

Идентификация талых/мерзлых почв в ряде регионов Сибири по радарным данным Sentinel 1 в 2017-2018 годах

Н.В. Родионова¹

¹Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, пл. ак. Введенского 1, Фрязино, Россия, 141190

Аннотация. В работе рассматривается вопрос об идентификации талых/мерзлых почв в приповерхностном слое в районе Салехарда, Тикси и Норильска по радарным данным Sentinel 1В С-диапазона с поляризациями VV и VH за период 2017-2018 годов. Определение состояния мерзлой/талой почвы осуществляется тремя способами: 1) по многовременным радарным данным на основе значительного на 3-5 дБ перепада значений коэффициента обратного рассеяния (КОР) σ^0 при переходе к состоянию замерзания/оттаивания почвы, 2) по нахождению порогового значения $\sigma^0_{порог}$, при котором температура в верхнем слое почвы опускается ниже 0°C, 3) по текстурным признакам. Первый способ позволяет определить промежуток времени, в течение которого происходит процесс замерзания/оттаивания почвы, точность определения которого растет с увеличением повторяемости съемки исследуемой территории. Вторым и третьим способами позволяют построить локальные карты мерзлой/талой почвы. Показано, что для исследуемых территорий коэффициент корреляции Спирмена между КОР и температурой воздуха для кросс- поляризации превышает коэффициент корреляции для согласованной поляризации. Построены графики индекса промерзания почвы для исследуемых территорий за период 2012-2018 годов по архивным данным температуры воздуха.

1. Введение

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

Изучение вечной мерзлоты по большей части связаны 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 [1]. В настоящее время сведения о состоянии криолитозоны пополняются из четырех основных источников наземных измерений [2]: 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 геоэкологических стационарах.

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 [3]. 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 [3].

Следует отметить, что в настоящее время использование ДЗЗ средств для исследования МП менее затратно нежели обеспечение работы наземных служб из-за их дорогой логистики, короткого полевого сезона, временных ограничений, хотя не может ни в коем случае заменить наземные службы, а только дает дополнительную информацию [3].

Дистанционное зондирование предлагает перспективные методы для мониторинга приповерхностного состояния мерзлых/талых почв в широких географических масштабах [5], [6]. 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 [6], [7]. Исследования продолжались с миссией ENVISAT ASAR [8], ALOS PALSAR L-диапазон [9], RADARSAT-2 С-диапазон [10] и другими.

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 [11]. 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 [12]. Обратный процесс происходит весной, когда лед в почве тает, что приводит к увеличению КОР на несколько децибел [13].

Свойства почвы (структура, текстура, дренаж) влияют на содержание воды в почве и, следовательно, на динамику процесса ее замерзания. Минерализованные почвы замерзают быстрее и на большую глубину, нежели органические почвы, из-за их меньшей возможности сохранять воду [14].

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

2. Районы исследования и исходные радарные данные

2.1. Салехард

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. Территория г. Салехарда представляет собой плоско-волнистую равнину и находится на правом берегу р. Полуй – крупного правобережного притока р. Оби, имеющих общую долину. Район расположения г. Салехарда относится к зоне прерывистого распространения многолетнемерзлых 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 редианами. 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°C . Абсолютный максимум равен $+31^{\circ}\text{C}$. Максимальная высота снежного покрова составляет 62 см.

На рисунке 1 (а) дано спутниковое изображение Салехарда, где отмечено положение точки расчета прогноза погоды, по данным сайта gr5.ru, и на рисунке 1 (б) показан график изменений температуры воздуха за период 26.2.2017 – 9.6.2018 по данным gr5.ru. Значения температуры взяты на момент съемки территории радаром S1.

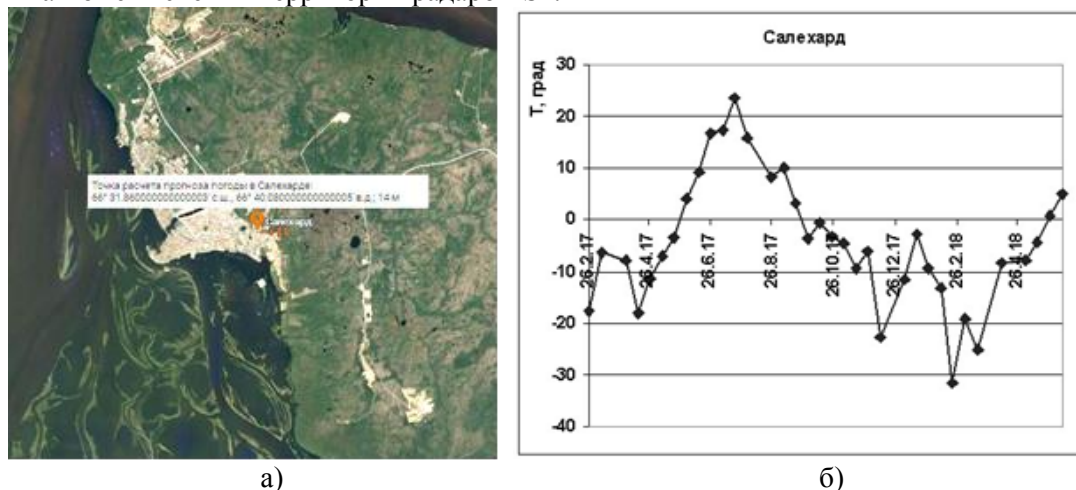


Рисунок 1. (а) - спутниковое изображение Салехарда, (б) – температура воздуха в градусах Цельсия для Салехарда за период 26.2.2017 – 9.6.2018 по данным gr5.ru.

2.2. 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, средняя температура января $-37,3^{\circ}\text{C}$, июля и августа— всего $+7,6^{\circ}\text{C}$ и $+7,7^{\circ}\text{C}$, соответственно. 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 $-27,6^{\circ}\text{C}$.

На рисунке 2 показаны спутниковые изображения Тикси. На рисунке 3 (а) дана фотография поселка, и на рисунке 3 (б) представлен график изменений температуры воздуха по данным метеостанции аэропорта Тикси за период 7.2.2017 – 14.6.2018 по данным gr5.ru. Значения температуры взяты на момент съемки территории радаром S1.

2.3. Норильск-Талнах

Норильск находится на севере Красноярского края, на юге Таймырского полуострова (WMO ID=23078). Талнах — район города Норильска, имевший статус города с 1982 по 2004 год, находится в 25 километрах к северо-востоку от центра Норильска, с которым соединён автомобильной и железной дорогами. Талнах расположен на правом берегу реки Норильской; (Норильск -на левом берегу) у отрогов плато Путорана. Талнах считается рудной столицей России. Рудники Талнаха являются основной сырьевой базой компании "Норильский никель", которые ведут добычу сульфидных медно-никелевых руд. Руды различной ценности содержат

никель, медь, палладий, платину, кобальт, золото и другие редкие компоненты. В честь города назван минерал талнахит, который впервые обнаружили в этих местах в 1963 году.

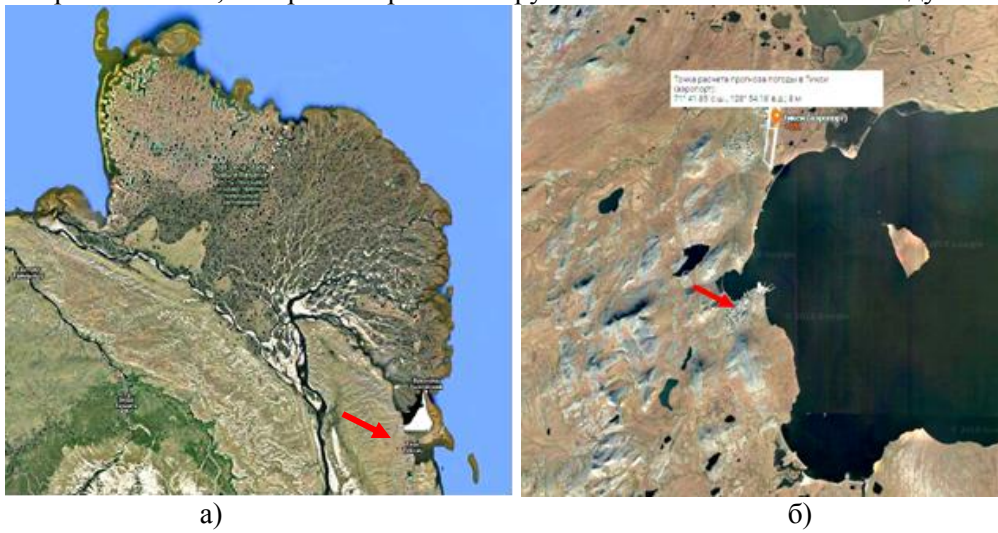


Рисунок 2. (а) - устье реки Лена и Усть Ленский государственный природный заповедник. Внизу справа бухта Тикси с поселком Тикси (указатель - стрелка), (б)- бухта Тикси с поселком Тикси и аэропортом с точкой расчета прогноза погоды в Тикси.

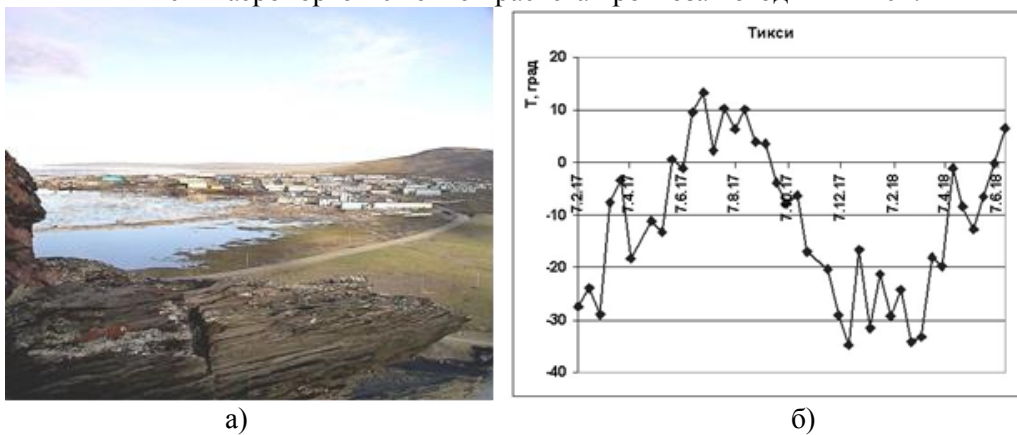


Рисунок 3. (а) - поселок Тикси, (б) - температура воздуха в Тикси за период 7.2.2017 – 14.6.2018 по данным gr5.ru.

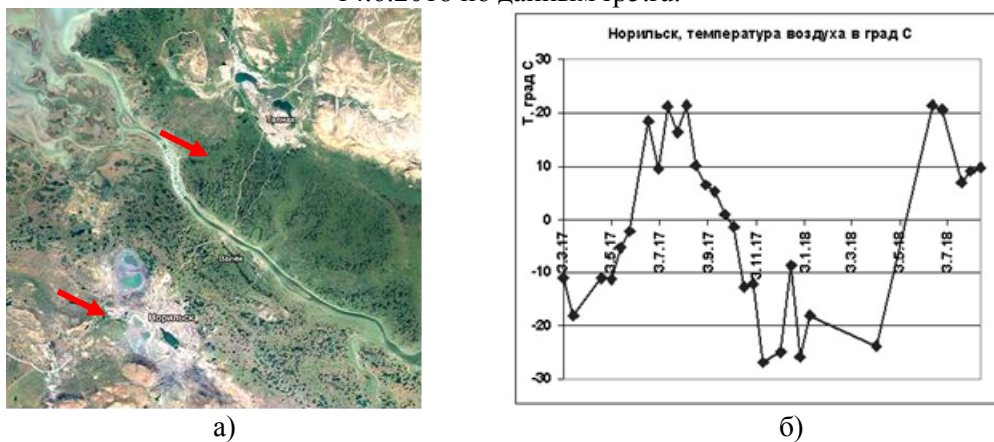


Рисунок 4. (а) - спутниковое изображение Норильска (нижняя стрелка) и Талнаха (верхняя стрелка), (б) – температура воздуха в градусах Цельсия для Норильска за период 3/3/17-13/8/18 по данным gr5.ru.

На расстоянии 2,5 км на юго-восток от Талнаха расположена площадка R32 CALM, координаты которой 69°26'01" с.ш., 88°28'03" в.д.

Климат здесь суровый: отрицательная среднегодовая температура воздуха $-9,8^{\circ}\text{C}$, продолжительная (8 месяцев, с ноября по май) зима с сильными морозами и метелями, короткое дождливое, холодное лето, почти не отличающееся от весны и осени, частые и резкие смены погоды.

На рисунке 4 (а) дано спутниковое изображение Норильска и Талнаха (указаны стрелками), и на рисунке 4 (б) представлен график изменений температуры воздуха по данным метеостанции Норильска за период 3/3/17-13/8/18 по данным gr5.ru.

2.4. Исходные радарные данные Sentinel 1B

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 [15]. 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 1 приведены данные для каждой станции по числу обработанных сеансов съемки, углу обзора, временному периоду съемки и количеству точек при усреднении КОР по профилю.

Таблица 1. Информация об использованных радарных данных Sentinel 1B.

Название станции	Число обработанных сеансов съемки S1	Угол обзора	Период съемки	Количество точек в профиле
Салехард	35	34°	26.2.2017 – 9.6.2018	~20
Тикси	39	$40,5^{\circ}$	19.2.2017 – 14.6.2018	~20
Норильск	29	40°	3.3.2017-13.8.2018	~10

Графики изменений среднего значения коэффициента обратного рассеяния для VV и VH поляризаций вблизи аэропорта Салехарда по горизонтальному профилю с координатами средней точки $66,592^{\circ}$ с.ш. и $66,647^{\circ}$ в.д. за период 26.2.2017 – 9.6.2018 и Тикси по горизонтальному профилю с координатами средней точки $71,7015^{\circ}$ с.ш. и $128,9205^{\circ}$ в.д. за период 19.2.2017 – 14.6.2018 показаны на рисунке 5. Для Норильска графики изменения среднего значения КОР определялись для двух профилей: 1-ый профиль вблизи аэропорта Валёк в Норильске координаты $69,3917^{\circ}$ N, $88,3147^{\circ}$ E; 2-ой профиль в районе Талнаха вблизи площадки CALM R32, координаты $69,4343^{\circ}$ N, $88,4674^{\circ}$ E; за период с 3.3.2017 по 13.8.2018. Графики для Норильска показаны на рисунке 6. Нахождение профилей выделены линиями на рисунке 7 на РЛИ (радиолокационное изображение) VV поляризации дата съемки 28/01/2018 для Салехарда и на РЛИ дата съемки 7/6/2017 для Тикси. И на рисунке 8 для Норильска на РЛИ VV поляризации за 20.7.2018.

Коэффициент корреляции Спирмена между температурой воздуха и КОР для Салехарда равен $\rho_s = 0.58$ ($p=10^{-4}$, $N=35$, где N – количество сеансов съемки) для VV поляризации и несколько больше для VH поляризации $\rho_s = 0.7$ ($p=10^{-6}$). Соответственно, для Тикси $\rho_s = 0.21$ ($p=0.1$, $N=39$) для VV поляризации (слабая корреляция) и $\rho_s = 0.69$ ($p=10^{-6}$) для VH поляризации. Для обоих профилей корреляция на кросс- поляризации превышает коэффициент корреляции на согласованной поляризации. Для Норильска - Талнаха ситуация похожая, а, именно, для

первого профиля $\rho_s=0.57$ ($p=6 \cdot 10^{-4}$, $N=29$) для VV поляризации и для VH поляризации $\rho_s=0.82$ ($p=0$); для второго профиля $\rho_s=0.58$ ($p=4 \cdot 10^{-4}$) для VV поляризации и для VH поляризации $\rho_s=0.74$ ($p=10^{-6}$);

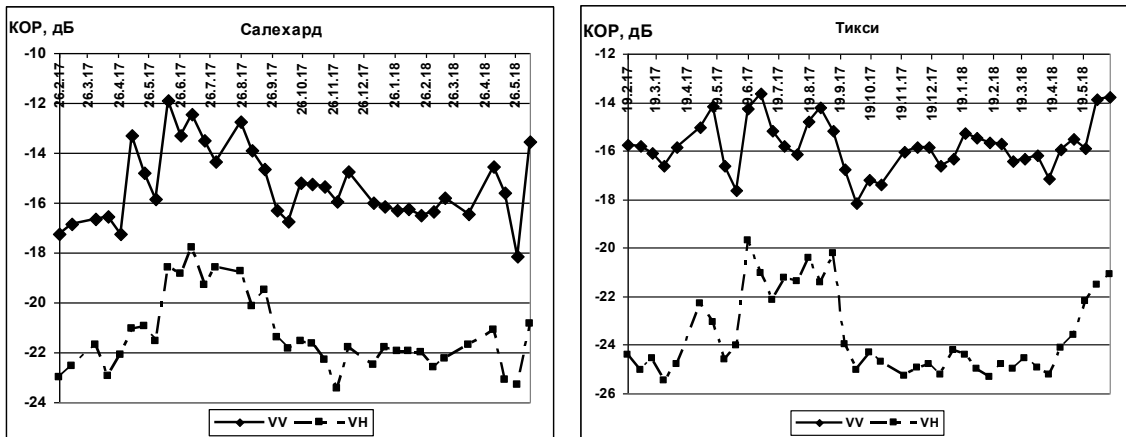


Рисунок 5. Среднее значение коэффициента обратного рассеяния вблизи аэропорта Салехарда по профилю с координатами 66.592° с.ш. и 66.649° в.д. за период 26.2.2017 – 9.6.2018 вблизи аэропорта Тикси по профилю с координатами средней точки 71.7015° с.ш. и 128.9205° в.д. за период 19.2.2017 – 14.6.2018.

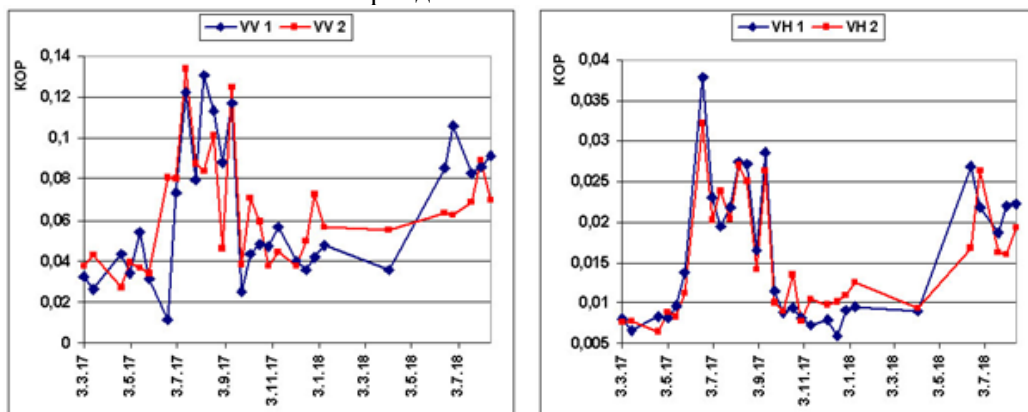


Рисунок 6. KOP для двух профилей за период с 3.3.2017 по 13.8.2018: 1-ый профиль вблизи аэропорта Валёк, координаты 69.3917° N, 88.3147° E; 2-ой профиль в районе Галнаха вблизи площадки CALM R32, координаты 69.4343° N, 88.4674° E.

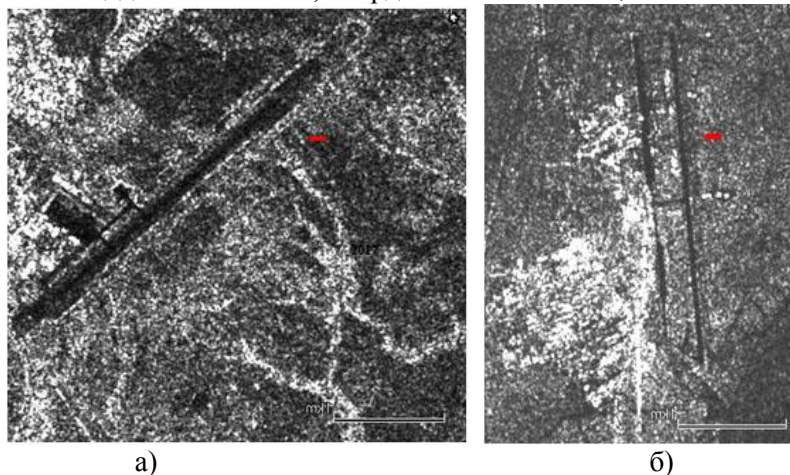


Рисунок 7. Положение профилей на РЛИ (выделены линией) для определения KOP вблизи аэропортов Салехарда (а) и Тикси (б).

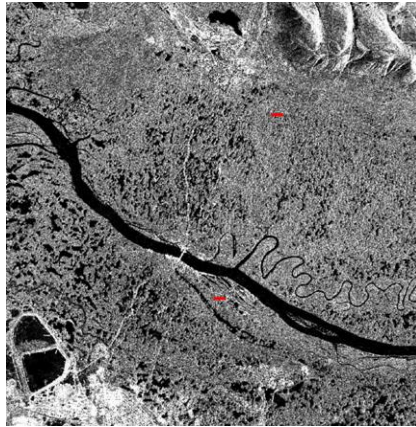


Рисунок 8. Положение профилей (выделены линиями) на РЛИ VV поляризации за 20.7.2018 в районе Норильска-Талнаха для вычисления среднего значения КОР.

3. Методы и результаты определения состояния мерзлой/талой почвы по радарным данным

3.1. Определение состояния МП по многовременным радарным данным

Глубина проникновения э/м волны в почву определяется по формуле $\delta_p = \frac{\lambda \cdot \sqrt{\epsilon'}}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon''}$, где λ -

длина э/м волны, $\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$ - диэлектрическая проницаемость почвы. 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 $4 \leq \delta_p \leq 20$ см.

Идентификация талого/мерзлого состояния почвы предполагает знания изменений во влажности и ДП почвы, на которые в первую очередь реагирует сигнал радара. Для понимания того, какие изменения происходят с ДП почвы, были созданы модели фазовых переходов (замерзание-оттаивание) воды от жидкого к мерзлому состоянию (и обратно). Наиболее известной является полу-эмпирическая диэлектрическая смешанная модель Dobson et al. [16], обобщенная на отрицательные температуры Zhang et al. [17]. В работе [18] показаны полученные по данной модели значения относительной ДП для 3-х типов почв (silty clay – илистая глина silt loam – пылеватые суглинки, sandy loam – супесь) в зависимости от температуры почвы от -30°C до 30°C для частот от C- до Ku – диапазона. Показано, что при падении температуры почвы ниже 0°C наблюдается резкое уменьшение значений ДП почвы для всех типов почв и всех частот, что и отслеживается по значениям КОР. Так, для C- диапазона скачок в значении ДП составляет порядка 20 единиц для silty clay, 15 – для silt loam и порядка 10 - для sandy loam. И как показали работы [5], [6], 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.

Используя временной ряд S1, определим даты начала замерзания/оттаивания МП по значительным перепадам КОР и далее стабильно низким/высоким значениям σ^0 . На рисунке 9 показаны графики разности значений σ^0 по абсолютной величине в дБ для соседних дат съемки Салехарда (а) и Тикси (б), где по максимумам $|\sigma^0|$ (показаны на рисунках стрелками) определяем даты начала замерзания и оттаивания почвы. Для Салехарда (рисунок 10 (а)) максимумы при оттаивании почвы равны $\max=3.9$ дБ и 2.9 дБ, для VV и VH поляризаций, соответственно, – это $|\sigma_{2.6.2017}^0 - \sigma_{14.6.2017}^0|$ [дБ] – период начала оттаивания почвы для 2017 года, и для 2018 года - это $|\sigma_{28.5.2018}^0 - \sigma_{9.6.2018}^0|$ [дБ], что соответствует $\max=4.6$ дБ и 2.4 дБ для VV и VH поляризаций. Максимумы, определяющие даты начала замерзания почвы, равны

1.6 дБ и 1.9 дБ, соответственно, для VV и VH поляризаций – это $|\sigma_{18.9.2017}^0 - \sigma_{30.9.2017}^0|$. Следует отметить, что чем чаще осуществляется радарная съемка исследуемой территории, тем точнее можно определить время начала замерзания/оттаивания почвы. Для Тикси (рисунок 10 (б)) максимумы при оттаивании почвы равны 4.3 дБ и 3.3 дБ, соответственно, для VV и VH поляризаций – это $|\sigma_{7.6.2017}^0 - \sigma_{19.6.2017}^0|$ [дБ] – период начала оттаивания почвы для 2017 года, и для 2018 года - это $|\sigma_{21.5.2018}^0 - \sigma_{2.6.2018}^0|$ [дБ], что соответствует 2.0 дБ и 0.7 дБ для VV и VH поляризаций. Максимумы, определяющие даты начала замерзания почвы, равны 1.6 дБ и 3.7 дБ, соответственно, для VV и VH поляризаций – это $|\sigma_{11.9.2017}^0 - \sigma_{23.9.2017}^0|$.

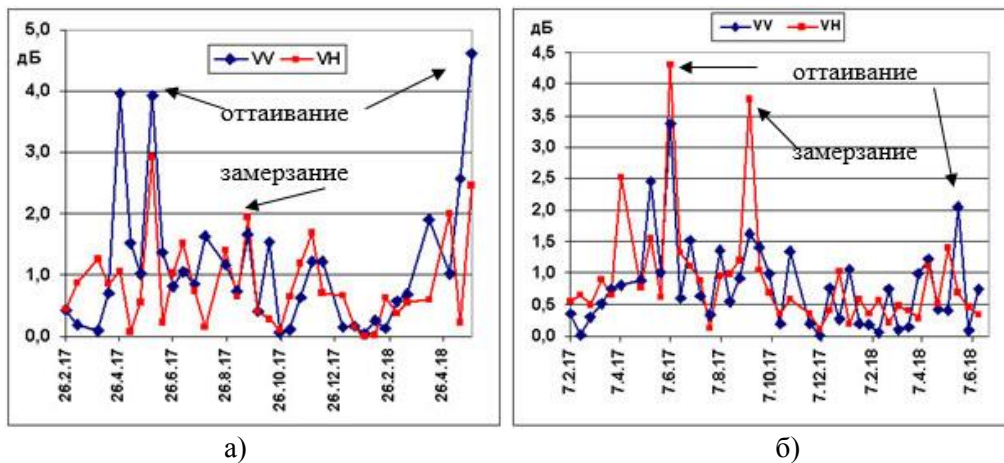


Рисунок 9. Разность значений $|\sigma^0|$ в дБ для соседних дат радарной съемки в районе аэропортов Салехарда (а) и Тикси (б).

Интересно отметить, что амплитуды значений σ^0 поляризации VV более, чем в 4 раза, превосходят амплитуды значений σ^0 поляризации VH (рисунки 5 и 6), при этом перепады $|\sigma^0|$ для обеих поляризаций вполне сопоставимы и позволяют уточнить промежуток времени для определения начала замерзания/оттаивания почвы.

Исходя из формулы Dubois et al. [19] для связи КОР согласованной поляризации с параметрами почвы (реальной частью ДП почвы и шероховатостью поверхности), можно определить скачок ДП при оттаивании и замерзании почвы. Так, для Салехарда скачок реальной части ДП почвы при оттаивании составляет 12.6 единиц для 2017 года и 14.9 единиц для 2018 года. При замерзании скачок ДП почвы составляет порядка 5.3 единицы. Соответствующие значения для Тикси – 8.6; 5.2; 4.1.

3.2. Определение состояния МП по фактору состояния поверхности и пороговому значению σ^0

Еще один способ определения состояния МП только по радарным данным, не используя наземные измерения, дан в работе [20].

Авторы [20] 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 летом и зимой в дБ, $\sigma^0(t)$ - текущее значение КОР, t – время.

Авторы [20] утверждают, что сезонные вариации СПФ сильно коррелируют с сезонными вариациями температуры почвы, принимая отрицательные значения при температуре почвы ниже 0°C . Тогда 5-см верхний слой почвы можно классифицировать как замерзший, если

значение СПФ, измеренное радаром, становится отрицательным. На рисунке 10 показаны графики СПФ для Салехарда и Тикси.

По формуле (1) получается, что пересечение значения 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 в 5 - см верхнем слое. И это значение можно определить для каждого места, зная среднее значения $\sigma^0_{лето}$ и $\sigma^0_{зима}$. Назовем это значение $\sigma^0_{порог}$.

Для Салехарда значение $\sigma^0_{лето}$ определялось за период 2.6.2017÷18.9.2017, и для VV поляризации значение $\sigma^0_{лето} = -13.6$ дБ, а для VH поляризации $\sigma^0_{лето} = -19.2$ дБ. Значение $\sigma^0_{зима}$ определялось за период 30.9.2017÷28.5.2018. Для VV поляризации $\sigma^0_{зима} = -16$ дБ, для VH поляризации $\sigma^0_{зима} = -22.1$ дБ. Тогда, по формуле (1) получаем для $\sigma^0_{порог} = -14.8$ для VV поляризации и $\sigma^0_{порог} = -20.6$ для VH поляризации.

Для Тикси значение $\sigma^0_{лето}$ определялось за период 19.6.2017÷11.9.2017, и для VV поляризации $\sigma^0_{лето} = -14.9$ дБ, а для VH поляризации $\sigma^0_{лето} = -20.95$ дБ. Значение $\sigma^0_{зима}$ определялось за период 23.9.2017÷21.5.2018. Для VV поляризации $\sigma^0_{зима} = -16.3$ дБ, для VH поляризации $\sigma^0_{зима} = -24.6$ дБ. Тогда, по формуле (1) получаем для $\sigma^0_{порог} = -15.6$ дБ для VV поляризации и $\sigma^0_{порог} = -22.8$ дБ для VH поляризации.

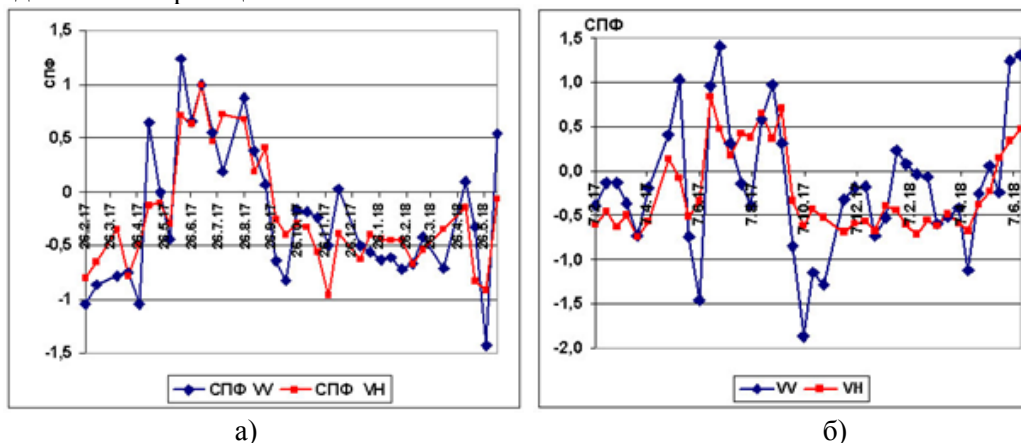


Рисунок 10. Изменение СПФ для Салехарда (а) и Тикси (б).

Используя пороговые значения $\sigma^0_{порог}$, построим локальные карты изменения мест талой и мерзлой почвы в районе аэропорта Салехарда для дат 9.5.2017 и 14.6.2017 – оттаивание, и 18.9.2017 и 12.10.2017 – замерзание. Полученные изображения, размером 2,8*3 км, показаны на рисунке 11. Синий цвет - значения $\sigma^0 < \sigma^0_{порог}$ (мерзлая почва), желтый цвет – значения $\sigma^0 > \sigma^0_{порог}$ (таялая почва). Отмечаем значительное уменьшение площади мерзлой почвы на изображении за 14/06/2017 при оттаивании и, соответственно, увеличение площади мерзлой почвы на изображении за 12.10.2017 при замерзании.

3.3. Определение состояния МП по текстурным признакам

В работе [21] показана возможность выделения на радарных изображениях разных типов поверхности на основе использования текстурных признаков Харалика [22] ‘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.

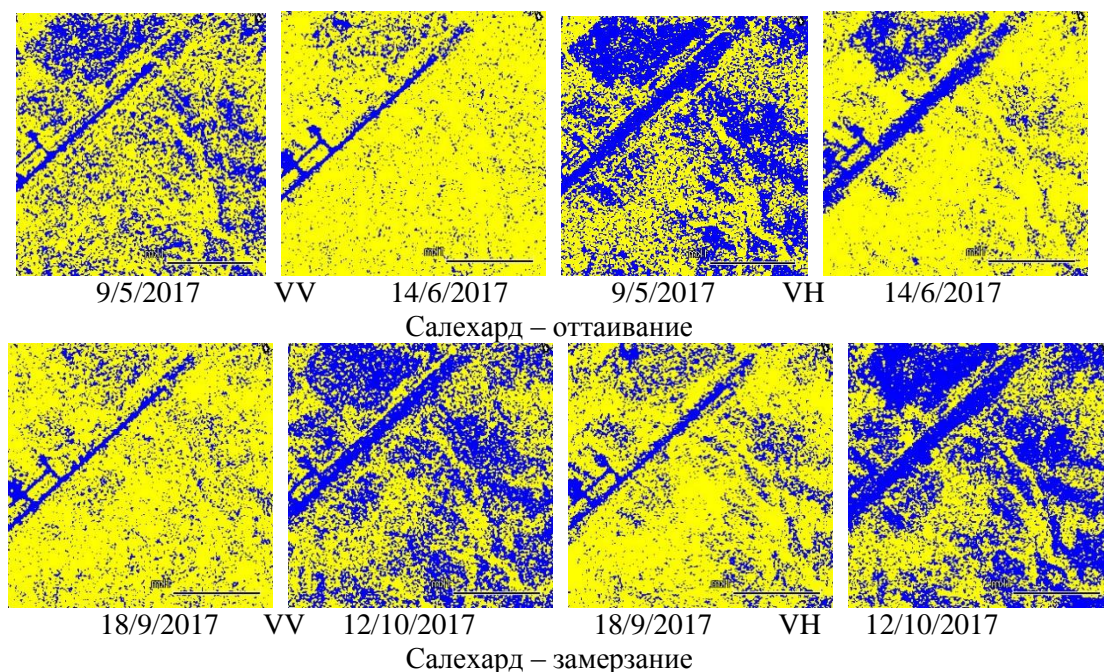


Рисунок 11. Салехард, даты съемки 9.05.2017 и 14.6.2017 (период оттаивания почвы), и даты съемки 18.09.2017 и 12.10.2017 (период замерзания почвы). Синий цвет - значения $\sigma^0 < \sigma^0_{\text{порог}}$ (мерзлая почва), желтый цвет – значения $\sigma^0 > \sigma^0_{\text{порог}}$ (талая почва).

4. Индекс промерзания/оттаивания почвы

Температура воздуха коррелирует с температурой почвы и глубиной промерзания почвы [23]. Аккуратные предсказания глубины промерзания почвы являются важным аспектом в различных инженерных проектах. 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. При наличии всех входных данных результаты моделей могут быть достаточно точными. При отсутствии некоторых входных данных необходимо оценить насколько это повлияло на точность получения результата. 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 [24] рассмотрена точность предсказания глубины промерзания почвы для этих трех аналитических и полуэмпирических моделей. Поскольку ни одна из моделей не дает аккуратных результатов, авторами [24] предложена модифицированная эмпирическая модель для разных типов почв, которая на входе требует только знания максимальных и минимальных температур воздуха за сутки.

Авторы [24] 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

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

с коэффициентом детерминации 0.94 (число измерений 29),

для песчаных почв

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

с коэффициентом детерминации 0.91 (число измерений 129),

где h – глубина промерзания почвы в см, $CFI = \sum_{i=1}^n (T_{\min}^{\text{воздух}} + T_{\max}^{\text{воздух}}) / 2$ – суммарный индекс

промерзания, $T_{\min}^{\text{воздух}}$ и $T_{\max}^{\text{воздух}}$ – минимальная и максимальная температура воздуха за сутки.

Авторы [24] получили обобщенное для всех типов почв эмпирическое уравнение с учетом измерения средней теплопроводности образцов почв в штате Мичиган, отмечая, что при использовании их эмпирических уравнений для других территорий необходима калибровка.

Максимальная глубина промерзания/оттаивания почвы для каждого года определяются 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). В таблице 2 приведены значения AFI, характеризующие максимальную глубину промерзания/оттаивания почвы, для Салехарда, Тикси и Норильска за 2012-2018 годы. О тренде при линейной аппроксимации говорить здесь некорректно, поскольку коэффициент детерминации R^2 имеет очень малые значения - от 0.001 до 0.2.

Таблица 2. Значение AFI по годам, характеризующего максимальную глубину оттаивания/промерзания почвы.

Станция/год	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Салехард	1626/2780	1470/3262	1177/3348	1447/2943	1844/2788	1240/3324	1380/2966
Тикси	993/5062	658/5470	870/4474	761/4805	793/4871	738/4564	856/5092
Нордбск	1386/3493	1507/4398	1008/4174	1307/4037	1571/3530	1184/4146	/4323

5. Заключение

В работе рассматривается вопрос об идентификации талых/мерзлых почв в приповерхностном слое в районе Салехарда, Тикси и Норильска по радарным данным Sentinel 1B C-диапазона с поляризациями VV и VH за период 2017-2018 годов. Определение состояния мерзлой почвы осуществляется тремя способами: 1) по многовременным радарным данным на основе значительного на 3-5 дБ перепада значений коэффициента обратного рассеяния σ^0 при переходе к состоянию замерзания/оттаивания почвы. Для Салехарда максимальные значения перепадов σ^0 составили 4.6 дБ и 2.9 дБ, соответственно, для VV и VH поляризаций при оттаивании, и 1.6 и 1.9 дБ для VV и VH поляризаций при замерзании почвы. Для Тикси, перепады σ^0 равны при оттаивании 4.3 и 3.3 дБ, для VV и VH поляризаций, и при замерзании 1.6 дБ и 3.7 дБ для VV и VH поляризаций; 2) по нахождению порогового значения $\sigma_{\text{порог}}^0$, при котором температура в верхнем слое почвы опускается ниже 0°C . Найденные значения $\sigma_{\text{порог}}^0$ позволили построить локальные карты мерзлой и талой почвы в районе тестовых участков; 3) по текстурным признакам Харалика. Показано, что текстурный признак ‘обратный момент’ идентифицирует области с мерзлой почвой.

Показано, что для тестовых участков Салехарда, Тикси и Норильска коэффициент корреляции Спирмена между КОР и температурой воздуха для кросс- поляризации превышает коэффициент корреляции для согласованной поляризации.

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

6. Литература

- [1] Shiklomanov, N.I. From Exploration to Systematic Investigation: Development of Geocryology in 19th- and Early- 20th-Century Russia / N.I. Shiklomanov // Physical Geography. – 2005. – Vol. 4. – P. 249-263.

- [2] Анисимов, О.А. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. Глава 8. Континентальная многолетняя мерзлота / О.А. Анисимов, Ю.А. Анохин, С.А. Лавров, Г.В. Малкова, Л.Т. Мяч, А.В. Павлов, В.А. Романовский, Д.А. Стрелецкий, А.Л. Холодов, Н.И. Шикломанов. – М.: Росгидромет, 2012. – С. 301-359.
- [3] Duguay, C.R. Satellite remote sensing of permafrost and seasonally frozen ground / C.R. Duguay, T. Zhang, D.W. Leverington, V.E. Romanovsky // Remote sensing of Northern hydrology, geophysical monograph series. – 2005. – Vol. 163. – P. 91-117.
- [4] Khaldoune, J. An approach for mapping frozen soil of agricultural land under snow cover using RADARSAT-1 and RADARSAT-2 / J. Khaldoune, E. Van Bochove, M. Bernie., M.C. Nolin // Proc. IGARSS'2008. Boston. Mass. – 2008. – Vol. III. – P. 382-385.
- [5] Khaldoune, J. Mapping agricultural frozen soil on the watershed scale using remote sensing data / J. Khaldoune, E. Van Bochove, M. Bernie., M.C. Nolin // Appl. Environment. Soil Sci. – 2011. – Vol. 193237. – P. 1-16. DOI: 10.1155/2011/193237.
- [6] Wegmüller, U. The effect of freezing and thawing on the microwave signatures of bare soil / U. Wegmüller // Remote Sens. Environ. – 1990. – Vol. 33. – P. 123-135.
- [7] Rignot, E. Monitoring of environmental conditions in taiga forests using ERS-1 SAR / E. Rignot, J.B. Way, K. McDonald, L. Viereck, C. Williams, P. Adams, C. Payne, W. Wood, J. Shi // Remote Sens. Environ. – 1994. – Vol. 49. – P. 145-154.
- [8] Park, S.-E. Monitoring freeze/thaw cycles using ENVISAT ASAR global mode / S.-E. Park, A. Bart, D. Sabel, W. Wagner, V. Naeimi, Y. Yamaguchi // Remote Sens. Environ. – 2011. – Vol. 115. – P. 3457-3467.
- [9] Музалевский, К.В. Измерение температуры мерзлого деятельного слоя почвенного покрова арктической тундры по данным космического радара ALOS PALSAR / К.В. Музалевский, В.Л. Миронов, Дж. Боике, А.А. Швалева, А.В. Евтюшкин, А.В. Филатов // Изв. ВУЗов. Физика. – 2013. – Т. 1. – С. 1-3.
- [10] Rousseau, L.P. Potentials of RADARSAT-2 data to monitor freezing/thawing cycles over agricultural lands in Canada / L.P. Rousseau, R. Magagi, R. Leconte, A. Berg, B. Toth // Proc. IGARSS. Cape Town, South Africa. – 2009. – P. 598-601.
- [11] Hallikainen, M.T. Microwave dielectric behavior of wet soil- part 1: empirical models and experimental observations / M.T. Hallikainen, F.T. Ulaby, M.C. Dobson, M.A. El-Rayes, L.K. Wu // IEEE Trans. GRS. – 1985. – Vol. 23(1). – P. 25-34.
- [12] [Electronic resource]. – Access mode: www.iki.rssi.ru/books/2003boyarsky.pdf.
- [13] Ulaby, F.T. Microwave Remote Sensing: Active and Passive: Vol. 1 / F.T. Ulaby, R.K. Moore, A.K. Fung // Fundamentals and Radiometry. – Dedham, Mass, USA: Artech House, 1982.
- [14] Nyberg, L. Soil frost effects on soil water and runoff dynamics along a boreal forest transect: 1. Field investigations / L. Nyberg, M. Stahli, P.-E. Mellander, K. H. Bishop // Hydrol. Process. – 2002. – Vol.15. – P. 909-926. DOI: 10.1002/hyp.256.
- [15] [Electronic resource]. – Access mode: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-1>.
- [16] Dobson, M.C. Microwave dielectric behavior of wet soil Part II: Dielectric mixing models / M.C. Dobson, F.T. Ulaby, M.T. Hallikaine, M.A. El-Rayes // IEEE Trans. GRS. – 1985. – Vol. GE-23. – P. 35-46.
- [17] Zhang, L. The estimation of dielectric constant of frozen soil-water mixture at microwave bands / L. Zhang, J. Shi, Z. Zhang, K. Zhao // Proc. IGARSS, Toulouse, France. – 2003. – P. 608-611.
- [18] Jagdhuber, Th. Identification of Soil Freezing and Thawing States Using SAR Polarimetry at C-Band / Th. Jagdhuber, J. Stockamp, I. Hajnsek, R. Ludwig // Remote Sens. – 2014. – Vol. 6. – P. 2008-2023. DOI:10.3390/rs6032008.
- [19] Dubois, P.C. Measuring soil moisture with imaging radars / P.C. Dubois, J.J. van Zyl, T. Engman // IEEE Trans. GRS. – 1995. – Vol. 33(4). – P.916-926.
- [20] Mironov, V.L. Spaceborne radar monitoring of soil freezing/thawing processes in the arctic tundra / V.L. Mironov, K.V. Muzalevsky // Russian Physics Journal. – 2013. – Vol. 55(8). – P. 899- 902.

- [21] Родионова, Н.В. Классификация поверхности на поляриметрических РЛИ с использованием текстуры и разложения по механизмам рассеяния / Н.В. Родионова // ИЗК. – 2007. – Т. 34. – С. 8-14.
- [22] Haralick, R.M. Statistical and structural approaches to texture / R.M. Haralick // Proc. IEEE. – 1979. – Vol. 67(5). – P. 786-804.
- [23] Brown, W.G. Difficulties associated with predicting depth of freeze and thaw / W.G. Brown // Canadian Geotechnical J. – 1964. – Vol. 1(4). – P. 215-226.
- [24] Rajaei, P. Frost depth – a general prediction model / P. Rajaei, G.Y. Baladi // 94st Transportation Research Board Annual Meeting. – Washington D.C., 2015. – P. 1-15.

Identification of thawed and frozen soil state in some Siberia regions by multi-temporal Sentinel 1 radar data in 2017-2018

N.V. Rodionova¹

¹Institute of Radioengineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, Vvedenskiy sq. 1, Fryazino, Russia, 141190

Abstract. The paper deals with the identification of thawed/frozen soils in the topsoil layer for three stations in Russia: Salekhard, Tiksi and Norilsk by using Sentinel 1B C-band radar data for the period of 2017-2018. Determination of the frozen/thawed soil state is carried out in three ways: 1) by multi-temporal radar data on the basis of a significant in 3-5 dB difference in the backscatter coefficient σ^0 in the transition of freezing/thawing soil state, 2) by finding the threshold value of σ^0 at which the temperature in the topsoil layer falls below 0°C, 3) by texture features. The first method allows determine the period of time during which the process of freezing/thawing of the soil occurs, the accuracy of which increases with the increase in the repeatability of the survey area. The second and third methods allow to build local maps of frozen/thawed soil. It is shown that for the studied areas the Spearman correlation coefficient between σ^0 and air temperature for cross - polarization exceeds the correlation coefficient for the co- polarization. The graphs of the AFI (air freezing index) for the period of 2012-2018 years are constructed based on the archive data of air temperature for the study areas.