнении (2) задать величину  $OM$ , то для решения обратной задачи по нахождению параметров  $T_s, W$  будет достаточно двух уравнений (т.е. измерения радиояркостной температуры на одном угле наблюдения на горизонтальной и вертикальной поляризации). Для такого случая  $T_s, W$  найдем в ходе минимизации следующей нормы невязки:

$$\{W, T_s\}_{j,m}(Tb) = \min \left\{ \sum_p |Tb_p^{hom}(\theta, OM, W, T_s) - Tb_p^{RT}(\theta, OM_m(z), W_j(z), T_s(z))|^2 \right\}. \quad (3)$$

Здесь  $Tb_p^{RT}(\theta, OM_m(z), W_j(z), T_s(z))$  – исходные значения радиояркостных температур прямой задачи, рассчитанные для угла наблюдения  $\theta = 40^\circ$  на вертикальной  $p = V$  и горизонтальной  $p = H$  поляризациях, с использованием эталонных профилей влажности  $W_j(z)$ , где  $j = 1, \dots, 7$  (см. рис. 1) и содержания органического вещества  $OM_m(z)$ , где  $m = 1, 2$  (см. рис. 2), а также временных рядов профилей температур  $T_s(z)$  деятельного слоя (см. рис. 3).

При вычислении  $Tb_p^{hom}(\theta, OM, W, T_s)$  содержание органического вещества зададим равным  $OM = 68\%$  среднему значению в поверхностном слое  $<10$  см деятельного слоя почв (см. рис. 2). Для минимизации (3) применялся алгоритм Левенберга-Марквардта [25]. В случае пренебрежения температурной зависимостью КДП талой почвы, из уравнения (1) следует, что профили температуры деятельного слоя почвы не оказывают влияние на излучательную способность. В этом случае вызывает интерес вопрос о изучении влияния профилей влажности на эффективную температуру почвы и сопоставлении значений влажности почвы, восстановленных из значений радиоярких температур (3) и только из излучательной способности:

$$W_{j,m}(\eta) = \min \left\{ \sum_{p,\theta} \left| \eta_p^{hom}(\theta, OM, W) - \eta_p^{RT}(\theta, OM_m(z), W_j(z)) \right|^2 \right\}, \quad (4)$$

здесь  $\theta = 40^\circ$ ,  $p = H$ ,  $p = V$ ,  $\eta_p^{hom}(\theta, OM, W)$  – излучательная способность однородного полупространства, содержащего талую почву, температура которой была задана равной  $T_s = 5^\circ\text{C}$ . Задача минимизации (4) решается аналогично (3).

### 3. Результаты и обсуждение

Анализ временных рядов профилей температуры (см. рис. 3) позволяет построить график движения фронта протаявания ( $z_{th} = z(T_s = 0^\circ\text{C})$  – нулевых температур) в деятельном слое (см. рис. 4).

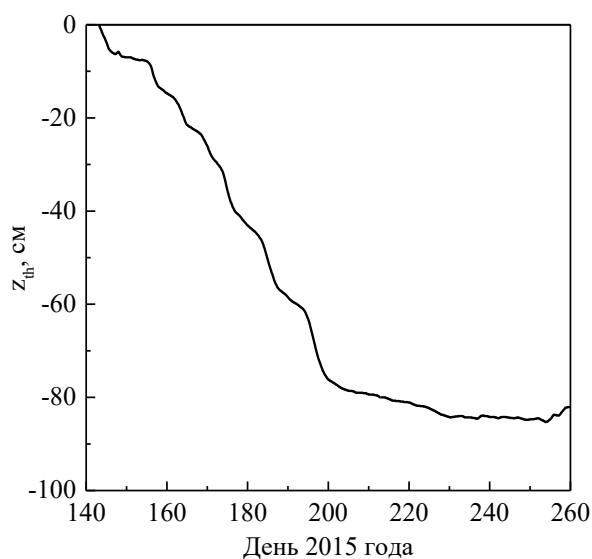


Рис. 4. Глубина протаявания деятельного слоя почвы по данным рис. 3.

Рассмотрим влияние, формирующейся в поверхностной части деятельного слоя, толщи талой почвы ( $T_s > 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ) в отдельности на излучательную способность и эффективную температуру. Рассчитанные значения  $\eta_p^{RT}(z_{th})$  и  $T_{eff}(z_{th})$  по формулам (1) от глубины протаявания деятельного слоя  $z_{th}$  в зависимости от измеренных на тестовых участках профилей влажности  $W_{1-7}(z)$ , содержания органического вещества  $OM_{1-2}(z)$  приведены на рис. 5.

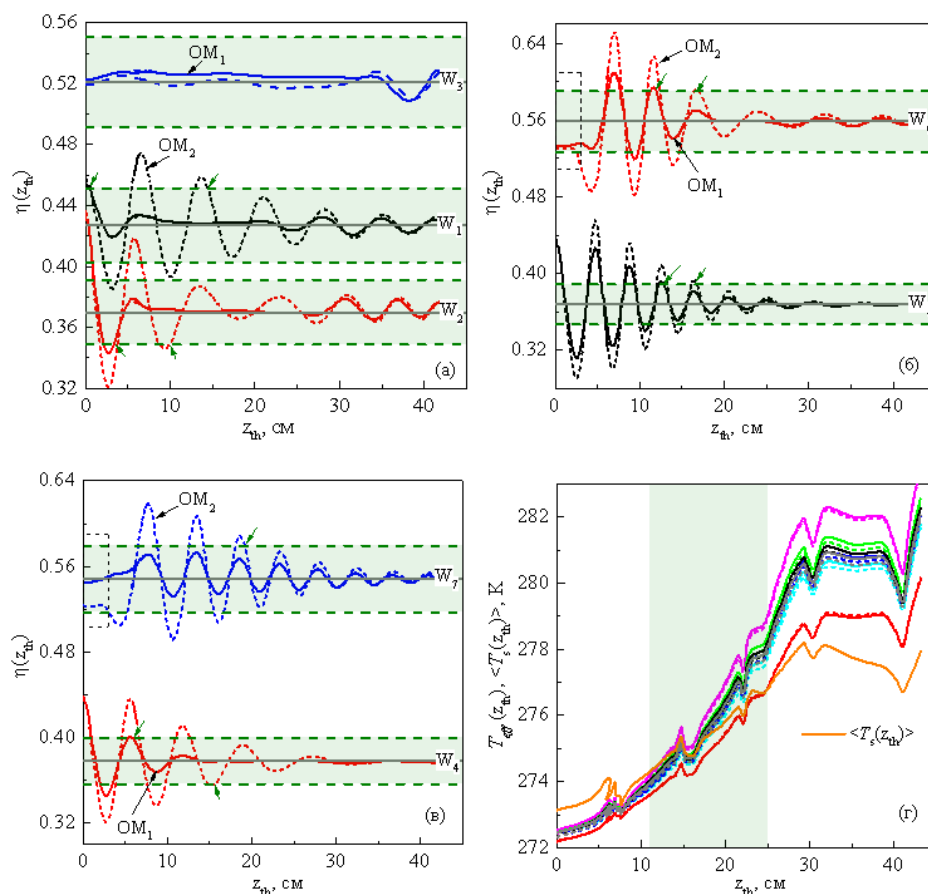


Рис. 5. Излучательная способность (а, б, в) и эффективная температура (г) деятельного слоя почв, рассчитанные для различных профилей влажности и содержания органического вещества в зависимости от глубины протаявания.

В случае более плавного изменения с глубиной содержания органического вещества профиль  $OM_1(z)$  (см. рис. 2, кривая 1) наблюдаются меньшие амплитуды интерференционной картины  $\eta_p^{RT}(z_{th})$  (см. рис. 5а, 5б, 5в, сплошные и штриховые синие, красные и черные линии), чем в случае более резкого изменения содержания органического вещества профиль  $OM_2(z)$  в поверхностной части деятельного слоя (см. рис. 2, кривая 2). Данное явление связано с тем, что в поверхностном слое почвы характеризуемого профилем

$OM_1(z)$  содержится практически не меняющееся с глубиной (от 0 см до  $-20$  см) высокое содержание органического вещества порядка 80%. Содержание органического вещества в тундровых органических почвах определяют максимальное количество связанной (незамерзшей) воды, которое не испытывает фазовый переход первого рода. Что в случае профиля  $OM_1(z)$  обуславливает более слабый контраст диэлектрической проницаемости по мере углубления фронта, характеризуемого температурой почвы  $T_s = 0$  °С (по мере протаявания деятельного слоя), чем для профиля  $OM_2(z)$ , для которого резко уменьшается содержание органического вещества с глубиной, что увеличивает содержание свободной воды (испытывающий фазовый переход первого рода), обеспечивающий более значительный градиент КДП почвы (между талым и мерзлым слоями). С данным явлением, также связано практически отсутствие интерференции излучательной способности для профиля  $W_3(z)$  (см. рис. 5а). Для этого профиля влажность почвы в поверхностном слое не превышает 40% до глубины 40 см. При этом максимальное количество связанной воды при вариации содержания органического вещества от  $OM = 35\%$  до  $OM = 80\%$  составляет  $W_{t,max} = 30-40\%$ , при температуре почвы  $T_s = 5$  °С (см. формулы (2) в [21]). В результате в ходе протаявания деятельного слоя, в почве фактически не происходят фазовые переходы первого рода почвенной воды, а могут происходить постепенные переходы связанной воды в свободную воду по мере повышения температуры «мерзлого» грунта, что не сопровождается резким изменением КДП почвы между талым ( $T_s > 0$  °С) слоем почвы и слоем «мерзлой» почвы с температурой  $T_s < 0$  °С. Подобные явления наблюдаются также для профилей  $W_7(z)$ ,  $W_6(z)$  в начальные этапы протаявания почвы (см. рис. 5б и 5в, периоды выделены прямоугольной рамкой со штриховой линией).

В целом для всех профилей влажности (кроме  $W_3(z)$ ) характерны затухающие колебания излучательной способности. С некоторой глубины протаявания  $z_{th}$  вариациями амплитуды излучательной способности можно пренебречь. С целью качественных оценок на рис. 5а, 5б, 5в показаны зеленые области, выделенные пунктирными зелеными линиями, в пределах которых

коэффициент излучения варьируется относительно среднего уровня (см. рис. 5а, 5б, 5в, серые прямые линии) при изменении влажности, однородно увлажненной по глубине почвы в пределах  $\Delta W = \pm 4\%$  (оценка проведена для  $OM = 68\%$  и  $T_s = 5^\circ\text{C}$ ). В пределах заданной области погрешностей, по вышеуказанным причинам, для почв с профилями влажностей  $W_3(z)$ ,  $W_7(z)$  и профилем содержания органического вещества  $OM_1(z)$ , вариациями излучательной способности при любом  $z_{th}$  можно пренебречь. В остальных случаях затухание амплитуд интерференционной картины излучательной способности по мере протаявания деятельного слоя существенно зависит от профиля содержания органического вещества и может варьироваться от 0.5 см (см. рис. 5а, профиль  $W_1(z)$  при  $OM_1(z)$ , отмечено зеленой стрелочкой) до 19.4 см (см. рис. 5в, профиль  $W_7(z)$  при  $OM_2(z)$ , отмечено зеленой стрелочкой).

В отличие от излучательной способности, значения эффективной температуры (см. рис. 5г) не имеют колебательного характера, что обусловлено самой моделью (1) радиояркой температуры. Вид профиля содержания органического вещества  $OM_{1,2}(z)$  не оказывают влияние на вариацию значений эффективной температуры деятельного слоя. Эффективная температура практически монотонно увеличивается при увеличении глубины оттаявания поверхностного слоя, что связано с повышением средней температуры самого талого слоя (см. рис. 3). Видно, что при  $z_{th} < 25$  см в пределах  $\pm 1\text{K}$  можно пренебречь вариациями  $T_{eff}(z_{th})$  при любом из рассмотренных профилей влажности и содержания органического вещества (см. рис. 5г). При этом эффективная температура почвы для различных профилей влажности совпадает со средним значением физической температуры  $\langle T_s(z_{th}) \rangle$  деятельного слоя протаявшего на глубину  $11 \text{ см} < z_{th} < 25 \text{ см}$  (см. рис. 5г, зеленая область).

Основываясь на значениях радиояркой температуры (1) решим обратную задачу (3). На рис. 6 приведены восстановленные (в приближении однородного изотермического полупространства) значения влажности почвы  $W_{ret}(z_{th})$  в зависимости от глубины  $z_{th}$  протаявания деятельного слоя.

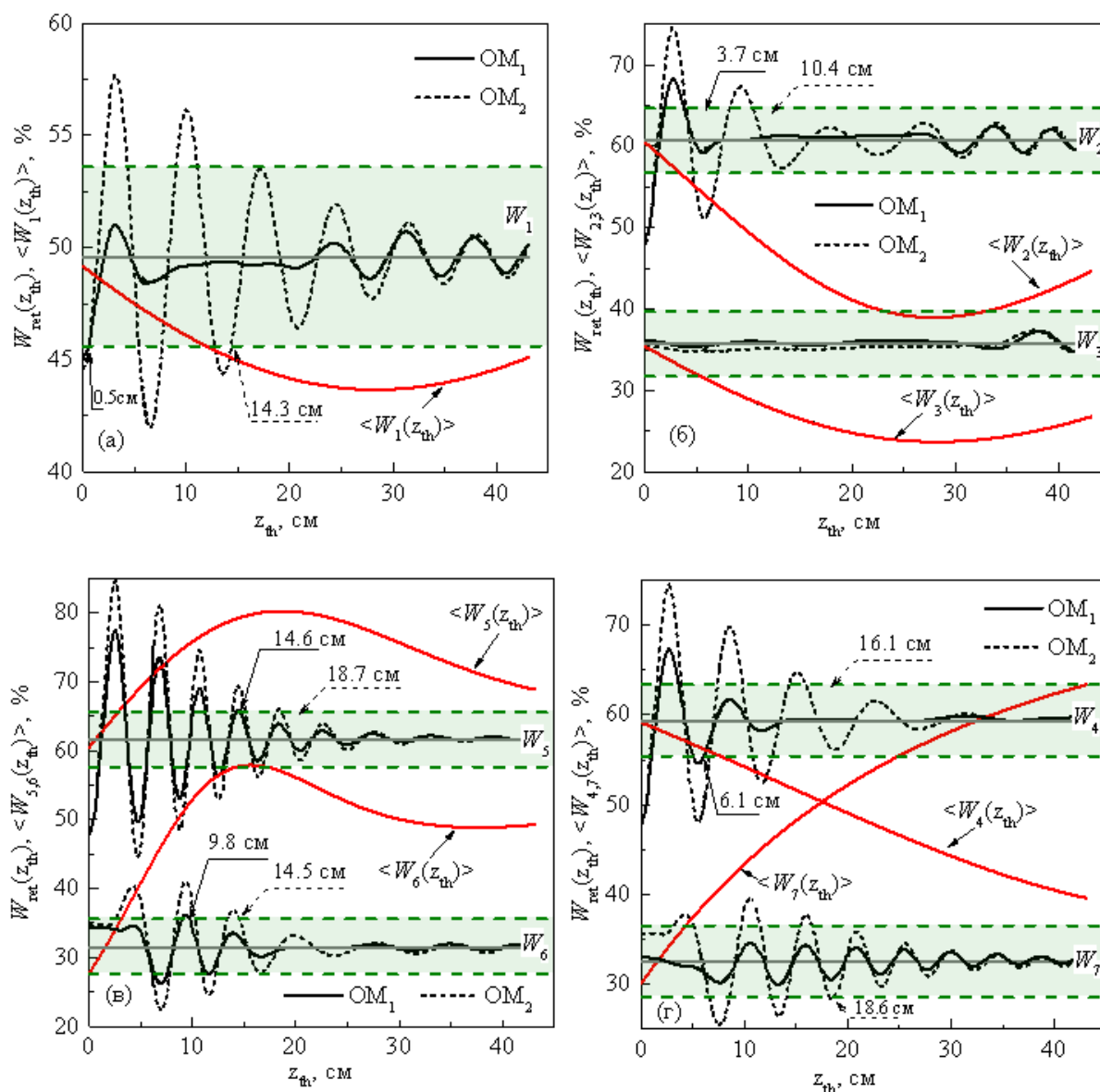


Рис. 6. Восстановленные (черные сплошная и штриховая линии)  $W_{ret}(z_{th})$  и среднее значение (красные линии)  $\langle W(z_{th}) \rangle$  влажности почвы в зависимости от глубины протаявания деятельного слоя для различных профилей влажности и содержания органического вещества.

Из рис. 6 видно, что восстановленные значения влажности почвы имеют аналогичный характер затухающих колебаний, которые находятся в противофазе с зависимостями излучательной способности (сравните рис. 5а, 5б, 5в и рис. 6 для соответствующих профилей). Это косвенно подтверждает, что в ходе минимизации функционала (3) основную информацию о влажности почвы в себе несет излучательная способность (модуль коэффициента отражения). Так же, как и в случае излучательной способности, амплитуда колебаний  $W_{ret}(z_{th})$

в большей степени определяется профилями содержания органического вещества  $OM_{1,2}(z)$  в деятельном слое почвы.

При увеличении глубины оттаивания  $z_{th}$  восстановленные значения влажности стремятся к постоянному уровню (см. рис. 6 серые сплошные линии), а не следуют средней влажности  $\langle W(z_{th}) \rangle$  (см. рис. 6, красные сплошные линии), рассчитанной в слое  $z_{th}$  по профилям (см. рис. 1, кривые 1-7). При этом видно, что постоянный уровень, к которому стремятся восстановленные значения влажности почвы (см. рис. 6 серые сплошные линии) практически совпадает со значениями влажности на поверхности почвы (см. рис. 6, красные сплошные линии при  $z_{th} = 0$  см). Определяя погрешность восстановления влажности почвы величиной  $\Delta W = \pm 4\%$  относительно среднего уровня (см. на рис. 6, зеленые области, ограниченные зелеными штриховыми линиями относительно серых сплошных линий), оценим, как предельную глубину зондирования влажности почвы, пересечение красных линий  $\langle W_{1-7}(z_{th}) \rangle$  с границами зеленой области. При этом для достижимости данной погрешности измерений влажности в зависимости от профиля влажности и содержания органического вещества, деятельный слой почвы должен протаять на глубину не менее, чем 18.7 см. Оценки глубины зондирования  $z_w$  влажности почвы приведены в таблице 3. Отметим, что оценка глубины зондирования для профиля влажности  $W_1(z)$  завышена относительно других оценок в связи со слабо меняющейся влажностью с глубиной до практически 50 см у этого профиля (см. рис. 1а). В остальных случаях глубина зондирования влажности почвы в среднем составила  $\langle z_w \rangle = 4.5$  см. Данная оценка весьма близка к значениям, полученным при зондировании минеральных почв [4, 5, 7, 10, 11] на частоте 750 МГц.

Таблица 3. Глубина зондирования влажности почвы.

$W_j(z)$	1	2	3	4	5	6	7
$z_w$ , см	12.3	3.4	5.7	7.5	2.9	3.2	4.4



Используя в качестве информативного признака только значения излучательной способности (а не радиояркой температуры) была решена обратная задача (4) по восстановлению влажности почв. Для каждого профиля влажности и содержания органического вещества были получены зависимости от глубины протаявания аналогичные тем, что изображены на рис. 6. Корреляция между восстановленными значениями влажности почвы в случае использования информативного признака излучательной способности  $W_{\text{ret}}(\eta)$  в ходе минимизации функционала (4) и информативного признака радиояркой температуры  $W_{\text{ret}}(Tb)$  в ходе минимизации функционала (3) приведена на рис. 7.

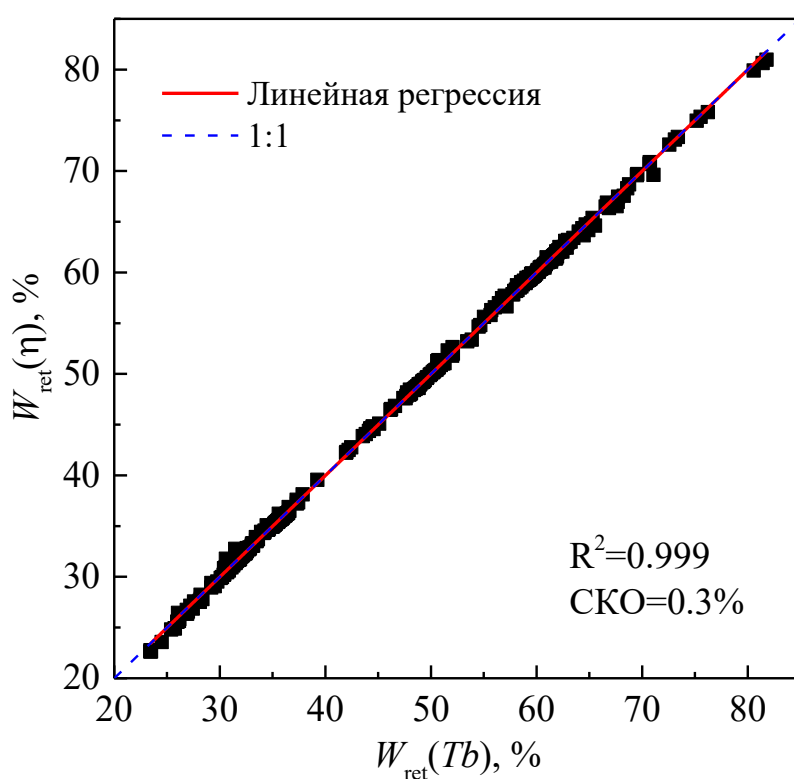


Рис. 7. Зависимость влажностей почвы, восстановленных на основе двух различных информативных признаков.

Из данных представленных на рис. 7 видно, что не существует значимого отличия между влажностями почвы  $W_{\text{ret}}(\eta)$  и  $W_{\text{ret}}(Tb)$ , восстановленными на основе двух различных информативных признаков. В результате можно утверждать, что основным информативным признаком позволяющим восстанавливать влажность рассмотренных тундровых почв из радиояркой температуры является излучательная способность (модуль коэффициента отражения).

## Заключение

1) В рамках проведенных исследований, оценки глубины зондирования влажности почвы близки к значениям, полученным в теоретических и экспериментальных работах [4, 5, 7, 10, 11] для минеральных почв (частота радиометрического зондирования 750 МГц), и существенно занижены относительно значений, приведенных в [14, 16] для тундровых почв (частота радарного зондирования 435 МГц). Данное несоответствие между результатами различных авторов нуждается в дополнительном исследовании.

2) Расчеты, проведенные в работе, на основе физической диэлектрической модели тундровых почв, свидетельствуют о невозможности регистрации интерференционной картины излучательной способности (радиояркой температуры) в Р-диапазоне частот в ходе протаявания деятельного слоя, в случае, когда влажность поверхностной его части меньше (или близка к) максимальному содержанию связанной воды.

3) Показано существенное влияние профилей содержания органического вещества на амплитуду интерференционной картины излучательной способности деятельного слоя в ходе его протаявания.

4) Результаты проведенных расчетов также показывают, что практическое измерение влажности поверхностной части деятельного слоя до глубины ~4.5 см возможно, в случае протаявания деятельного слоя на глубину более 18 см (из-за интерференционных эффектов излучательной способности).

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках научной тематики Госзадания ИФ СО РАН.

## Литература

1. Escorihuela M., Chanzy A., Wigneron J., Kerr Y. Effective soil sampling depth of the L-band radiometry: A case study // *Remote Sens. Environ.* – 2010. – V. 114. – №. 5. – P. 995–1001.
2. Schmugge T. Effect of soil texture on the microwave emission from soils. NASA, Goddard space flight center, Greenbelt, Maryland, TM-80632. – 1980. – 32 p.
3. Entekhabi D., Yueh S., O’Neill P., Kellogg K. SMAP Handbook. Jet Propulsion Lab., Pasadena, CA, USA. – 2014.
4. Shen X., et al. Soil Moisture Retrieval Depth of P- and L-Band Radiometry: Predictions and Observations // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* – 2021. – V. 59. – №. 8. – P. 6814-6822.
5. Ye N. et al. Towards P-band passive microwave sensing of soil moisture // *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* – 2021. – V. 18. – №. 3. – P. 504–508.
6. Ye N., Wu X., Walker J. P., Boopathi N., et al. Airborne P-band passive microwave soil moisture remote sensing: preliminary results // *URSI Asia-Pacific Radio Science Conference*, 1 Mar 2019, 8738311.
7. Brakhasi F., Walker J.P., Ye N., et al. Towards soil moisture profile estimation in the root zone using L- and P-band radiometer observations: A coherent modelling approach // *Science of Remote Sensing.* – 2023. – V. 7. – №. 100079.
8. Shen X., Walker J.P., Ye N., et al. Impact of random and periodic surface roughness on P- and L-band radiometry // *Remote Sensing of Environment.* – 2022. – V. 269. – №. 112825.
9. Shen X., Walker J.P., Ye N. et al. Evaluation of the tau-omega model over bare and wheat-covered flat and periodic soil surfaces at P- and L-band // *Remote Sensing of Environment.* – 2022. – V. 273. – №. 112960.
10. Muzalevskiy K. Retrieving soil moisture profiles based on multifrequency polarimetric radar backscattering observations. Theoretical case study // *International Journal of Remote Sensing.* – 2021. – V. 42. – №. 2. – P. 506-519.

11. Muzalevskiy K. A new method for remote sensing of moisture profiles in the arable layer at three frequencies; experimental case study // International Journal of Remote Sensing. –2021. – V. 42. – №. 7. – P. 2377-2390.
12. Du J., Kimball J. S., Moghaddam M. Theoretical Modeling and Analysis of L- and P-band Radar Backscatter Sensitivity to Soil Active Layer Dielectric Variations // Remote Sensing. – 2015. – V. 7. – №. 7. – P. 9450-9472.
13. Miller C., et al. The ABoVE L-band and P-band Airborne SAR Surveys // Earth Syst. Sci. Data Discuss. 2023. [preprint], <https://doi.org/10.5194/essd-2021-172> .
14. Chen R. H. et al. Joint Retrieval of Soil Moisture and Permafrost Active Layer Thickness Using L-Band Insar and P-Band Polsar // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Waikoloa, HI, USA. – 2020. – P. 4606-4609.
15. Chen R. H., Bakian-Dogaheh K., Tabatabaenejad A., Moghaddam M. Modeling and Retrieving Soil Moisture and Organic Matter Profiles in the Active Layer of Permafrost Soils From P-Band Radar Observations // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Yokohama, Japan. – 2019. – P. 10095-10098.
16. Tabatabaenejad A., Burgin M., Duan X., Moghaddam M. P-Band Radar Retrieval of Subsurface Soil Moisture Profile as a Second-Order Polynomial: First AirMOSS Results // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2015. – V. 53. – №. 2. – P. 645-658.
17. Chen R.H., et al. Permafrost Dynamics Observatory (PDO): 2. Joint retrieval of permafrost active layer thickness and soil moisture from L-band InSAR and P-band PolSAR // Earth and Space Science. – 2023. – V. 10. №. e2022EA002453.
18. Bakian-Dogaheh K., Chen R.H., Moghaddam M., Yi Y., Tabatabaenejad A. ABoVE: Active Layer Soil Characterization of Permafrost Sites, Northern Alaska, 2018. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA.–2020. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1759>
19. Chen R. H., Michaelides R. J., Chen J., et al. ABoVE: Active layer thickness from airborne L- and P-band SAR, Alaska, 2017, version 3 [Dataset]. ORNL Distributed Active Archive Center. – 2022. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/2004>

20. Barreda J.E., Knudson J.A., Walker D.A., Reynolds M.K., Kade A., Munger C. Biocomplexity of patterned ground data report, Dalton Highway, 2001-2005. Alaska Geobotany Center) AGC Data Report. University of Alaska Fairbanks, Fairbanks, AK. – 2006. – 252 p. [http://www.geobotany.org/library/reports/BarredaJE2006\\_daltonhwy\\_20060301.pdf](http://www.geobotany.org/library/reports/BarredaJE2006_daltonhwy_20060301.pdf).
21. Savin I.V., Muzalevskiy K.V., Mironov V.L. A dielectric model of thawed and frozen Arctic organic soils at 435 MHz // Remote Sensing Letters.– 2022.–Vol. 13.– No. 5.–P. 452-459.
22. <https://permafrost.gi.alaska.edu/site/fbd>
23. Шульгина Е. М. Радиоизлучение вертикально неоднородных сред // Тр. Гос. геофиз. обсерватории. –1975. –Вып. 331.– С. 64–72.
24. Brekhovskikh L. M. Waves in layered media.– Academic Press, 1976.– 520 p.
25. Gill P.E., Murray W. Algorithms for Nonlinear Least-Squares Problem // SIAM Journal on Numerical Analysis. – 1978. – V. 15. – №. 5. – P. 977-992.

**Для цитирования:**

Музалевский К.В. Особенности радиометрического зондирования влажности тундровых почв в Р-диапазоне частот. // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.12.9>