

Различение талых и мерзлых почв Аляски по многовременным радарным данным SENTINEL 1

Н.В. Родионова

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Московская область, г. Фрязино., пл. ак. Введенского, д. 1, e-mail: rnv@ire.rssi.ru

В работе рассматривается вопрос об различении талых и мерзлых почв в верхнем 5 см слое почвы для семи наземных станций Аляски с широтой места от 65° до 70° с.ш. по радарным данным Sentinel 1 C-диапазона за период 2016-2017 годов. Определение состояния мерзлой почвы осуществляется двумя способами: путем использования только радарных данных с нахождением порогового значения коэффициента обратного рассеяния (КОР) $\sigma_{\text{порог}}^0$, при котором температура в верхнем слое почвы опускается ниже 0°C, и при совместном использовании радарных данных и наземных измерений температуры почвы. В последнем случае определяется корреляция между радарными и наземными данными, и строятся регрессионные модели для нахождения связи между КОР и температурой почвы на глубине 5 см. Линейная регрессия позволяет найти пороговые значения КОР и построить локальные карты мерзлых и талых почв. Сравнение пороговых значений КОР, полученных двумя способами, показало близость значений, однако различие между значениями растет при уменьшении корреляции между радарными и наземными данными. Получена линейная регрессия для связи $\sigma_{\text{порог}}^0$ с широтой места.

This paper considers the question of determining frozen/unfrozen status of 5 cm upper layer of soil for seven ground stations in Alaska with latitude from 65° to 70° N by using radar Sentinel 1 C-band data for the period 2016-2017. Determine the status of frozen soil was carried out in two ways: using only radar data with finding the backscatter coefficient threshold, when the temperature in the upper soil layer falls below 0°C, or by using both radar data and ground-based measurements of soil temperature. In the latter case, the correlation between the backscattering coefficient and the soil temperature measured at 5 cm below the soil surface was calculated. Regression models were developed and radar backscatter thresholds for frozen soil were found. Local frozen/unfrozen soil maps were created. The comparison of threshold values obtained in two ways showed their closeness, which tends to decrease with decreasing correlation between radar and ground data. Linear regression model between radar backscatter threshold and the area latitude was developed.

Введение

Температура замерзания почвы определяется многими факторами. В зависимости от содержания солей, кислот, капиллярной структуры почвы температура замерзания может меняться в диапазоне отрицательных температур от десятых долей градуса до нескольких градусов Цельсия [1]

Дистанционное зондирование предлагает перспективные методы для мониторинга приповерхностного состояния мерзлых и талых почв в широких географических масштабах [2, 3]. Использование радиометров ограничено очень большими территориями из-за низкого пространственного разрешения. В отличие от ИК и микроволновых радиометров РСА (радар с синтезом апертуры) системы могут давать информацию при высоком пространственном разрешении о динамическом состоянии почвы при наличии снежного покрова вне зависимости от облачности и времени суток. Сигнал радара преимущественно зависит от диэлектрической проницаемости (ДП) почвы, которая напрямую связана с содержанием воды и льда, кроме того, на КОР влияют шероховатость поверхности и растительный покров.

Активные сенсоры различают мерзлую почву (МП) через изменение содержания жидкой воды в почве. Эти изменения связаны со значениями ДП почвы [4]. Среднее значение ДП сухой почвы порядка 2-3, в то время как жидкой воды 80. ДП почвы растет пропорционально объемному содержанию в ней жидкой воды. В критических зимних условиях большая часть воды в почве замерзает, что приводит к значительному уменьшению среднего значения ДП почвы. Мерзлая вода имеет значение ДП льда 3.2, что схоже с ДП сухой почвы [5]. Обратный процесс происходит весной, когда лед в почве тает, что приводит к увеличению коэффициента обратного рассеяния на несколько децибел [6].

Свойства почвы (структура, текстура, дренаж) влияют на содержание воды в почве и, сл., на динамику процесса ее замерзания. Минеральные почвы из-за их меньшей способности сохранять воду замерзают быстрее и на большую глубину, нежели органические почвы [6]. Такая же ситуация существует между песчаными и глинистыми почвами.

В качестве объекта исследования МП рассматривались 7 наземных станций на Аляске с широтой места от 65° до 70° , для которых есть наземная информация по параметрам почвы, находящаяся в открытом доступе на сайте International soil moisture network (ISMN) (<https://ismn.geo.tuwien.ac.at/>).

В качестве радарных данных используются Sentinel 1 (S1) данные С-диапазона IW (interferometric wide swath) моды с поляризациями (VV+VH) и 20 м пространственным разрешением за период 2016-2017 годов.

Целью работы является определение состояния замерзания/оттаивания почвы в верхнем 5 см слое, а также нахождение связи КОР с температурой верхнего слоя почвы, построение локальных карт мерзлых/талых почв, с использованием только радарных данных или радарных данных совместно с наземной информацией.

Наземные данные

В работе использовались наземные измерения параметров почвы (температуры и влажности на глубинах 5, 20 и 51 см) и температуры воздуха, находящиеся в открытом доступе на сайте International soil moisture network (<https://ismn.geo.tuwien.ac.at/>). Были выбраны 7 станций на Аляске, для которых период проведения наземных измерений совпадал с имеющейся на тот же период времени радарной информацией Sentinel 1. Расположение станций показано на рис. 1. Это наземные станции (с севера на юг) Prudhoe Bay, Innaviat Creek, Atigun Pass, Coldfoot, Gobblers Knob (эти пять станций выделены синим прямоугольником), Eagle Summit и Upper Nome Creek (станции выделены красным прямоугольником).

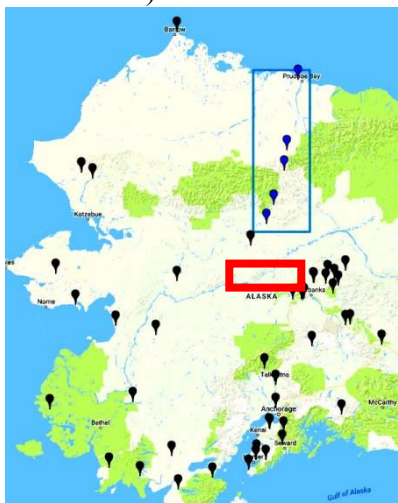


Рис.1. Расположение рассматриваемых наземных станций на Аляске.

Информация о наземных станциях, включенных в обработку, дана в таблице 1.

Таблица 1. Информация о наземных станциях Аляски (по данным ISMN).

Название станции	Широта (с.ш.), град	Долгота (з.д.), град	Тип растительности	Текстура почвы на глубине 0-30 см, %
Prudhoe Bay	70.27	-148.57	Скудная растительность (деревья, кусты, травяное покрытие)<15%	глина- 18, песок- 34, ил - 48.
Imnaviat Creek	68.62	-149.3	Скудная растительность<15%	глина- 9, песок-73, ил - 18.
Atigun Pass	68.13	-149.48	Лишайники и мох	глина- 9, песок-73, ил - 18.
Coldfoot	67.25	-150.18	Скудная растительность<15%	глина- 18, песок- 34, ил - 48.
Gobblers Knob	66.75	-150,67	Кусты	глина- 21, песок- 40, ил - 39.
Eagle Summit	65.49	-145.41	Скудная растительность<15%	глина- 21, песок- 40, ил - 39.
Upper Nome Creek	65.37	-146.59	Скудная растительность<15%	глина- 21, песок- 40, ил - 39.

На рис.2 показаны графики наземных измерений температуры (а) и влажности почвы на глубине 5 см (б) для станций Аляски за период 19.10.16- 20.10.17. Следует отметить, что для зимнего периода сведения о влажности почвы не надежны (см. <https://ismn.geo.tuwien.ac.at/>).

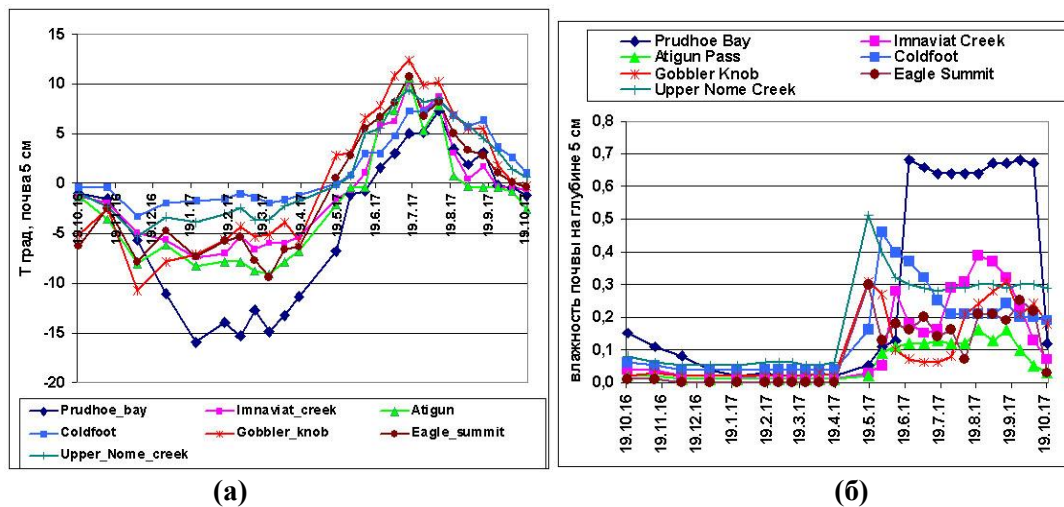


Рис. 2. Графики наземных измерений температуры (а) и влажности почвы на глубине 5 см (б) для станций Аляски за период 19.10.16 – 20.10.17 (ISMN).

Из рис.2 следует, что самые низкие температуры почвы на глубине 5 см для станции Prudhoe Bay- самой северной их рассматриваемых. Самые высокие температуры в зимний период – для станций Coldfoot и Upper Nome Creek. В последнем случае - это ожидаемо, поскольку Upper Nome Creek- самая южная из рассматриваемых станций. Для Coldfoot возможно это связано с высотой снежного покрова. Но как показывает график на рис.3 высота снежного покрова для этих двух станций практически одинаковая.

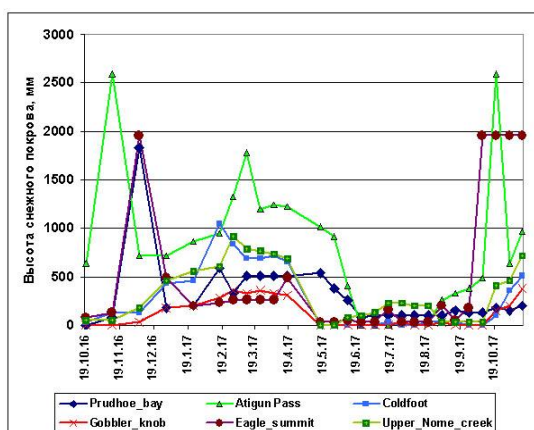


Рис.3. Высота снежного покрова в мм для наземных станций Аляски (ISMN) Исходные радарные данные Sentinel 1.

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 числу обработанных сеансов съемки, углу обзора, временному периоду съемки и количеству точек при усреднении КОР по профилю.

Таблица 2. Информация об использованных радарных данных Sentinel 1.

Название станции	Число обработанных сеансов съемки S1	Угол обзора	Период съемки	Количество точек в профиле
Prudhoe Bay	28	33 ⁰	19.10.16 – 25.11.17	~10
Imnaviat Creek	25	41 ⁰	21.10.16 – 27.11.17	~10
Atigun Pass	25	37 ⁰	31.10.16 – 7.11.17	~10
Coldfoot	24	42 ⁰	14.11.16 – 27.11.17	~10
Gobblers Knob	23	43 ⁰	14.11.16 – 27.11.17	~10
Eagle Summit	28	40 ⁰	23.10.16 – 29.11.17	~15
Upper Nome Creek	28	40 ⁰	23.10.16 – 29.11.17	~15

Определение состояния мерзлой почвы по радарным данным

Глубина проникновения э/м волны в почву определяется по формуле

$$\delta p = \frac{\lambda \cdot \sqrt{\varepsilon'}}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\varepsilon''}}, \text{ где } \lambda - \text{длина э/м волны, } \varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon'' - \text{диэлектрическая проницаемость}$$

почвы. Для Sentinel 1 длина волны равна 5,4 см. В случае мерзлой почвы с $\varepsilon' \approx 5.5$ и $0.1 \leq \varepsilon'' \leq 0.5$ получаем глубину проникновения э/м волны в почву $2.85 \leq \delta p \leq 6.38$ см.

Метод идентификации талого и мерзлого состояния почвы основывается на перепаде КОР на 3-5 дБ при переходе к состоянию замерзания или оттаивания [2, 3].

Используя временной ряд S1, определим даты замерзания/оттаивания МП по сильным перепадам σ^0 и далее стабильно низким/высоким значениям σ^0 . На рис. 4 показаны графики разности значений по абсолютной величине σ^0 VV поляризации в дБ для соседних дат, по которым два максимума позволяют определить даты

замерзания почвы и даты оттаивания. Для станции Prudhoe Bay первый максимум равен **2.69** дБ – это $\text{abs}(-11,53+14,22)$ [дБ]= $\text{abs}(\sigma_{29.5.2017}^0 - \sigma_{17.5.2017}^0)$ [дБ] - это даты оттаивания почвы. Второй максимум определяет дату замерзания почвы, $\text{max}= 1.69$ дБ= $\text{abs}(-16,36+14,67)$ [дБ]= $\text{abs}(\sigma_{20.10.2017}^0 - \sigma_{8.10.2017}^0)$ [дБ] - замерзание почвы на глубине 5 см. Для наземной станции Coldfoot перепад значений σ^0 при замерзании почвы составляет порядка **3.9** дБ = $\text{abs}(\sigma_{10.10.2017}^0 - \sigma_{28.09.2017}^0)$. При определении даты оттаивания почвы возникают сложности с нахождением соответствующего максимума. Следует отметить, что сложности определения максимумов возрастают по мере смещения по широте на юг.

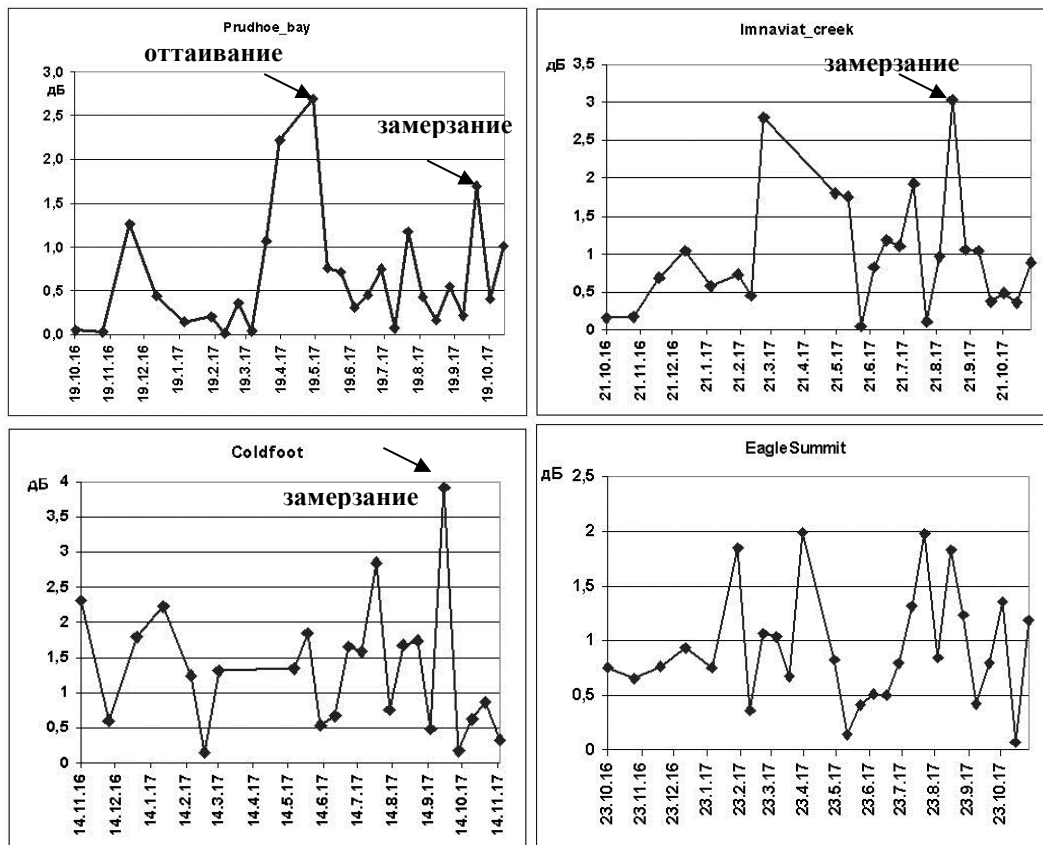


Рис. 4. Графики разности значений σ^0 VV поляризации для соседних дат.

Еще один способ определения состояния МП только по радарным данным, не используя наземные измерения, показан в работе [8]. Авторы [8] предложили уравнение, характеризующее состояние поверхности почвы. Аналогом для него послужило уравнение в работе [9] для фактора, связанного с радиояркостной температурой почвы.

Авторы [8] характеризуют состояние поверхности почвы через фактор состояния поверхности (СПФ):

$$\text{СПФ} = \frac{1}{2} + \frac{\sigma^0(t) - \sigma_{\text{лето}}^0}{\sigma_{\text{лето}}^0 - \sigma_{\text{зима}}^0} \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{лето}}^0$ и $\sigma_{\text{зима}}^0$ - средние значения КОР, соответственно, летом и зимой,

$\sigma^0(t)$ - текущее значение КОР,

t – время.

Авторы [8] утверждают, что сезонные вариации СПФ сильно коррелируют с сезонными вариациями температуры почвы, принимая отрицательные значения при температуре почвы ниже 0°C . Сл., 5-см верхний слой почвы можно классифицировать как замерзший, если СПФ, измеренный радаром, принимает отрицательные значения. На рис. 5 показан график СПФ для VV поляризации для станции Prudhoe bay.

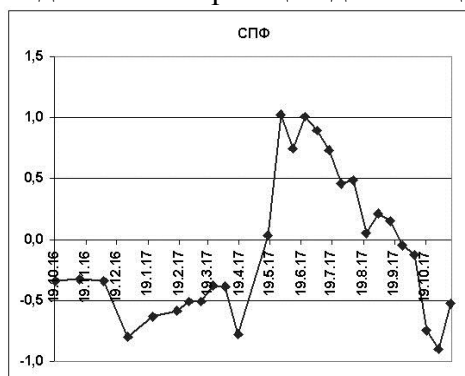


Рис. 5. Изменение СПФ для VV поляризации для станции Prudhoe bay.

По формуле (1) получается, что пересечение значения $\text{СПФ}=0$ происходит для одного и того же значения $\sigma^0(t)$, но для разного времени t , т.е. значение σ^0 одно и то же как для точки замерзания, так и для точки оттаивания почвы на глубине 5 см. И это значение можно определить для каждого места, зная среднее значения $\sigma_{\text{лето}}^0$ и $\sigma_{\text{зима}}^0$. Назовем это значение σ^0 через $\sigma_{\text{порог}}^0$. Значения $\sigma_{\text{порог}}^0$, вычисленные по формуле (1) для всех семи рассматриваемых станциях на Аляске, приведены в таблице 3.

Таблица 3.

Наземная станция	Prudhoe Bay	Imnaviat Creek	Atigun Pass	Coldfoot	Gobblers Knob	Eagle Summit	Upper Nome Creek
$\sigma_{\text{порог}}^0$ [дБ]	-14,35	-17,56	-12,1	-14,16	-15,5	-11,66	-10,62

Авторы [8] отметили сильную изменчивость СПФ в зависимости от широты места. Воспользуемся данными из таблицы 3 для четырех станций с одинаковым типом растительности - Imnaviat Creek, Coldfoot, Eagle Summit, Upper Nome Creek- для определения связи $\sigma_{\text{порог}}^0$ с широтой места. В результате на рис. 6 показано полученное регрессионное соотношение с коэффициентом детерминации 0.97, связывающее значение $\sigma_{\text{порог}}^0$ [дБ] с широтой места,



Рис. 6. Изменение $\sigma_{\text{порог}}^0$ с широтой места.

Если известна температура воздуха, то средние значения КОР за летний и зимний периоды можно определить, используя, например, работу [10], где зимний и летний периоды авторы определяют следующим образом: если $T_{\text{воздух}}$ меньше температуры зимнего порога (ЗП), равной -3°C , т.е. $T_{\text{воздух}} < T_{\text{ЗП}} = -3^{\circ}\text{C}$, то соответствующая дата рассматривается как принадлежащая зимнему периоду. Аналогично, для определения летнего периода используется порог для лета в $+3^{\circ}\text{C}$, и при $T_{\text{воздух}} > T_{\text{ЛП}} = +3^{\circ}\text{C}$ соответствующая дата рассматривается как принадлежащая летнему периоду. В обоих случаях опускаются дни с мокрым снегом. Для Prudhoe Bay, используя наземные измерения температуры воздуха по ISMN и условие для принадлежности даты к зимнему или летнему периоду, усредняем КОР за 22.6.17-14.9.17 и получаем $\sigma_{\text{лето}}^0 = -12.96$ дБ, и при усреднении значений КОР за периоды 19.10.16-17.5.17 и 20.10.17-25.11.17, получаем $\sigma_{\text{зима}}^0 = -15.68$ дБ. Отличие данных значений от значений, полученных без использования данных о температуре воздуха (при использовании перепадов КОР), находится во втором знаке после запятой. Сл., для определения СПФ можно не пользоваться наземными измерениями температуры воздуха, и достаточно наличие только радарных данных.

Используя значение $\sigma_{\text{порог}}^0$, можно построить локальную карту мест замерзания/оттаивания почвы с одинаковым типом надпочвенной растительности в окрестности рассматриваемой широты. На рис. 7 приведены изображения (размеры 4.2×3.9 км) для станции Coldfoot с $\sigma_{\text{порог}}^0 = -14.16$ дБ для дат 28.09.2016 и 22.10.2017 (замерзание), где синим цветом показаны области с замерзшей почвой на глубине 5 см, и для дат 19/05/2017 и 12/06/2017 (оттаивание). Отмечаем значительное увеличение площади зон замерзания на изображении за 22.10.2017 и уменьшение площади замерзшей почвы на изображении за 12/06/2017 при оттаивании.

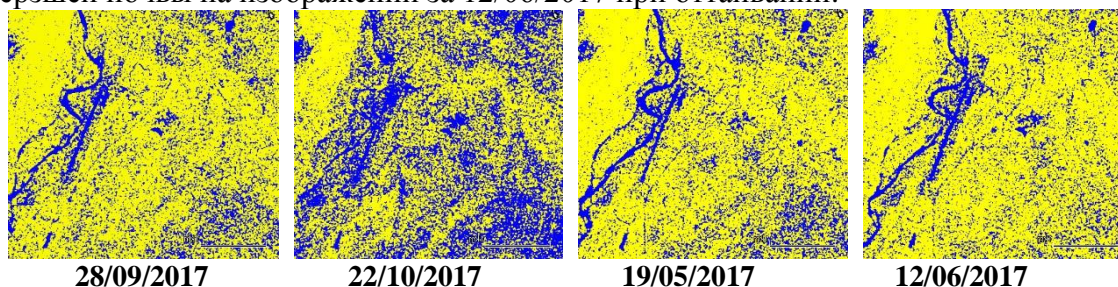


Рис. 7. Локальные карты зон замерзшей (синий цвет) и незамерзшей почвы на глубине 5 см для Coldfoot с $\sigma_{\text{порог}}^0 = -14.16$ дБ.

Определение состояния мерзлой почвы по корреляции между радарными и наземными данными

Впервые сильная корреляционная связь КОР с температурой талой и мерзлой почвы на глубине 5 см была экспериментально установлена в работах [2, 3] при измерениях в С-диапазоне НН поляризации радаром КА RADARSAT-1. Простая линейная регрессия показала положительную корреляцию между σ^0 и температурой почвы с разными коэффициентами детерминации (КД) в зависимости от механического состава почвы. Регрессионные модели были получены для нахождения порога $\sigma_{\text{порог}}^0$, который использовался для разделения замерзших и незамерзших почв. Этот порог $\sigma_{\text{порог}}^0$ является значением КОР, при котором соответствующая температура почвы ниже 0°C . Авторы использовали эмпирически полученную температурную зависимость КОР для построения карты талых и мерзлых почв на сельскохозяйственных полях в районе г. Квебек (Канада).

Авторы работы [11] показали наличие сильной корреляции между ко - поляризационным отношением (КО) сечений обратного радарного рассеяния на горизонтальной и вертикальной поляризациях и средней температурой в верхнем слое почвы толщиной 0,1 м. На базе этого авторами [11] предложено дистанционно измерять среднюю температуру в верхнем слое почвы по измеряемым значениям КО. В качестве КА рассматривался ALOS PALSAR с полной поляризиметрией.

В данной работе для определения корреляции между КОР и температурой почвы на глубине 5 см использовались S1 радарные данные С-диапазона VV поляризации и наземная информация на сайте International soil moisture network (<https://ismn.geo.tuwien.ac.at/>). Линейные регрессионные модели между T^0 почвы на глубине 5 см и КОР позволяют предсказать T^0 почвы и построить карты мерзлых почв, используя пороговое значение $\sigma_{порог}^0$. Недостаток здесь в том, что при невысоком коэффициенте детерминации точность определения порога тоже будет невелика.

В таблице 4 приведены значения коэффициента корреляции Спирмена между КОР и наземными измерениями температуры почвы на глубине 5, 20 и 51 см, а также температуры воздуха.

Таблица 4.

	Prudhoe Bay,	Eagle Summit,	Upper Nome Creek
T^0 , воздух			
σ_{VV}^0	$\rho_s=0.71, p=10^{-6}$	$\rho_s=0.24, p=0,1$	$\rho_s=0.64, p=10^{-4}$
T^0 , почва 5 см			
σ_{VV}^0	$\rho_s=0,69, p=10^{-5}$	$\rho_s=0.38, p=0,02$	$\rho_s=0.78, p=0$
T^0 , почва 20 см			
σ_{VV}^0	$\rho_s=0.5, p=10^{-3}$	$\rho_s=0.36, p=0,03$	$\rho_s=0.78, p=0$
T^0 , почва 51 см			
σ_{VV}^0	$\rho_s=0.32, p=0.05$	$\rho_s=0.26, p=0,08$	$\rho_s=0.74, p=10^{-5}$

	Imnaviat Creek,	Atigun Pass	Coldfoot,	Gobblers Knob,
T^0 , воздух				
σ_{VV}^0	$\rho_s=0.8,$ $p=10^{-6}$	$\rho_s=-0.24,$ $p=0.12$	$\rho_s=0.58,$ $p=10^{-3}$	$\rho_s=0.44,$ $p=0.02$
T^0 , почва 5 см				
σ_{VV}^0	$\rho_s=0.74,$ $p=10^{-5}$	$\rho_s=-0.37,$ $p=0.03$	$\rho_s=0.65,$ $p=10^{-4}$	$\rho_s=0.49,$ $p=0.01$
T^0 , почва 20 см				
σ_{VV}^0	$\rho_s=0.73,$ $p=10^{-5}$	$\rho_s=-0.35,$ $p=0.04$	$\rho_s=0.56,$ $p=10^{-3}$	$\rho_s=0.55,$ $p=0.003$
T^0 , почва 51 см				
σ_{VV}^0	$\rho_s=0.68,$ $p=10^{-4}$	$\rho_s=-0.38,$ $p=0.03$	$\rho_s=0.3,$ $p=0.07$	$\rho_s=0.54,$ $p=0.003$

На рис. 8 приведены регрессионные соотношения с высокой корреляцией между КОР и наземными измерениями температуры почвы на глубине 5 см для наземных станций Prudhoe Bay, Imnaviat Creek, Upper Nome Creek и Coldfoot.

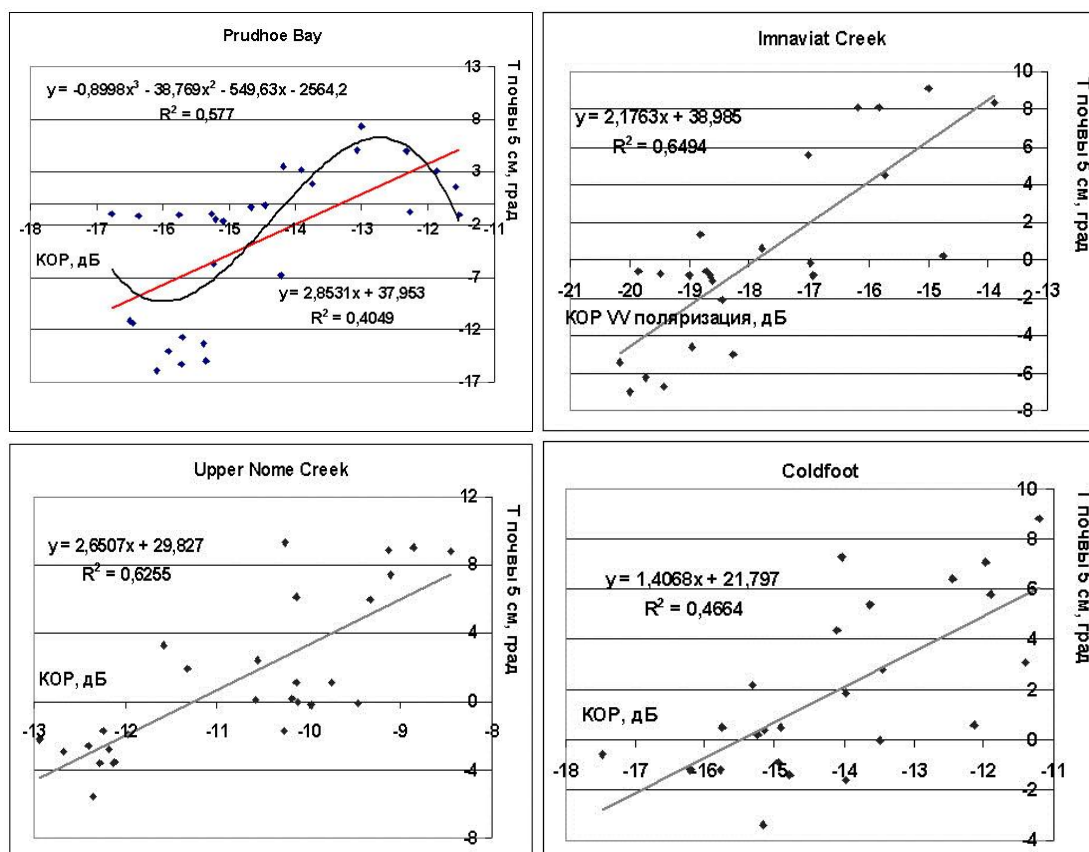


Рис.8. Регрессионные соотношения между КОР (в дБ) VV поляризации и температурой почвы на глубине 5 см (град).

Сравним значения $\sigma_{порог}^0$, полученные из регрессии, с $\sigma_{порог}^0$ в Таблице 3, полученные без использования наземной информации. Разница в значениях меньше 1 дБ при высокой корреляции (Prudhoe Bay, Imnaviat Creek, Upper Nome Creek) и больше 1 дБ при средней корреляции (Coldfoot).

Таблица 5. Значение порога $\sigma_{порог}^0$ по регрессии

Наземная станция	Prudhoe Bay	Imnaviat Creek	Coldfoot	Upper Nome Creek
$\sigma_{порог}^0$ [дБ]	-13,3	-17,94	-15,5	-11,25

Значение коэффициента детерминации R^2 больше для станций с большим процентным содержанием песка в почве. Так, значение $R^2 = 0,65$ получено для Imnaviat Creek с 73% содержанием песка в почве, а для станций с 34% содержанием песка в почве (Prudhoe Bay, Coldfoot) $R^2 \approx 0,4$.

Заключение

В работе рассматривается вопрос об определении состояния замерзания и оттаивания в верхнем 5 см слое почвы для семи наземных станций Аляски с широтой места от 65^0 до 70^0 с.ш. по радарным данным S1 за период 2016-2017 годов. Определение состояния МП осуществлялось двумя способами: 1) с помощью радарных данных с нахождением порогового значения коэффициента обратного рассеяния $\sigma_{порог}^0$, при котором температура в верхнем слое почвы опускается ниже 0^0C , и 2) при совместном использовании радарных данных и наземных измерений температуры почвы. В последнем случае определяется корреляция между КОР и

температурой почвы на разных глубинах от 5 см до 51 см. Показано, что коэффициент корреляции Спирмена наибольший между КОР и температурой почвы на глубине 5 см. В случае высокой и умеренной корреляции построены регрессионные модели для связи между КОР и температурой почвы на глубине 5 см для станций Prudhoe Bay, Imnaviat Creek, Upper Nome Creek и Coldfoot с коэффициентами детерминации в случае линейной регрессии, соответственно, 0.4, 0.64, 0.62 и 0.46. Показано, что КД растет с ростом процентного содержания песка в почве. Найденные пороговые значения КОР VV поляризации позволили построить локальные карты мерзлых и талых почв. Сравнение пороговых значений КОР, полученных двумя способами, показало близость значений, но различие между значениями растет при уменьшении корреляции между радарными и наземными данными. Разница в значениях меньше 1 дБ при высокой корреляции (Prudhoe Bay, Imnaviat Creek, Upper Nome Creek) и больше 1 дБ при средней корреляции (Coldfoot). Получена линейная регрессия с $R^2=0.97$ для связи $\sigma_{порог}^0$ VV поляризации с широтой места.

Литература

1. Миронов В.Л., Косолапова Л.Г., Савин И.В. Диэлектрическая модель талой и мерзлой органической почвы на частоте радиометра AMSR// ИЗК. № 5.с. 9-15. 2015.
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// Proc. IGARSS 2008. Vol.III-382-385. 6-11 July 2008. Boston. Massachusetts
3. Khaldoune J., Van Bochove E., Bernier M.,Nolin M.C. Mapping agricultural frozen soil on the watershed scale using remote sensing data// Appl. Environment. Soil Sci. Vol. 2011, Article ID 193237. P. 1-16.
4. 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 GRS. Vol. 23. No. 1. pp. 25-34. 1985.
5. Way J.B., Zimmermann R., Rignot E., McDonald K., Oren R. Winter and spring thaw as observed with imaging radar at BOREAS// J. Geoph. Res. Vol.102. No. 24. pp. 29673-29684. 1997.
6. Ulaby F.T., Moore R.K., Fung A.K. Microwave Remote Sensing:Active and Passive: Vol. 1. Fundamentals and Radiometry. Artech House, Dedham, Mass, USA, 1982.
7. Lars Nyberg, Manfred St`ahli, Per-Erik Mellander and Kevin H. Bishop. Soil frost effects on soil water and runoff dynamics along a boreal forest transect: 1. Field investigations// *Hydrol. Process.* Vol.15. no.6, pp. 909–926. 2001.
8. Mironov V.L., Muzalevsky K.V. Spaceborne radar monitoring of soil freezing/thawing processes in the arctic tundra// Russian Physics Journal, Vol. 55, No.8, January, 2013 (Russian Original No. 8, August, 2012)
9. Kim Y., Kimball J.S., McDonald K.C., Glassy J. Developing a global data record of daily landscape freeze/thaw status using satellite passive microwave remote sensing//IEEE Trans. GRS, Vol. 49, No. 3, 2011, pp.949-960.
10. Rautiainen et al. , 2016. K. Rautiainen, T. Parkkinen, J. Lemmetyinen, M. Schwank, A.Wiesmann, J. Ikonen, Ch. Derksen, S. Davydov, A. Davydova, J. Boike, M. Langer, M. Drusch, J. Pulliainen. SMOS prototype algorithm for detecting autumn soil freezing//Remote Sensing of Environment 180 (2016) 346–360.
11. В.Л. Миронов, К.В. Музалевский. Космический радиолокационный мониторинг процессов замерзания и оттаивания почвы арктической тундры//Известия Высших учебных заведений. Физика. Т. 55. № 8. 2012. с.40-43.