

ОБРАТНОЕ РАССЕЯНИЕ ОТ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ТАЛЫХ/МЕРЗЛЫХ ПОЧВ АЛЯСКИ ПО РАДАРНЫМ ДАННЫМ SENTINEL 1

Родионова Н.В.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, <http://fire.relarn.ru>
Фрязино 141190, Московская область, Российская Федерация

Поступила 13.03.2019, принята 29.03.2019

Представлена членом-корреспондентом РАЕН Я.А. Илюшиным

В работе рассматривается вопрос об идентификации талых и мерзлых почв в верхнем 5 см слое для семи наземных станций Аляски с широтой места от 65° до 70° с.ш. по радарным данным Sentinel 1 С-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) σ_{thr}^0 , при котором температура в верхнем слое почвы опускается ниже 0°С, и при совместном использовании радарных данных и наземных измерений температуры почвы. В последнем случае определяется корреляция между радарными и наземными данными, и строятся регрессионные соотношения 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 σ_{thr}^0 с широтой места.

Ключевые слова: радарные данные С-диапазона, температура почвы, замерзание почвы, оттаивание почвы, коэффициент обратного рассеяния, коэффициент корреляции Спирмена

УДК 528.854, 528.88

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (21)
 2. НАЗЕМНЫЕ ДАННЫЕ (22)
 3. ИСХОДНЫЕ РАДАРНЫЕ ДАННЫЕ SENTINEL 1 (23)
 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТОЯНИЯ МЕРЗЛОЙ ПОЧВЫ ПО РАДАРНЫМ ДАННЫМ (24)
 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТОЯНИЯ МЕРЗЛОЙ ПОЧВЫ ПО КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ РАДАРНЫМИ И НАЗЕМНЫМИ ДАННЫМИ (27)
 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (29)
- ЛИТЕРАТУРА (29)

1. ВВЕДЕНИЕ

Дистанционное зондирование предлагает перспективные методы для мониторинга приповерхностного состояния мерзлых и талых почв в широких географических масштабах [1], [2]. 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 (сухой снег) 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 коэффициент обратного рассеяния (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 [3]. 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 [4]. Обратный процесс происходит весной, когда лед в почве тает, что приводит к увеличению коэффициента обратного рассеяния на несколько децибел [5].

Свойства почвы (структура, текстура, дренаж) влияют на содержание воды в почве и, следовательно, на динамику процесса ее замерзания. Минеральные почвы из-за меньшей их способности сохранять воду замерзают быстрее и на большую глубину, нежели органические почвы [5]. 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) [6].

В качестве радарных данных используются Sentinel 1 (S1) данные С-диапазона IW (interferometric wide swath)

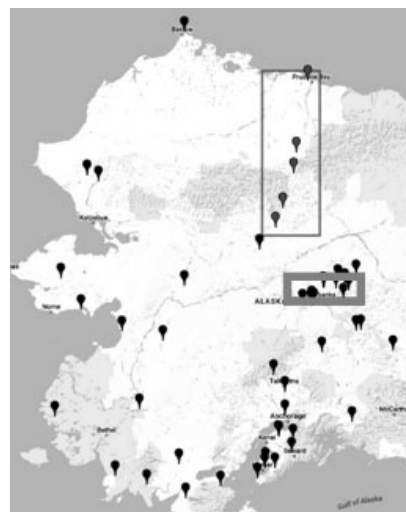


Рис. 1. Расположение рассматриваемых наземных станций на Аляске.

моды с поляризациями (VV+VH) и 10 м пространственным разрешением за период 2016-2017 годов.

Целью работы является различение талых и мерзлых почв в верхнем 5 см слое, 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.

2. 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 [6]. Были выбраны 7 станций на Аляске, для которых период

Таблица 1

Информация о наземных станциях Аляски (по данным ISMN).

Название станции	Широта (с.ш.), град	Долгота (з.д.), град	Гранулометрический состав почвы на глубине 0-30 см, %
Prudhoe Bay	70.27	-148.57	супесь-48, песок-34, глина-18
Imnaviat Creek	68.62	-149.3	песок-73, супесь-18, глина-9
Atigun Pass	68.13	-149.48	песок-73, супесь-18, глина-9
Coldfoot	67.25	-150.18	супесь-48, песок-34, глина-18
Gobblers Knob	66.75	-150.67	песок-40, супесь-39, глина-21
Eagle Summit	65.49	-145.61	песок-40, супесь-39, глина-21
Upper Nome Creek	65.37	-146.59	песок-40, супесь-39, глина-21

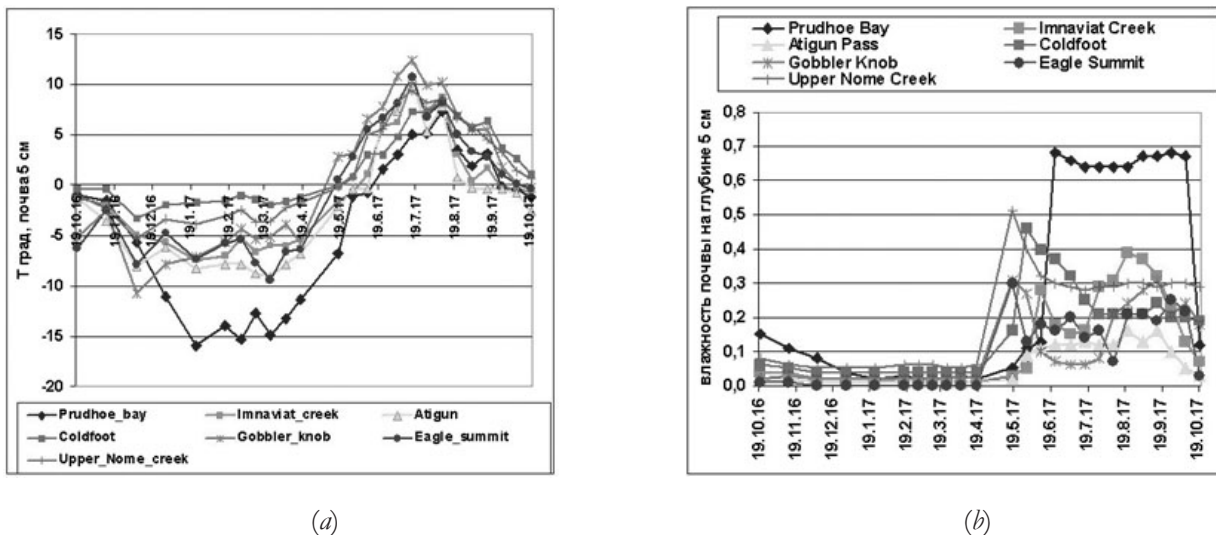


Рис. 2. Графики наземных измерений температуры (а) и объемной влажности почвы на глубине 5 см (б) для станций Аляски за период 19.10.16 – 20.10.17 (ISMN).

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, Imnaviat Creek, Atigun Pass, Coldfoot, Gobblers Knob, Eagle Summit и Upper Nome Creek (станции выделены прямоугольниками).

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

На рис. 2 показаны графики наземных измерений температуры (а) и объемной влажности почвы на глубине 5 см (б) для станций Аляски за период 19.10.16- 20.10.17. Обе величины (температура и влажность почвы) взяты из базы данных наземных измерений ISMN на момент времени съемки территории радаром Sentinel 1. Следует отметить, что для зимнего периода сведения о влажности почвы не надежны (см. [6]).

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.

3. 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 10 м. Работа с изображениями S1 осуществлялась с помощью программы S1Toolbox и позднее

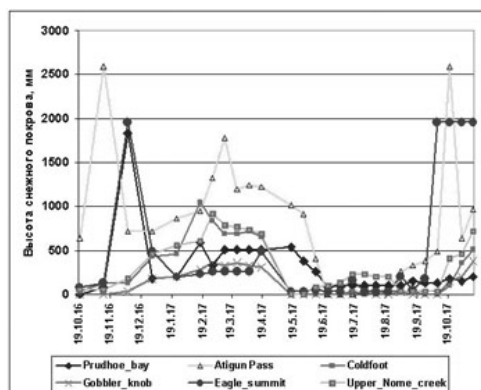


Рис. 3. Высота снежного покрова в мм для наземных станций Аляски (ISMN).

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°	19.10.16 – 25.11.17	~10
Imnaviat Creek	28	41°	21.10.16 – 27.11.17	~10
Atigun Pass	25	37°	31.10.16 – 7.11.17	~10
Coldfoot	24	42°	14.11.16 – 27.11.17	~10
Gobblers Knob	23	43°	14.11.16 – 27.11.17	~10
Eagle Summit	28	40°	23.10.16 – 29.11.17	~15
Upper Nome Creek	28	40°	23.10.16 – 29.11.17	~15

SNAP [7].

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

В табл. 2 приведены данные для каждой станции по числу обработанных сеансов съемки, углу обзора, временному периоду съемки и количеству точек при усреднении КОР по профилю.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТОЯНИЯ МЕРЗЛОЙ ПОЧВЫ ПО РАДАРНЫМ ДАННЫМ

Глубина проникновения э/м волны в почву определяется по формуле $\delta p = \lambda \sqrt{\varepsilon'} / (2\pi\varepsilon'')$, где λ – длина э/м волны, $\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon''$ – 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 $4 \leq \delta p \leq 20$ см.

Метод идентификации талого и мерзлого состояния почвы основывается на перепаде КОР на 3-5 дБ при переходе к состоянию замерзания или оттаивания [1], [2]. Используя временной ряд S1, определим даты замерзания/оттаивания МП по сильным перепадам КОР 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.

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 (surface state factor, SSF):

$$SSF = \frac{1}{2} + \frac{\sigma^0(t) - \sigma_{sum}^0}{\sigma_{sum}^0 - \sigma_{win}^0}, \quad (1)$$

где σ_{sum}^0 и σ_{win}^0 – средние значения КОР,

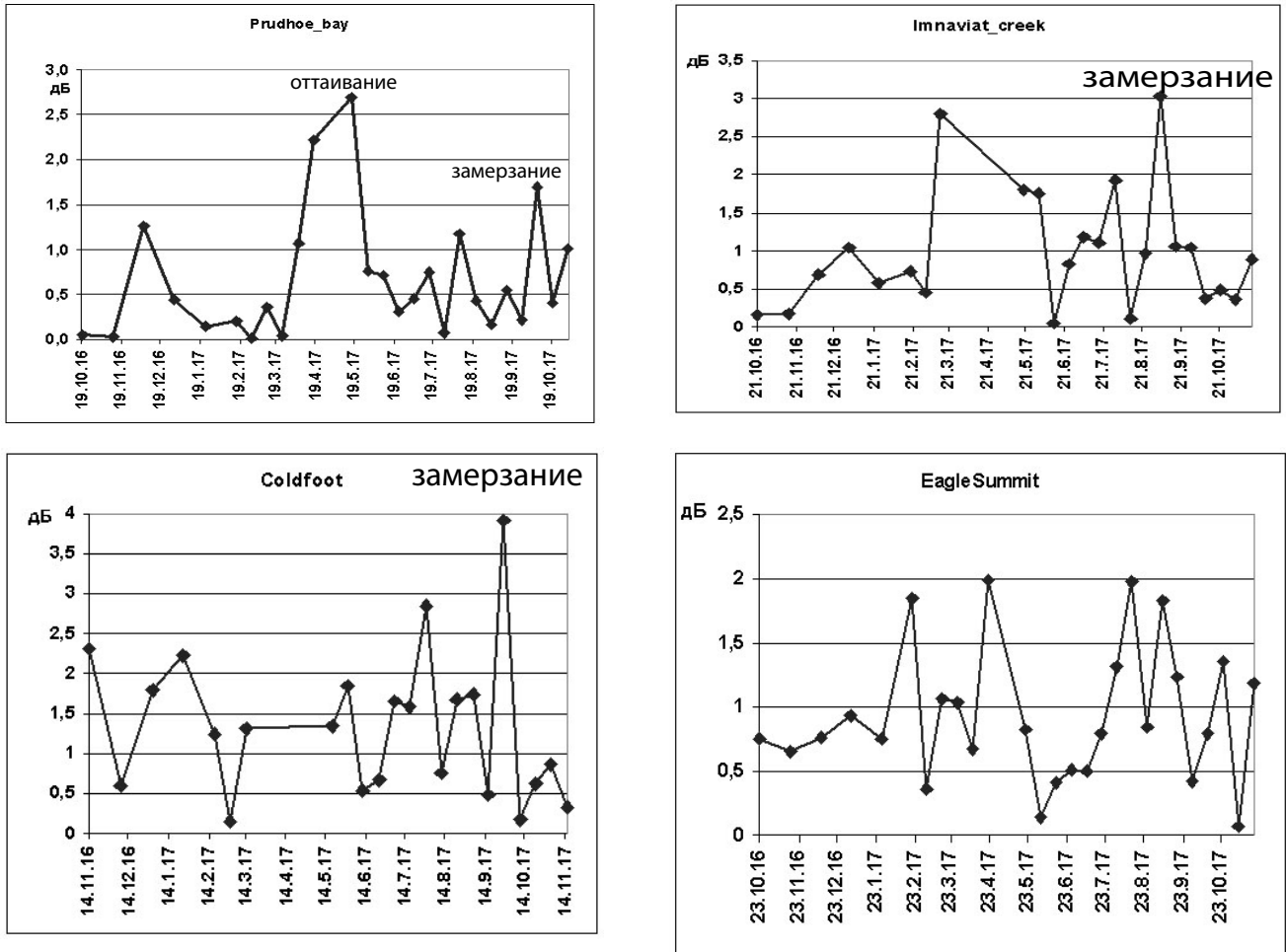


Рис. 4. Графики разности значений σ^0 VV поляризации для соседних дат.

соответственно, летом и зимой, $\sigma^0(t)$ – текущее значение КОР, t – время.

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

По формуле (1) получается, что пересечение значения $\text{SSF} = 0$ 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 σ_{sum}^0 и σ_{win}^0 . Назовем это значение σ^0 через σ_{thr}^0 . Значения σ_{thr}^0 , вычисленные по формуле (1) для всех семи рассматриваемых станций на

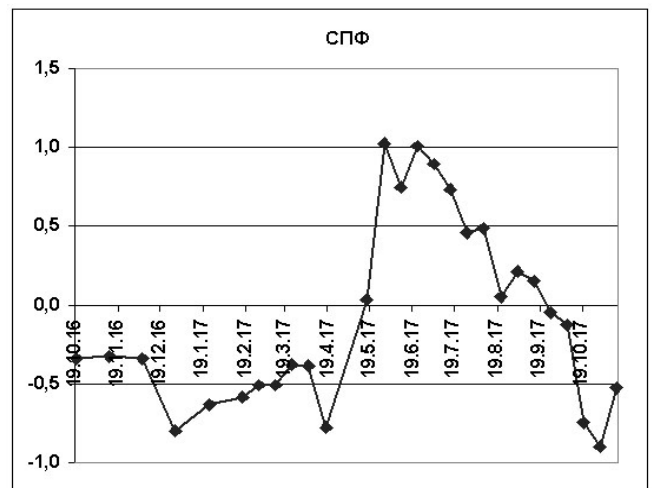


Рис. 5. Изменение SSF для VV поляризации для станции Prudhoe bay.

Таблица 3.

Значения σ_{thr}^0 при SSF = 0.

Наземная станция	Prudhoe Bay	Imnaviat Creek	Atigun Pass	Coldfoot	Gobblers Knob	Eagle Summit	Upper Nome Creek
σ_{thr}^0 [дБ]	-14.35	-17.56	-12.1	-14.6	-15.5	-11.66	-10.62

Аляске, приведены в табл. 3.

Авторы [8] отметили сильную изменчивость SSF в зависимости от широты места. Воспользуемся данными из табл. 3 для четырех станций Imnaviat Creek, Coldfoot, Eagle Summit, Upper Nome Creek для определения связи σ_{thr}^0 с широтой места. На рис. 6 показано полученное регрессионное соотношение с коэффициентом детерминации 0.97, связывающее значение σ_{thr}^0 [дБ] 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_{air} меньше температуры

зимнего порога (WT), равной $-3^{\circ}C$, т.е. $T_{air} < T_{WT} = -3^{\circ}C$, то соответствующая дата рассматривается как принадлежащая зимнему периоду. Аналогично, для определения летнего периода используется порог для лета в $+3^{\circ}C$, и при $T_{air} > T_{ST} = +3^{\circ}C$ 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 $\sigma_{sum}^0 = -12.96$ дБ, и при усреднении значений КОР за периоды 19.10.16-17.5.17 и 20.10.17-25.11.17, получаем $\sigma_{win}^0 = -15.68$ дБ. Отличие данных значений от значений, полученных без использования данных о температуре воздуха (при использовании перепадов КОР), находится во втором знаке после запятой.

Используя значение σ_{thr}^0 , можно построить локальную карту мест заморозки/оттаивания почвы в окрестности рассматриваемой широты. На рис. 7 приведены изображения (размеры 4.2×3.9 км) для станции Coldfoot с $\sigma_{thr}^0 = -14.16$ дБ для дат 28.09.2016 и 22.10.2017 (заморозание), где темным тоном показаны

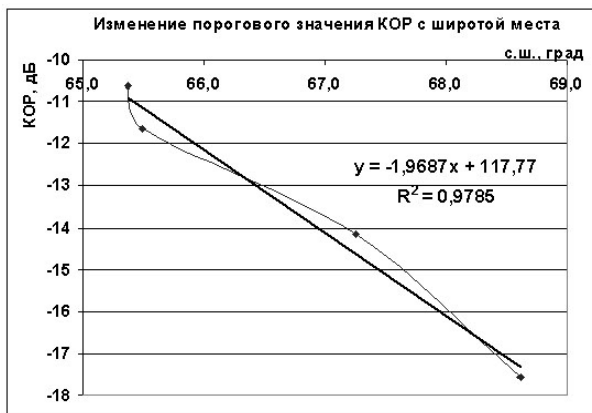


Рис. 6. Изменение σ_{thr}^0 с широтой места.

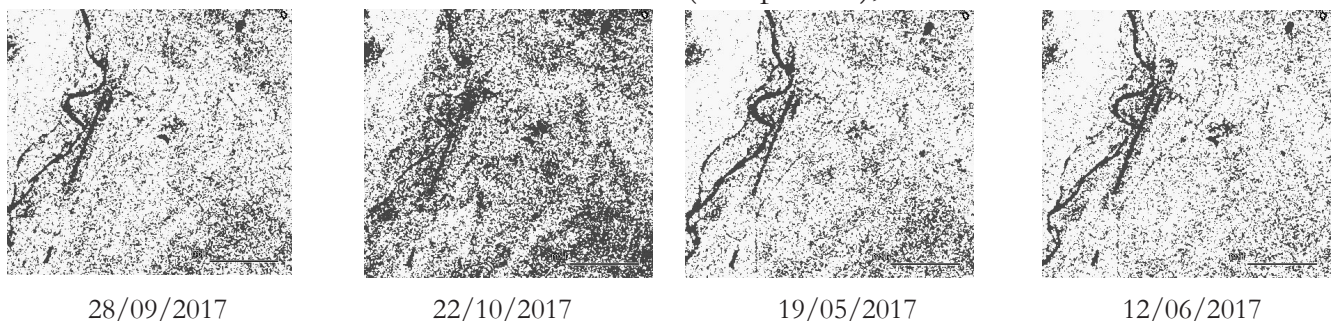


Рис. 7. Локальные карты зон заморозки (темный тон) и незамерзшей почвы (светлый тон) на глубине 5 см для Coldfoot с $\sigma_{thr}^0 = -14.16$ дБ.

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.

5. 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 [1], [2] 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 σ_{thr}^0 , который использовался для разделения замерзших и незамерзших почв. Этот порог σ_{thr}^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 кополяризационным 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 космического аппарата рассматривался ALOS PALSAR с полной поляризиметрией.

В настоящей 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 ISMN [6]. Линейные регрессионные модели между T° почвы на глубине 5 см и КОР позволяют предсказать T° почвы и построить карты мерзлых почв, используя пороговое значение σ_{thr}^0 . Недостаток здесь в том, что при невысоком коэффициенте детерминации точность определения порога тоже будет невелика.

Таблица 4.

Коэффициент корреляции Спирмена ρ_s между КОР и наземными измерениями температуры воздуха и почвы.

	Prudhoe Bay	Eagle Summit	Upper Nome Creek	Imnaviat Creek	Atigun Pass	Coldfoot	Gobblers Knob
T° , воздух							
σ_{vv}^0	$\rho_s = 0.71, p=10^{-6}$	$\rho_s = 0.24, p=0.1$	$\rho_s = 0.64, p=10^{-4}$	$\rho_s = 0.8, p = 10^{-6}$	$\rho_s = -0.24, p=0.12$	$\rho_s = 0.58, p=10^{-3}$	$\rho_s = 0.44, p=0.02$
T° , почва 5 см							
σ_{vv}^0	$\rho_s = 0.69, p=10^{-5}$	$\rho_s = 0.38, p=0.02$	$\rho_s = 0.78, p=0$	$\rho_s = 0.74, p=10^{-5}$	$\rho_s = 0.37, p=0.03$	$\rho_s = 0.65, p=10^{-4}$	$\rho_s = 0.49, p=0.01$
T° , почва 20 см							
σ_{vv}^0	$\rho_s = 0.5, p=10^{-3}$	$\rho_s = 0.36, p=0.03$	$\rho_s = 0.78, p=0$	$\rho_s = 0.73, p = 10^{-5}$	$\rho_s = -0.35, p = 0.04$	$\rho_s = 0.56, p = 10^{-3}$	$\rho_s = 0.55, p = 0.003$
T° , почва 51 см							
σ_{vv}^0	$\rho_s = 0.32, p=0.05$	$\rho_s = 0.26, p=0.08$	$\rho_s = 0.74, p=10^{-5}$	$\rho_s = 0.68, p = 10^{-4}$	$\rho_s = -0.38, p = 0.03$	$\rho_s = 0.3, p = 0.07$	$\rho_s = 0.54, p = 0.003$

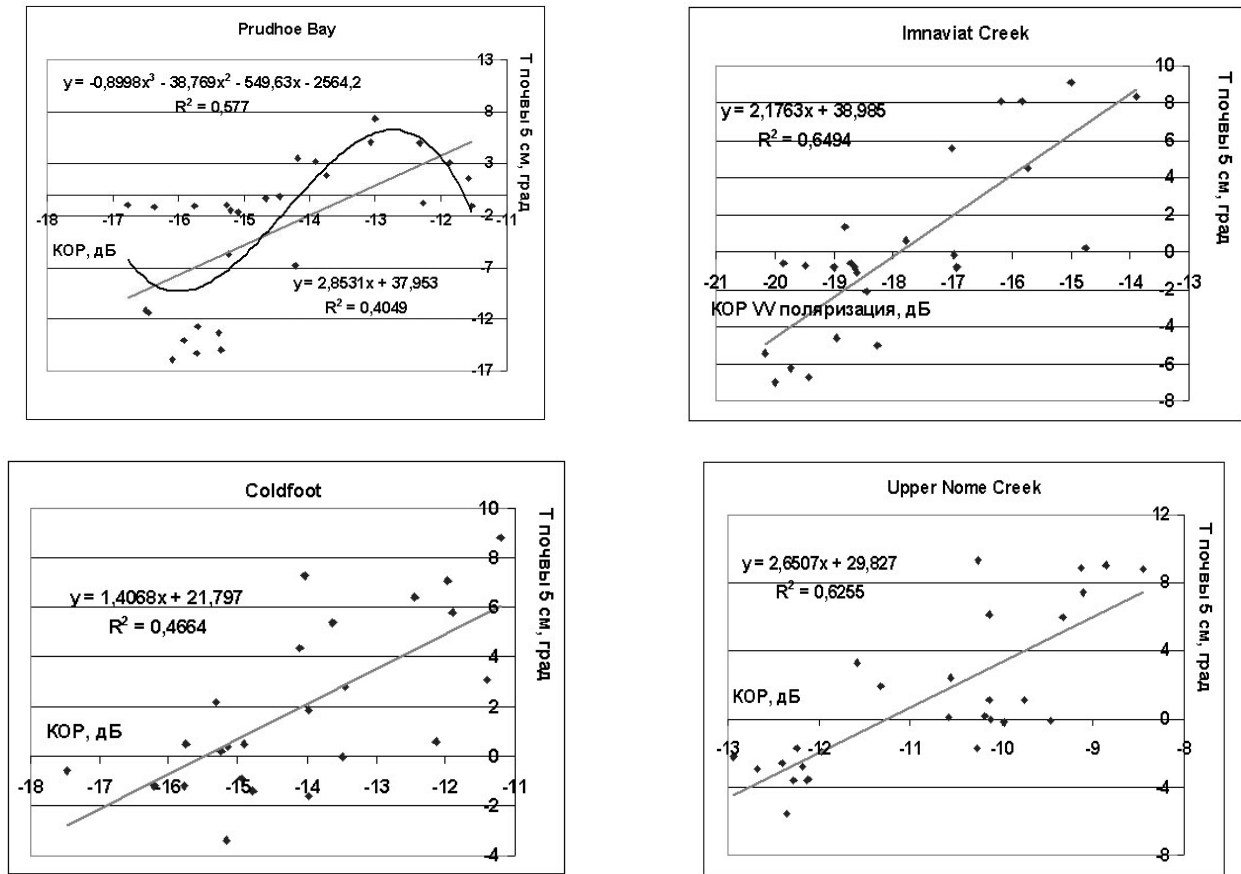


Рис. 8. Регрессионные соотношения между КОР (в дБ) VV поляризации и температурой почвы (град) на глубине 5 см.

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

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.

Сравним значения σ_{thr}^0 , полученные из регрессии (табл. 5), с σ_{thr}^0 , полученными без использования наземной информации (табл. 3). Разница в значениях меньше 1 дБ при высокой корреляции (Prudhoe Bay, Imnaviat Creek, Upper Nome Creek) и больше

1 дБ при средней корреляции (Coldfoot).

Следует отметить, что в работе [12] рассматривалась корреляция радарных данных S1 с наземными измерениями температуры почвы для станций в Германии и во Франции, где температуры почвы только положительные. И показано, что корреляция меняется от высокой до слабой, и зависит от гранулометрического состава почвы, шероховатости почвы. Для мерзлых почв такая тенденция сохраняется, а именно, 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, и $R^2 \approx 0.4$ для станций с 34% содержанием песка в почве (Prudhoe Bay, Coldfoot).

Таблица 5.

Значение порога σ_{thr}^0 по регрессии.

Наземная станция	Prudhoe Bay	Imnaviat Creek	Coldfoot	Upper Nome Creek
σ_{thr}^0 [дБ]	-13.3	-17.94	-15.5	-11.25

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассматривается вопрос об идентификации талых и мерзлых почв в верхнем 5 см слое для семи наземных станций Аляски с широтой места от 65° до 70° 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 σ_{thr}^0 , при котором температура в верхнем слое почвы опускается ниже 0°C, 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 σ_{thr}^0 VV поляризации с широтой места.

ЛИТЕРАТУРА

1. Khaldoune J, Van Bochove E, Bernier M, Nolin MC. An approach for mapping frozen soil of agricultural land under snow cover using RADARSAT-1 and RADARSAT-2. *Proc. of IGARSS'2008*. Boston, Mass., 2008, Vol.III:382-385.
2. Khaldoune J, Van Bochove E, Bernier M, Nolin MC. Mapping agricultural frozen soil on the watershed scale using remote sensing data. *Appl. Environment Soil Sci.*, 2011, Article ID 193237: 1-16, doi: 10.1155/2011.193237.
3. Hallikainen MT, Ulaby FT, Dobson MC, El-Rayes MA, Wu LK. Microwave dielectric behavior of wet soil- part 1: empirical models and experimental observations. *IEEE Trans. GRS*, 1985, 23(1):25-34.
4. Way JB, Zimmermann R, Rignot E, McDonald K, Oren R. Winter and spring thaw as observed with imaging radar at BOREAS. *J. Geoph. Res.*, 1997, 102(24):29673-29684.
5. Ulaby FT, Moore RK, Fung AK. *Microwave Remote Sensing: Active and Passive: Vol. 1. Fundamentals and Radiometry*. Artech House, Dedham, Mass, USA, 1982.
6. <https://ismn.geo.tuwien.ac.at/>.
7. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-1>.
8. Mironov VL, Muzalevsky KV. Spaceborne radar monitoring of soil freezing/thawing processes in the arctic tundra. *Russian Physics Journal*, 2013, 55(8). (Russian Original No. 8, August, 2012).
9. Kim Y, Kimball JS, McDonald KC, Glassy J. Developing a global data record of daily landscape freeze/thaw status using satellite passive microwave remote sensing. *IEEE Trans. GRS*, 2011, 49(3):949-960.

10. Rautiainen K, Parkkinen T, Lemmetyinen J, Schwank M, Wiesmann A, Ikonen J, Derksen Ch, Davydov S, Davydova A, Boike J, Langer M, Drusch M, Pulliainen J. SMOS prototype algorithm for detecting autumn soil freezing. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 180:346-360.
11. Миронов ВЛ, Музалевский КВ. Космический радиолокационный мониторинг процессов замерзания и оттаивания почвы арктической тундры. *Изв. ВУЗов. Физика*, 2012, 55(8):40-43.
12. Родионова НВ. Связь радарных данных Sentinel 1 с наземными измерениями температуры почвы. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2017, 14(5):135-148.

Родионова Наталья Васильевна

к.ф.-м.н., с.н.с.

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Фрязино 141190, Моск. обл., Россия

rnv@ire.rssi.ru.

BACKSCATTERING FROM THE NEAR-SURFACE LAYER OF THAWED/FROZEN SOILS OF ALASKA FROM SENTINEL 1 RADAR DATA

Natali V. Rodionova

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Fryazino Branch, <http://fire.relarn.ru>
Fryazino 141190, Moscow Region, Russian Federation

rnv@ire.rssi.ru

Abstract. This paper considers the question of determining frozen/unfrozen status of 5 cm topsoil layer 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 by two ways: using only radar data with finding the backscatter coefficient threshold, when the temperature in the upper soil layer falls below 0°C, and 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 by two ways showed their closeness, which tends to decrease with decreasing correlation between radar and ground data. Linear regression between radar backscatter threshold and the area latitude have been received.

Keywords: C-band radar data, soil temperature, frozen/unfrozen soil, backscattering coefficient, Spearman's correlation coefficient

UDC 528.854, 528.88

Bibliography – 12 references

RENSIT, 2019, 11(1):21-30

Received 13.03.2019, attached 29.03.2019

DOI: 10.17725/rensit.2019.11.021