



# Использование радарных данных Sentinel 1В для идентификации талых/мерзлых почв в районе Салехарда и Тикси в 2017-2018 годах

**Родионова Н.В.**

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

**XVI Всероссийская Открытая конференция  
Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из  
космоса**

**ИКИ РАН 12-16 ноября 2018 г.**





## ВВЕДЕНИЕ



Более 65% территории России занято вечной мерзлотой, чутко реагирующей на изменения климата, и, прежде всего, температуры воздуха.

Изучение вечной мерзлоты по большей части связано с наземными измерениями глубины промерзания и оттаивания почвы. История развития наземных исследований вечной мерзлоты в России, начиная с 17 века до середины 20 века, достаточно полно изложена в работе (Shiklomanov, 2005). В настоящее время сведения о состоянии криолитозоны пополняются из четырех основных источников наземных измерений (Анисимов О.А. и др., 2012): 1) измерение температуры почвы на глубине до 3,2 м, проводимые на многих метеостанциях, 2) геотермические измерения в скважинах разной глубины, 3) измерения мощности сезонно-талого слоя, проводимые с 1990-х годов в рамках международного проекта мониторинга криолитозоны, 4) комплексные измерения на геокриологических стационарах.

Дистанционное зондирование предлагает перспективные методы для мониторинга приповерхностного состояния мерзлых/талых почв в широких географических масштабах (Khalidoune et al., 2008; 2011). Использование радиометров ограничено из-за их низкого пространственного разрешения. В отличие от ИК и микроволновых радиометров РСА (радар с синтезом апертуры) системы осуществляют мониторинг целей с высоким пространственным разрешением в любых световых и погодных условиях и могут давать информацию о динамическом состоянии приповерхностного слоя почвы, в том числе и под снежным покровом (сухой снег). Исследования состояния талых/мерзлых почв с помощью РСА проводятся с начала 90-х годов прошлого века с появлением данных ERS-1 С-диапазона (Wegmüller, 1990; Rignot et al., 1994). Исследования продолжались с миссией ENVISAT ASAR (Park et al., 2011), ALOS PALSAR L-диапазон (Музалевский и др., 2013), RADARSAT-2 С-диапазон (Rousseau et al., 2009), Sentinel 1 С-диапазон (Родионова, 2019) и другими.

Параметры мерзлых почв трудно напрямую измерить методами дистанционного зондирования (ДЗЗ), поскольку данные параметры связаны с подповерхностными явлениями. Потенциал ДЗЗ, использующий оптические и микроволновые методы, ограничен исследованием приповерхностного слоя мерзлоты, её пространственным распространением, исследованием параметров активного слоя почвы (Duguay et al., 2005). Так волны сенсоров ДЗЗ проникают на глубину нескольких мм (видимые и ИК волны) или нескольких см (микроволны). Достаточно подробный обзор работ, использующих ДЗЗ для исследования мерзлых почв (МП), дан в работе (Duguay et al., 2005).





## ВВЕДЕНИЕ



Сигнал радара от поверхности преимущественно зависит от диэлектрической проницаемости (ДП) почвы, которая напрямую связана с содержанием в ней 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 (Hallikainen et al., 1985). 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. Значение диэлектрической проницаемости мерзлой почвы близко к значению ДП льда (3.2), что схоже с ДП сухой почвы (Boyarsky, 2003). Обратный процесс происходит весной, когда лед в почве тает, что приводит к увеличению КОР на несколько децибел (Ulaby et al., 1982).

Свойства почвы (структура, текстура, дренаж) влияют на содержание воды в почве и, сл., на динамику процесса ее замерзания. Минерализованные почвы замерзают быстрее и на большую глубину, нежели органические почвы, из-за их меньшей возможности сохранять воду (Nyberg et al., 2001).

Целью работы является идентификация талых/мерзлых почв в приповерхностном слое и построение локальных карт мерзлых/талых почв на исследуемых территориях в районе Салехарда и Тикси с использованием радарных данных Sentinel 1B.



# РАЙОНЫ ИССЛЕДОВАНИЯ



## САЛЕХАРД



**Рис. 1. Спутниковые изображения района расположения Салехарда**

**Территория г. Салехарда представляет собой плоско-волнистую равнину и находится на правом берегу р. Полуи – крупного правобережного притока р. Оби, впадающей в Карское море.**

**Салехард – единственный в стране город, расположенный на северном полярном круге. Находится на территории Ямало-Ненецкого автономного округа. Координаты метеостанции Салехарда (WMO 23330) 66°31.86' с.ш., 66° 40.08' в.д.**





## РАЙОНЫ ИССЛЕДОВАНИЯ



### САЛЕХАРД

Район расположения г. Салехарда относится к зоне прерывистого распространения многолетнемёрзлых грунтов и характеризуются сложными мерзлотными условиями, которые постоянно меняются.

Глубина сезонного оттаивания/промерзания грунтов изменяется от 0.9 -3 м и зависит от их литологического состава, степени увлажнения и характера растительного покрова. Лесистость территории муниципального образования 8 %. Леса представлены лиственничными редколесьями и рединами. Травянистый покров беден, территория в основном покрыта мхами и лишайниками.

В целом на территории муниципального образования преобладают супеси, суглинки, песчано-гравийные смеси, но нет песка.

Среднегодовая температура воздуха равна  $-6,4^{\circ}\text{C}$ . Абсолютный минимум равен  $-54^{\circ}\text{C}$ . Абсолютный максимум равен  $+31^{\circ}\text{C}$ . Максимальная высота снежного покрова составляет 62 см.

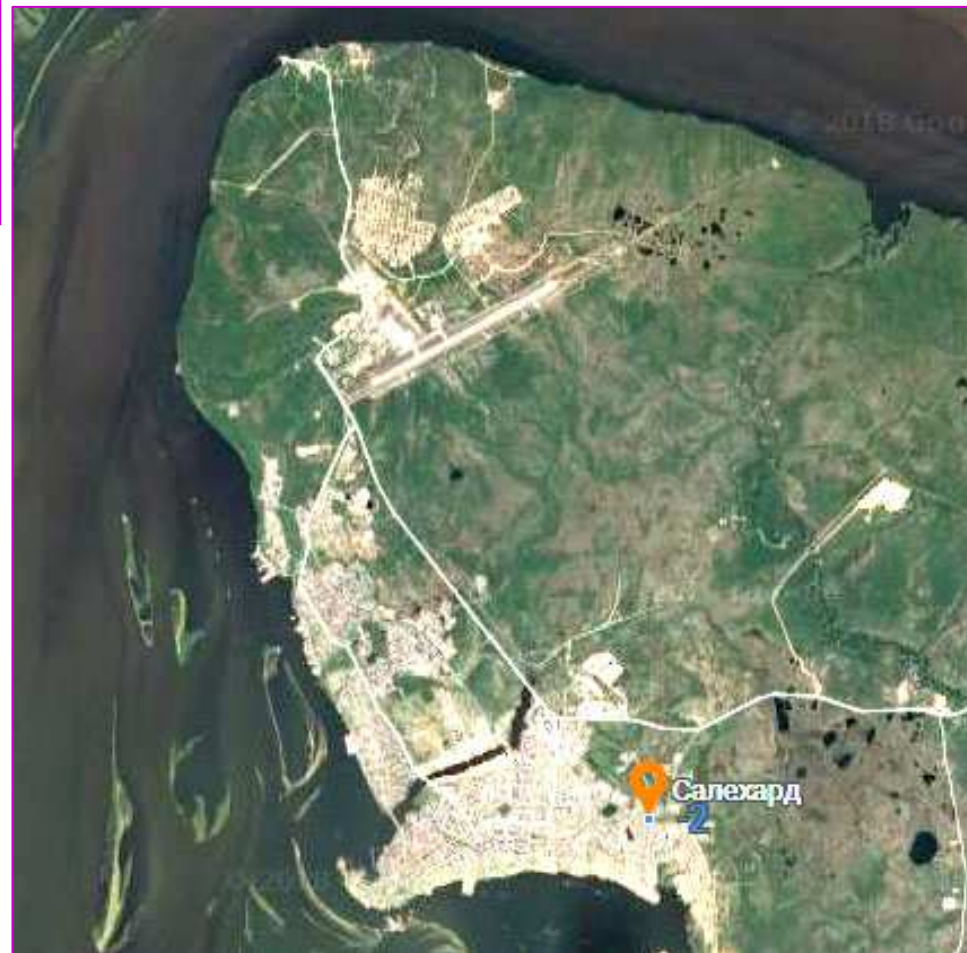


Рис. 2. Спутниковое изображение Салехарда



## РАЙОНЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### ТИКСИ

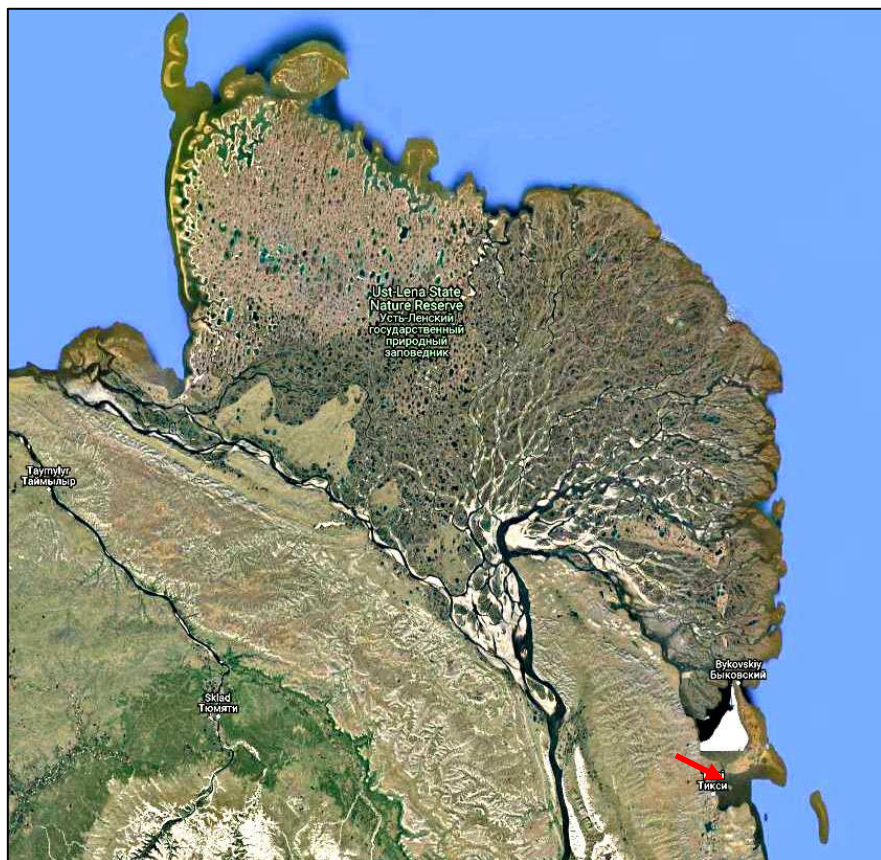


Рис. 3. Спутниковые изображения района расположения поселка Тикси

Тикси- поселок городского типа, центр Булунского района республики Саха-Якутия находится за полярным кругом, к востоку от устья Лены на берегу одноименной бухты в Море Лаптевых. Координаты метеостанции аэропорта Тикси (WMO 21824)  $71^{\circ}41.85'$  с.ш.,  $128^{\circ} 54.18'$  в.д. Поселок возник в 1934 году в связи с освоением Северного морского пути и строительством морского торгового порта.

Бухта Тикси окружена невысокими щебнистыми безлесными холмами, даже кустарника здесь почти нет. Климат суровый, арктический. Морозы немного смягчает море. Абсолютный минимум температуры в Тикси  $-50.5^{\circ}\text{C}$ . Самая большая возможная высота снежного покрова составляет 99 см. Апрель в Тикси имеет самую низкую среднемесячную температуру в России, составлявшую в 2006 году  $-27.6^{\circ}\text{C}$ . Район исследований относится к зоне многолетней мерзлоты.





## ИСХОДНЫЕ РАДАРНЫЕ ДАННЫЕ SENTINEL 1B



Рис. 4. Европейский спутник ДЗЗ Sentinel 1

В работе использованы находящиеся в открытом доступе Sentinel 1B (S1) радарные данные С-диапазона IW (interferometric wide swath) моды с поляризацией VV и 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>).

Съемку исследуемых территорий России выполняли аппараты Sentinel 1A и Sentinel 1B, первый из них с апреля 2015 года по сентябрь 2016 года, второй - с конца сентября 2016 года. В данной работе использовалась радарная информация аппарата S1B, который с периодичностью 12 дней вплоть до настоящего времени предоставляет радарные изображения исследуемых территорий.

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

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

<i>Название станции</i>	<i>Число обработанных сеансов съемки S1</i>	<i>Угол обзора</i>	<i>Период съемки</i>	<i>Количество точек в профиле</i>
Салехард	35	34°	26.2.2017 – 9.6.2018	~20
Тикси	39	40,5°	19.2.2017 – 14.6.2018	~20



# КОЭФФИЦИЕНТ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ (КОР) И ЕГО СВЯЗЬ С ТЕМПЕРАТУРОЙ ВОЗДУХА



## Салехард

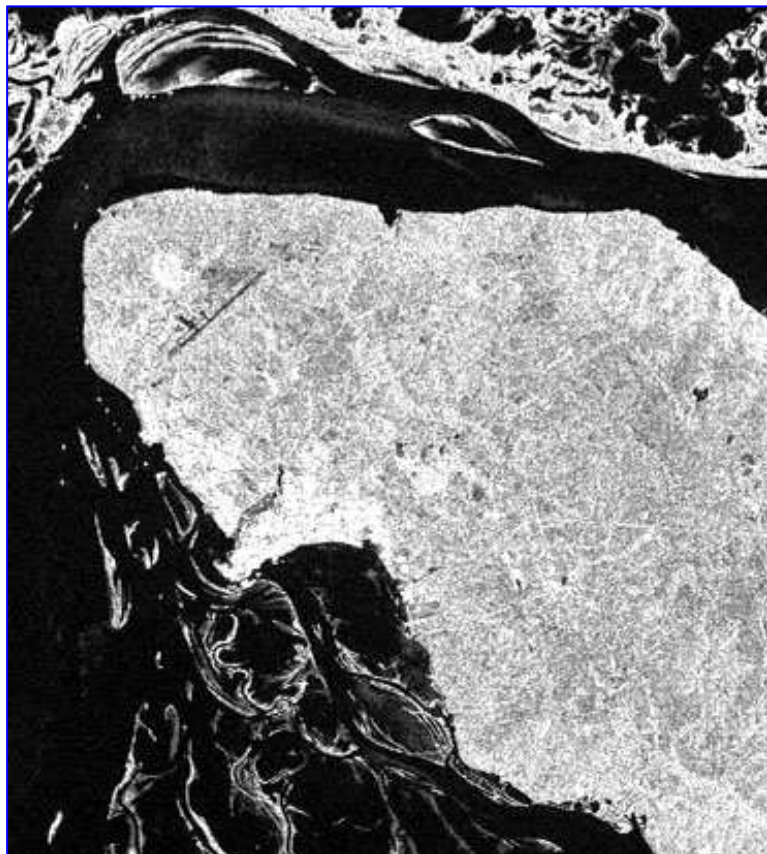


Рис. 5. Радиолокационное изображение (РЛИ) VV поляризации от 14.6.2017

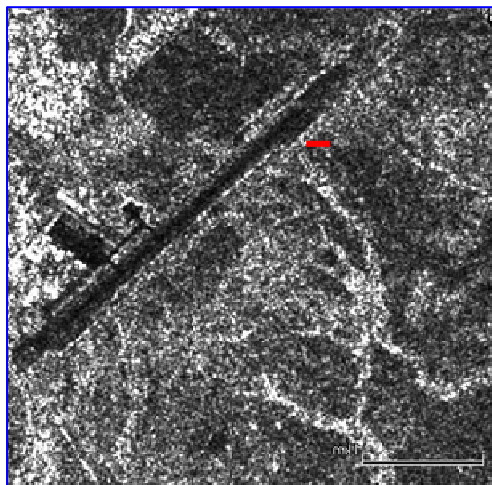


Рис. 6. Профиль (выделен красной линией) для определения КОР вблизи аэропорта Салехарда

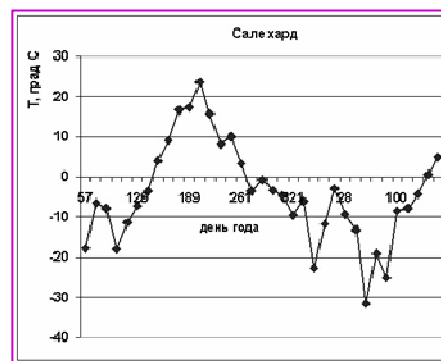


Рис.7. Температура воздуха в град Цельсия по данным gr5.ru; среднее значение КОР по профилю за период 26.2.2017 – 9.6.2018 для Салехарда





# КОЭФФИЦИЕНТ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ (КОР) И ЕГО СВЯЗЬ С ТЕМПЕРАТУРОЙ ВОЗДУХА



## Тикси

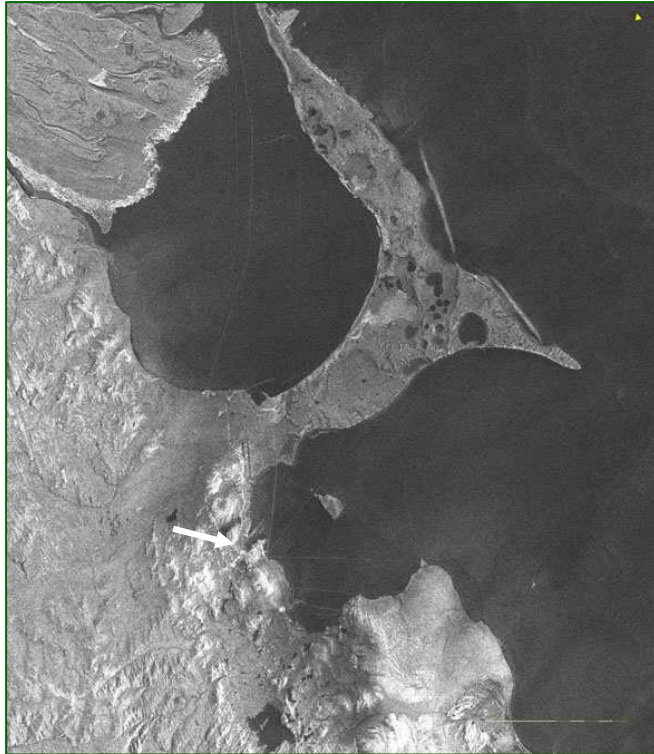
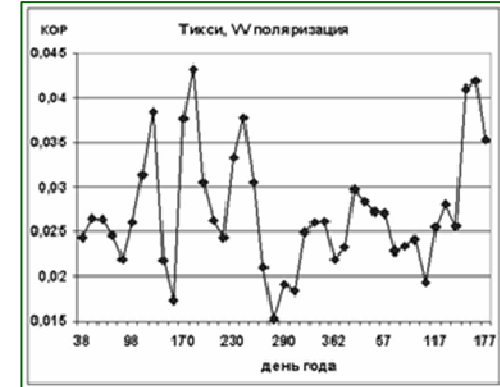
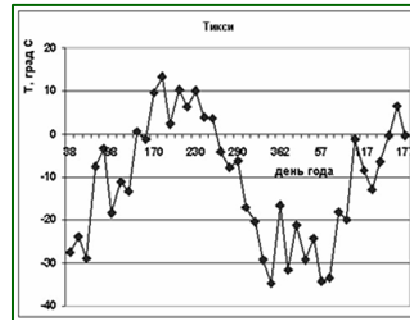
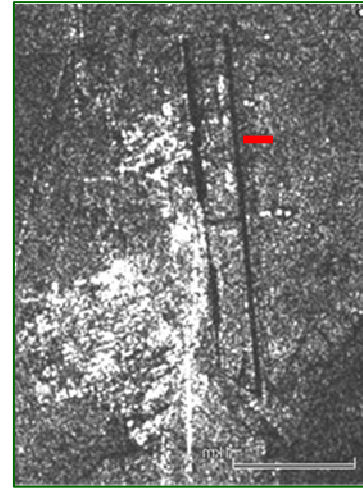
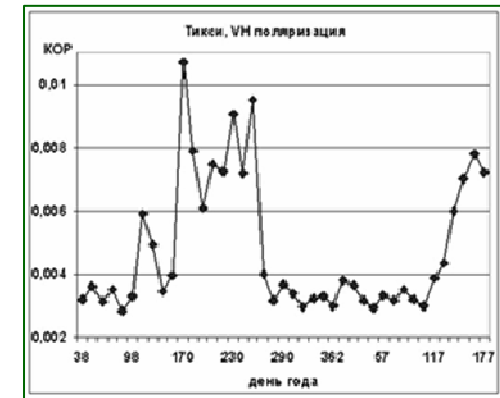


Рис. 8. РЛИ VV поляризации за 7.6.2017; бухта Тикси указана белой стрелкой



(а)

(в)



(б)

Рис. 9. Профиль (красная линия) для вычисления КОР вблизи аэропорта Тикси (а); температура воздуха в град Цельсия по данным gr5.ru (б); среднее значение КОР по профилю за период 19.2.2017-14.6.2018 (в)

Коэффициент корреляции Спирмена $\rho_s$	VV	VH
Салехард	$\rho_s = 0,58, p=10^{-4}$	$\rho_s = 0,7, p=10^{-6}$
Тикси	$\rho_s = 0,21, p=0,1$	$\rho_s = 0,69, p=10^{-6}$



## МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТОЯНИЯ МЕРЗЛОЙ/ТАЛОЙ ПОЧВЫ ПО РАДАРНЫМ ДАННЫМ



### **А. Определение состояния мерзлой/талой почвы по многовременным радарным данным**

Глубина проникновения э/м волны в почву определяется по формуле  $\delta p = \frac{\lambda \cdot \sqrt{\epsilon'}}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\epsilon''}}$ , где  $\lambda$  - длина э/м волны,  $\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$  - диэлектрическая проницаемость почвы (ДП). Для Sentinel 1 длина волны равна 5.4 см. В случае мерзлой почвы с  $\epsilon' \approx 5.5$  и  $0.1 \leq \epsilon'' \leq 0.5$  получаем глубину проникновения э/м волны в почву  $2.85 \leq \delta p \leq 6.38$  см.

Идентификация талого/мерзлого состояния почвы предполагает знание изменений во влажности и ДП почвы, на которые в первую очередь реагирует сигнал радара. Наиболее известной является полу-эмпирическая диэлектрическая смешанная модель Dobson et al. (Dobson et al., 1985), обобщенная на отрицательные температуры Zhang et al. (Zhang et al., 2003). В работе (Jagdhuber et al., 2014, (рис. 3)) показано на основе данной модели, что при падении температуры почвы ниже  $0^{\circ}\text{C}$  наблюдается резкое уменьшение значений ДП почвы для всех типов почв и всех частот от С- до Ku – диапазона, что и отслеживается по значениям КОР. Как показали работы (Khaldoune et al., 2008; 2011), **перепад КОР при переходе к состоянию замерзания или оттаивания почвы составляет 3-5 дБ, на чем и основывается метод идентификация талых/мерзлых почв по радарным данным.**

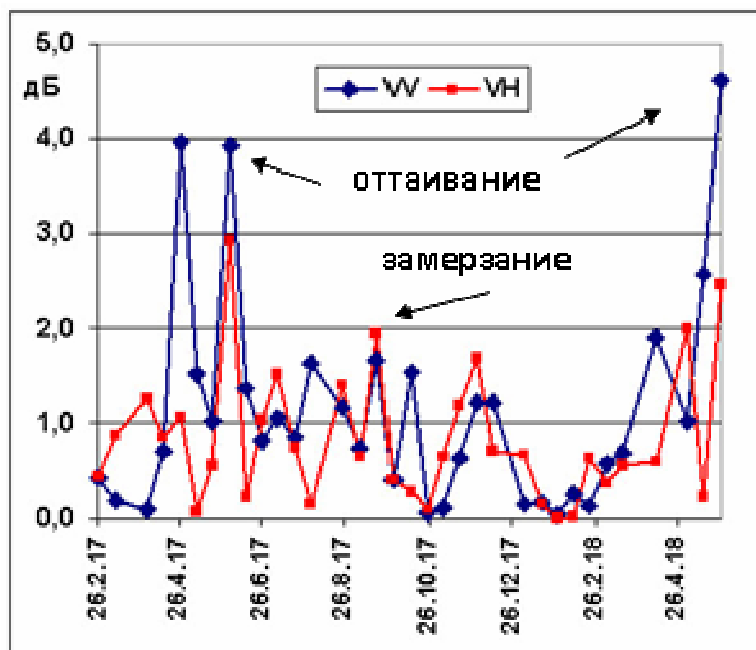




## А. Определение состояния МП по многовременным радарным данным

Используя временной ряд  $S_1$ , определим даты начала замерзания/оттаивания МП по значительным перепадам КОР и далее стабильно низким/высоким значениям  $\sigma^0$ .

### Салехард



### Тикси

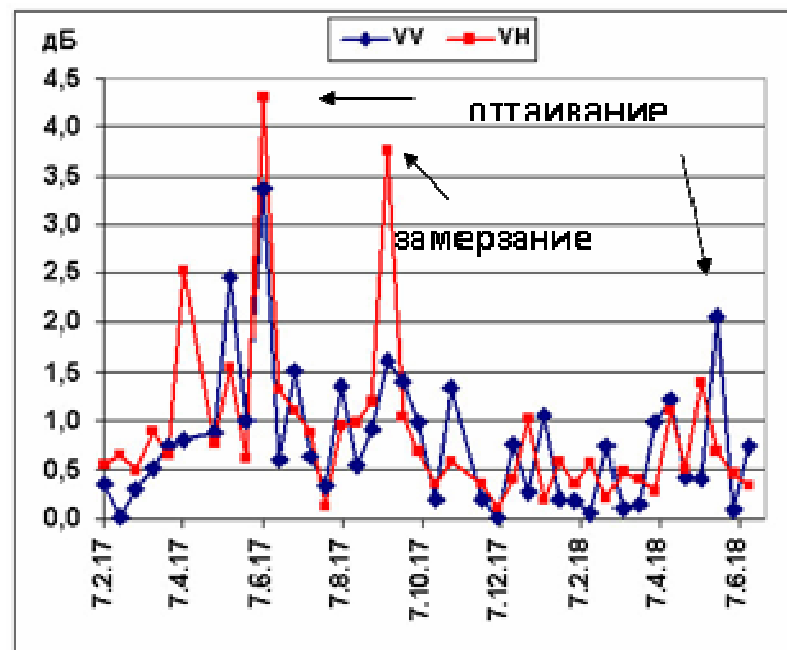


Рис.10. Разность значений  $|\sigma^0|$  в дБ для соседних дат радарной съемки в районе аэропортов Салехарда и Тикси



## А. Определение состояния МП по многовременным радарным данным

Поляризация	Перепады КОР при оттаивании почвы дБ (2017; 2018)		Перепады КОР при замерзании почвы дБ (2017 г.)	
	VV	VH	VV	VH
Салехард	3,9; 4,6	2,9; 2,4	1,6	1,9
Тикси	3,4; 2,0	3,3; 0,7	1,6	3,7

### Оценка изменений ДП почвы, соответствующих полученным перепадам КОР

Уравнение Dubois et al. для VV поляризации такое (Dubois et al., 1995):

$$\sigma_{VV}^0 = 10^{-2.37} \cdot \frac{\cos^3 \theta}{\sin^3 \theta} \times 10^{0.046 \cdot \varepsilon' \cdot \tan \theta} \cdot (ks \cdot \sin \theta)^{1.1} \cdot \lambda^{0.7} \quad (1)$$

где  $ks$  – нормализованная шероховатость поверхности,  $\varepsilon'$  – реальная часть диэлектрической проницаемости поверхности,  $\theta$  – угол обзора,  $\lambda$  – длина волны.

Если пренебречь изменениями  $ks$  за 12 дней между соседними датами съемки, то из формулы Dubois et al. получим для перепада значений  $\varepsilon'$  при оттаивании и замерзании почвы:

$$|\varepsilon'_1 - \varepsilon'_2| = \lg_{10} \frac{\sigma_1^{VV}}{\sigma_2^{VV}} / (0,046 * \tan \theta) \quad (2)$$

	Оттаивание $ \varepsilon'_1 - \varepsilon'_2 $	Замерзание $ \varepsilon'_1 - \varepsilon'_2 $
Салехард	<b>12,6</b> (2017); <b>14,9</b> (2018)	<b>5,3</b> (2017)
Тикси	<b>8,6</b> (2017); <b>5,2</b> (2018)	<b>4,1</b> (2017)

где  $\sigma_1^{VV}$ ,  $\sigma_2^{VV}$ ,  $\varepsilon'_1$ ,  $\varepsilon'_2$  – КОР VV поляризации для соседних сеансов съемки и соответствующие им значения действительной части ДП верхнего слоя почвы





## Б. Определение состояния МП по фактору состояния поверхности и пороговому значению $\sigma^0$

Еще один способ определения состояния МП только по радарным данным, не используя наземные измерения, дан в работе (Mironov, Muzalevsky, 2013). Авторы предложили уравнение, характеризующее состояние поверхности почвы, аналогом для которого послужило уравнение в работе (Kim et al., 2011) для фактора, связанного с радиояркостной температурой почвы.

Авторы (Mironov, Muzalevsky, 2013) характеризуют состояние поверхности почвы через фактор состояния поверхности (СПФ):

$$\text{СПФ} = \frac{1}{2} + \frac{\sigma^0(t) - \sigma_{\text{лето}}^0}{\sigma_{\text{лето}}^0 - \sigma_{\text{зима}}^0} \quad (3)$$

где  $\sigma_{\text{лето}}^0$  и  $\sigma_{\text{зима}}^0$  средние значения КОР летом и зимой в дБ,  $\sigma^0(t)$  текущее значение КОР,  $t$  – время.

Авторы (Mironov, Muzalevsky, 2013) утверждают, что сезонные вариации СПФ сильно коррелируют с сезонными вариациями температуры почвы, принимая отрицательные значения при температуре почвы ниже 0° С. Сл., 5-см верхний слой почвы можно классифицировать как замерзший, если значение СПФ, измеренное радаром, становится отрицательным.

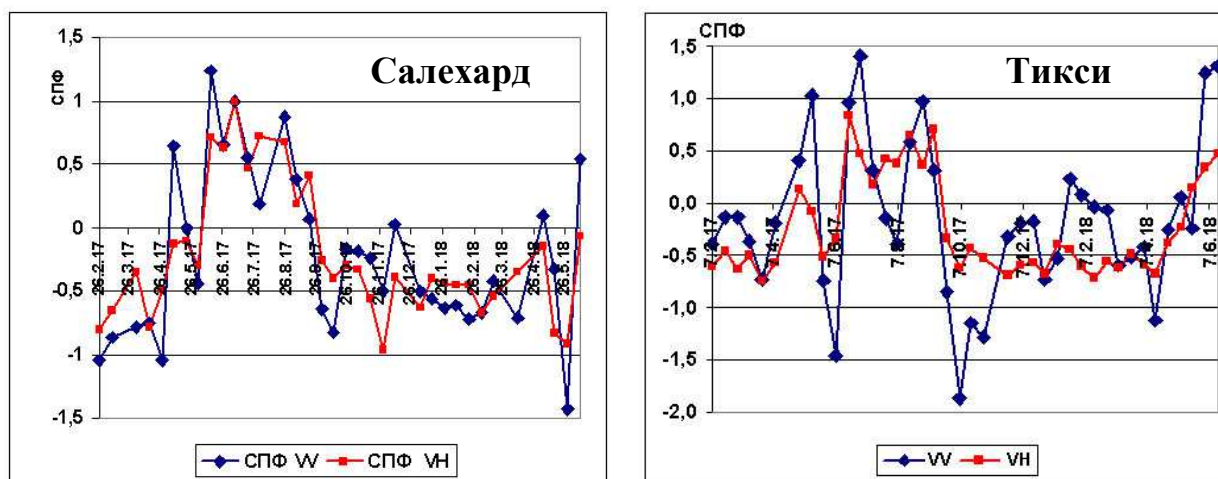


Рис.11 . Изменение СПФ для Салехарда и Тикси

По формуле (3) получается, что пересечение значения СПФ=0 происходит для одного и того же значения  $\sigma^0(t)$  но для разного времени  $t$ , т.е. значение одно и то же как для точки замерзания, так и для точки оттаивания верхнего слоя почвы. Назовем это значение через  $\sigma_{\text{порог}}^0$ .

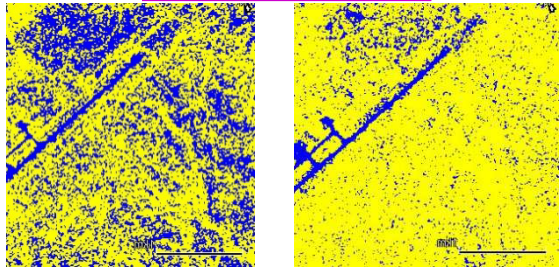
	$\sigma_{\text{порог}}^{\text{VW}}$	$\sigma_{\text{порог}}^{\text{VH}}$
Салехард	-14,8 дБ	-20,6 дБ
Тикси	-15,6 дБ	-22,8 дБ



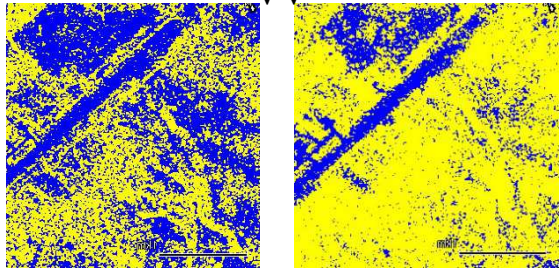
# Б. Локальные карты талых/мерзлых почв на основе пороговых значений $\sigma^0$



Салехард



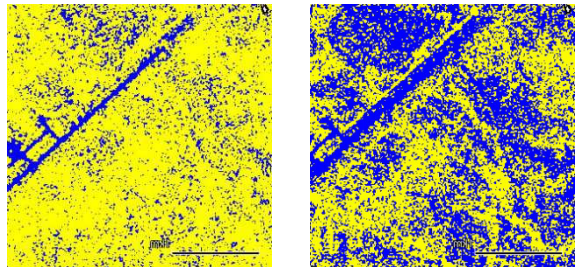
VV



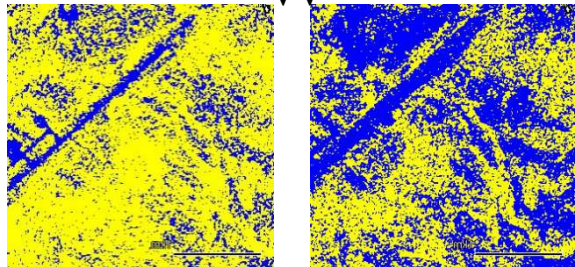
9/5/2017

VH

14/6/2017



VV

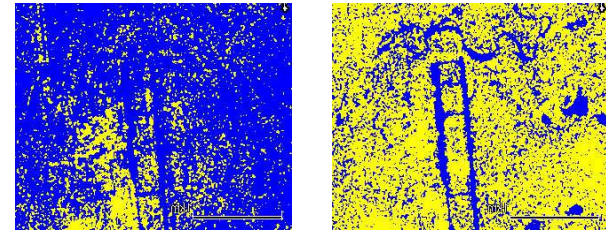


18/9/2017

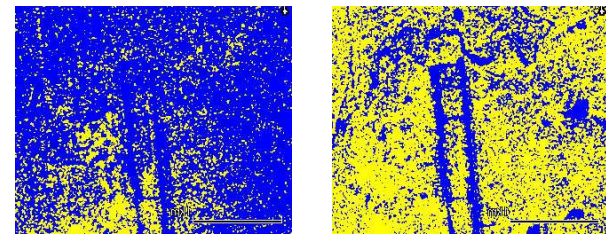
VH

12/10/2017

Тикси



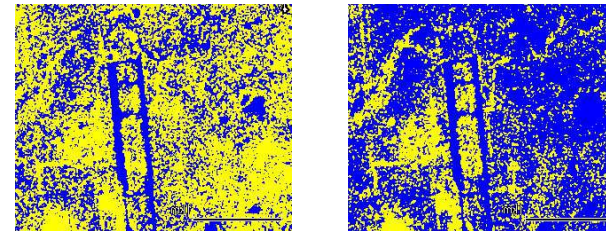
VV



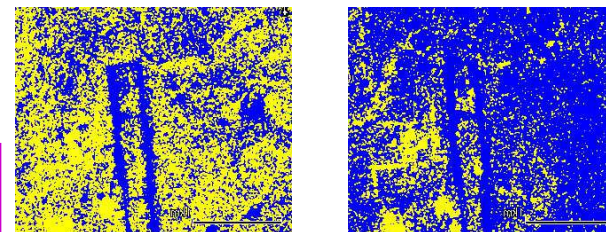
7/6/2017

VH

19/6/2017



VV



11/9/2017

VH

23/9/2017

Оттаивание

$$\sigma^0 < \sigma^0_{\text{порог}} \quad \text{blue square}$$

$$\sigma^0 \geq \sigma^0_{\text{порог}} \quad \text{yellow square}$$

Замерзание

Рис. 12. Локальные карты талых/мерзлых почв

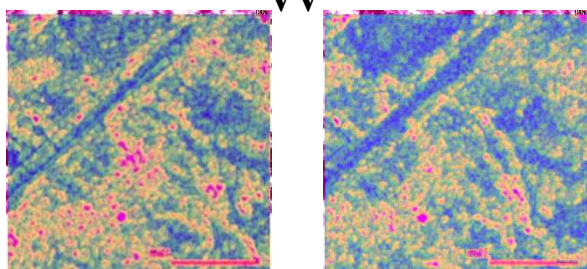
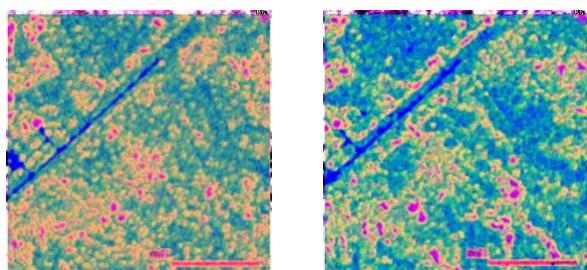
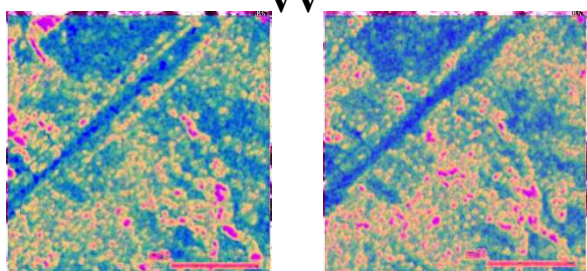
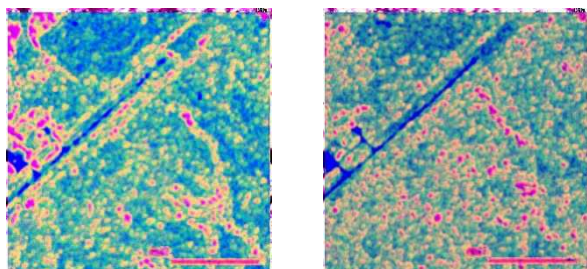




## В. Определение состояния МП по текстурным признакам






### Салехард



9/5/2017 VV 14/6/2017

18/9/2017 VV 12/10/2017

Оттаивание

контраст   
энтропия   
обратный момент 

Замерзание

Рис. 13. Текстурные изображения

В работе (Родионова, 2007) показана возможность выделения на радарных изображениях разных типов поверхности на основе использования текстурных признаков Харалика (Haralick, 1979) 'контраста', 'энтропии' и 'обратного момента'. Контраст является взвешенным квадратом уровней яркости и служит естественной мерой распространения уровней яркости. Обратный момент является мерой локального сходства.

Энтропия – мера беспорядка на изображении. Области с высоким значением контраста и энтропии выделяют городские застройки, области с высоким значением обратного момента – гладкие поверхности. Построив текстурное изображение, можно в качестве индикатора замерзшей/оттаявшей почвы использовать значение текстурного признака 'обратный момент', значение которого больше для замерзшей почвы. На рис. показаны текстурные изображения после фильтрации спеклов Салехарда для дат съемки, как на рис. 9, в следующей RGB кодировке: красный цвет – 'контраст', зеленый – 'энтропия', синий – 'обратный момент'.



## ИНДЕКС ПРОМЕРЗАНИЯ/ОТТАИВАНИЯ ПОЧВЫ



Температура воздуха коррелирует с температурой почвы и глубиной промерзания почвы (Brown, 1964). На реальную глубину промерзания почвы влияют ее механический состав, термические свойства, влажность почвы, климатические условия (температура воздуха, скорость ветра, осадки, солнечная радиация).

Глубину промерзания можно оценить, используя численные или аналитические методы, однако требуемые в моделях входные данные не всегда доступны или затратны для получения. Из существующих моделей предсказания глубины промерзания почвы наиболее известны **модель Стефана, используемая и в настоящее время, модель Berggren и модель Chisholm и Phang.**

В работе (Rajaei, Baladi, 2015) рассмотрена точность предсказания глубины промерзания почвы для этих трех аналитических и полуэмпирических моделей. Поскольку ни одна из моделей не дает аккуратных результатов, авторами (Rajaei, Baladi, 2015) предложена модифицированная эмпирическая модель для разных типов почв, которая на входе требует только знания максимальных и минимальных температур воздуха за сутки.

**Авторы (Rajaei, Baladi, 2015) получили эмпирическую модель связи глубины промерзания почвы с суммарным индексом промерзания почвы для двух типов почв: глинистой и песчаной, на основе измеренных значений глубин промерзания в 2010-2011 годах в штате Мичиган и вычисленных значениях суммарного индекса промерзания CFI (the cumulative freezing index):**

для **глинистых почв** с коэффициентом детерминации 0.94 (число измерений 29),

$$h = 4.0388 \cdot (CFI)^{0.4896} \quad (4)$$

для **песчаных почв** с коэффициентом детерминации 0.91 (число измерений 129),

$$h = 3.3787 \cdot (CFI)^{0.5423} \quad (5)$$





## ИНДЕКС ПРОМЕРЗАНИЯ/ОТТАИВАНИЯ ПОЧВЫ



где  $h$  – глубина промерзания почвы в см,

$$CFI = \sum_{i=1}^n (T_{\min}^{\text{воздух}} + T_{\max}^{\text{воздух}}) / 2 \quad (6)$$

- суммарный индекс промерзания (the cumulative freezing index),  
минимальная и максимальная температура воздуха за сутки.

$T_{\min}^{\text{воздух}}$

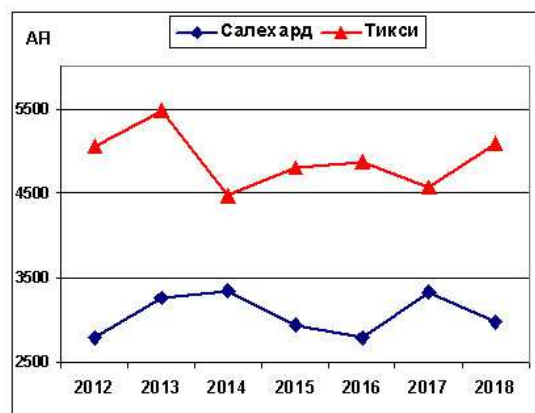
и

$T_{\max}^{\text{воздух}}$

-

Максимальная глубина промерзания/оттаивания почвы для каждого года определяется по разнице максимального и минимального значений CFI. Максимум CFI соответствует переходу от положительных к отрицательным температурам, минимум CFI соответствует переходу от отрицательных температур к положительным. В первом случае разность между экстремумами соответствует оценке максимальной глубины оттаивания почвы, во втором – максимальной глубины промерзания почвы. Данная величина получила название AFI (air freezing index). На рис. 6 приведены значения AFI, характеризующие максимальную глубину промерзания/оттаивания почвы, для Салехарда и Тикси за 2012-2018 годы. Тренда при линейной аппроксимации не обнаружено, поскольку коэффициент детерминации  $R^2$  имеет очень малые значения - от 0,001 до 0,2.

### промерзание



### оттаивание

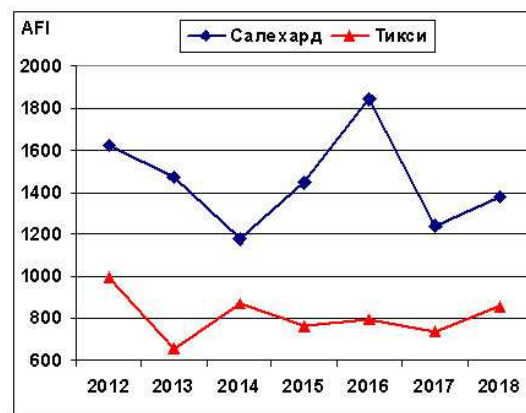


Рис.14. Значение AFI по годам, характеризующее максимальную глубину промерзания и оттаивания почвы

# Заключение

Многовременные радарные данные позволяют определить начало процесса замерзания/оттаивания приповерхностного слоя почвы по максимальным перепадам значений сигма 0, которые для периода 2017/2018 годов для Салехарда и Тикси составляют до 4,6 дБ при оттаивании и до 3,7 дБ при замерзании верхнего слоя почвы, что соответствует изменению ДП почвы до 15 единиц при оттаивании и до 5 единиц при замерзании почвы на основании модели (Dubois et al., 1995). Получено, что для Тикси скачок ДП почвы меньше, чем для Салехарда.

Найденные по радарным данным пороговые значения сигма 0, при которых температура в верхнем слое почвы опускается ниже 0°C, позволили построить локальные карты мерзлой и талой почвы в районе тестовых участков Салехарда и Тикси;

Построенные графики АFI, характеризующие максимальную глубину промерзания/оттаивания почвы за период 2012-2018 годов по архивным данным температуры воздуха, для исследуемых территорий не выявили значимого тренда.

**СПАСИБО!**



## ЛИТЕРАТУРА



1. Анисимов О.А., Анохин Ю.А., Лавров С.А., Малкова Г.В., Мяч Л.Т., Павлов А.В., Романовский В.А., Стрелецкий Д.А., Холодов А.Л., Шикломанов Н.И. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. Глава 8. Континентальная многолетняя мерзлота. М.: Росгидромет. 2012. С. 301–359.
2. 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. №1. С. 1-3.
3. Родионова Н.В. Классификация поверхности на поляриметрических РЛИ с использованием текстуры и разложения по механизмам рассеяния// ИЗК. 2007. №34. С. 8-14.
4. Родионова Н.В. Анализ радарных данных Sentinel 1 для идентификации талых и мерзлых почв в районе Анадыря (Чукотка) и Белой Горы (Якутия)// ИЗК. 2019. (в печати).
5. Brown W.G. Difficulties associated with predicting depth of freeze and thaw// Canadian geotechnical J. 1964. 1(4). P. 215-226.
6. Dobson M.C., Ulaby F.T., Hallikainen M.T., El-Rayes M.A. Microwave dielectric behavior of wet soil Part II: Dielectric mixing models// IEEE Trans. GRS. 1985. GE-23. P. 35-46.
7. Dubois P.C., van Zyl J.J., Engman T. Measuring soil moisture with imaging radars// IEEE Trans. GRS. 1995. V. 33. № 4. P. 916-926.
8. Duguay C.R., Zhang T., Leverington D.W., Romanovsky V.E. Satellite remote sensing of permafrost and seasonally frozen ground// Remote sensing of Northern hydrology, geophysical monograph series 163. 2005. P. 91-117.
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. GRS. 1985. 23(1). P. 25-34.
10. Haralick R.M. Statistical and structural approaches to texture// Proc. IEEE. 1979. 67(5). P. 786-804.
11. Jagdhuber Th., Stockamp J., Hajnsek I. and Ludwig R. Identification of Soil Freezing and Thawing States Using SAR Polarimetry at C-Band// Remote Sens. 2014. 6. P. 2008-2023; doi:10.3390/rs6032008



12. 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. Boston. Mass. 2008. Vol.III-382-385.
13. 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. 2011. Article ID 193237. P. 1-16. doi: 10.1155/2011/193237.
14. Kim Y., Kimball J.S., McDonald K.S., Glassy J. // IEEE Trans. GRS,. V. 49. No. 3. P. 949-960. 2011.
15. Mironov V.L., Muzalevsky K.V. Spaceborne radar monitoring of soil freezing/thawing processes in the arctic tundra// Russian Physics Journal. 2013. 55(8). P. 899- 902. (Russian Original No. 8. August, 2012).
16. Nyberg L., St'ahli M., Mellander P.-E., and Bishop K. H. Soil frost effects on soil water and runoff dynamics along a boreal forest transect: 1. Field investigations// Hydrol. Process. 2002. V.15. P. 909–926. DOI: 10.1002/hyp.256.
17. Park S.-E., Bart A., Sabel D., Wagner W., Naeimi V., Yamaguchi Y. Monitoring freeze/thaw cycles using ENVISAT ASAR global mode// Remote Sens. Environ. 2011. 115. P. 3457-3467.
18. Rajaei P., Baladi G. Y. Frost depth – a general prediction model// 94st Transportation Research Board Annual Meeting, Washington D.C. January 2015. P. 1-15.
19. Rignot E., Way J.B., McDonald K., Viereck L., Williams C., Adams P., Payne C., Wood W., Shi J. Monitoring of environmental conditions in taiga forests using ERS-1 SAR// Remote Sens. Environ. 1994. 49. P. 145-154.
20. Rousseau L.P., Magagi R., Leconte R., Berg A., Toth B. Potentials of RADARSAT-2 data to monitor freezing/thawing cycles over agricultural lands in Canada// Proc. IGARSS'2009. Cape Town, South Africa. 12-17 July 2009. P. 598-601.
21. Shiklomanov N.I. From Exploration to Systematic Investigation: Development of Geocryology in 19th- and Early– 20th-Century Russia// Physical Geography. 2005. No.4. P. 249-263.
22. Ulaby F.T., Moore R.K., Fung A.K. Microwave Remote Sensing: Active and Passive: Vol. 1// Fundamentals and Radiometry. 1982. Artech House, Dedham, Mass, USA.
23. Wegmüller U. The effect of freezing and thawing on the microwave signatures of bare soil// Remote Sens. Environ. 1990. 33. P. 123-135.
24. [www.iki.rssi.ru/books/2003boyarsky.pdf](http://www.iki.rssi.ru/books/2003boyarsky.pdf)
25. Zhang L., Shi J., Zhang Z., Zhao K. The estimation of dielectric constant of frozen soil-water mixture at microwave bands// Proc. IGARSS'2003. Toulouse, France. 21-25 July 2003. P. 608-611.