

Determination of Thawed/Frozen State of the Soils of Yakutia by Sentinel 1 RADAR Data

Natalia V. Rodionova

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics, Fryazino Branch, Russian
Academy of Sciences, Russia

Abstract. The paper deals with the identification of thawed/frozen soils in the topsoil layer for stations in Yakutia: Tiksi, Verkhoyansk, Tomtor (Oymyakon) and Yakutsk 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 in the transition of freezing/thawing soil state, 2) by finding the threshold value of the backscatter coefficient at which the temperature in the topsoil layer falls below 0°C, 3) by texture features.

Keywords: *C-band radar data; backscattering coefficient; air temperature; soil freezing/thawing state; Spearman's correlation coefficient*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТАЛОГО/МЕРЗЛОГО СОСТОЯНИЯ ПОЧВ ЯКУТИИ ПО РАДАРНЫМ ДАННЫМ SENTINEL 1

Родионова Н.В.

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

Рассматривается вопрос об идентификации талых/мерзлых почв в приповерхностном слое в районе метеостанций Тикси, Верхоянска, Томтора (Оймякона) и Якутска с широтой места от 62° до 71° с.ш. 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) при переходе к состоянию замерзания/оттаивания почвы, 2) по нахождению порогового значения $\sigma_{порог}^0$, при котором температура в верхнем слое почвы опускается ниже 0°C , 3) по текстурным признакам.

Ключевые слова: радарные данные С-диапазона, коэффициент обратного рассеяния, температура воздуха, талое/мерзлое состояние почвы, коэффициент корреляции Спирмена.

Введение. Дистанционный радарный мониторинг приповерхностного слоя мерзлых почв Арктических регионов России стал доступен на постоянной основе с запуском аппаратов Sentinel 1, осуществляющих радиолокационную съемку в С-диапазоне длин волн с периодом в 12 дней с разрешением 10 м. Исследование мерзлых почв, как правило, связано с наземными измерениями глубины протаивания. Дистанционный мониторинг важен прежде всего из-за обширности масштаба распространения вечной мерзлоты на территории России и ограниченной доступности территорий. Однако, возможности радарной съемки ограничены из-за проникновения волны в мерзлую почву лишь на несколько см. Радар различает мерзлую почву по изменению содержания в ней жидкой воды, и, соответственно, по изменению диэлектрической проницаемости (ДП) почвы [1-3]. Несколько работ посвящены использованию Sentinel 1 для идентификации мерзлых почв [4-6].

Целью данной работы является определение на основе многовременных радарных данных Sentinel 1 талых/мерзлых почв на территории Якутии, которая является самым холодным обитаемым регионом в Северном полушарии Земли.

Исходные радарные данные Sentinel 1В. В работе использованы находящиеся в открытом доступе Sentinel 1В (S1) радарные данные С-диапазона IW (interferometric wide swath) моды с поляризацией VV и VH и пространственным разрешением 10 м. Работа с изображениями S1 осуществлялась с помощью программы S1Toolbox и позднее SNAP [7]. Съемку исследуемых территорий России выполняли аппараты Sentinel 1А и Sentinel 1В, первый из них с апреля 2015 года по сентябрь 2016 года, второй - с конца сентября 2016 года.

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

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

Таблица. Информация об использованных радарных данных Sentinel 1В

Название станции и координаты	Число обработанных сеансов съемки	Угол обзора	Период съемки	Количество точек в профиле
Тикси 71.7 ⁰ с.ш., 128.9 ⁰ в.д.	39	40,5 ⁰	19.2.2017–14.6.2018	~20
Верхоянск 67.547 ⁰ с.ш., 133.427 ⁰ в.д.	29	43 ⁰	21.10.2017-4.10.2018	~15
Томтор (Оймякон) 63.264 ⁰ с.ш., 143.21 ⁰ в.д.	25	37 ⁰	10.10.2017-25.7.2018	~15
Якутск 62.013 ⁰ с.ш., 129.657 ⁰ в.д.	39	35,3 ⁰	21.2.2017-16.6.2018	~15

Районы исследования. Среди 4 районов исследования в Якутии 3 города относятся к самым холодным городам России: Верхоянск, Оймякон, Якутск.

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) 71⁰41.85' с.ш., 128⁰ 54.18' в.д.

Бухта Тикси окружена невысокими щебнистыми безлесными холмами, даже кустарника здесь почти нет. Климат суровый, арктический. Морозы немного смягчает море, средняя температура января -37.3°C , июля и августа— всего $+7.6^{\circ}\text{C}$ и $+7.7^{\circ}\text{C}$, соответственно. Абсолютный минимум температуры в Тикси -50.5°C . Самая большая возможная высота снежного покрова составляет 99 см. Апрель в Тикси имеет самую низкую среднемесячную температуру в России, составившую в 2006 году -27.6°C . На рисунке 1 показаны спутниковое изображение Тикси, температура воздуха в Тикси за период 19.2.2017 – 14.6.2018 по данным gr5.ru, радарное изображение района аэропорта Тикси и линия профиля, вдоль которого вычислялось среднее значение коэффициента обратного рассеяния (КОР) (координаты средней точки профиля 71.7015⁰ с.ш. и 128.9205⁰ в.д.) и графики изменения КОР двух поляризаций. Значения температуры воздуха взяты на момент съемки территории радаром S1.

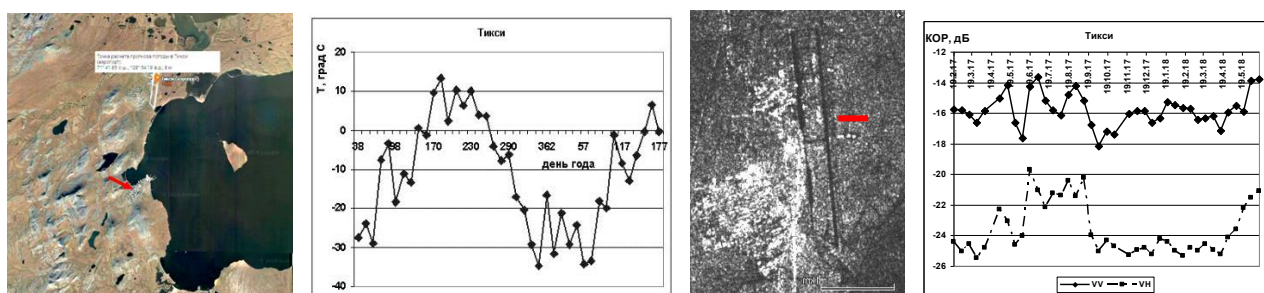


Рис. 1. Бухта с поселком Тикси и аэропортом с точкой расчета прогноза погоды, температура воздуха в Тикси, радарное изображение с профилем (красная линия), среднее значение КОР по профилю.

Верхоянск. Верхоянск— город в Верхоянском улусе Якутии, на правом берегу реки Яна, в 92 км к юго-западу от административного центра улуса — Батагая. Это самый северный город Якутии и один из самых маленьких населённых пунктов в России, имеющих статус города. Суровый климат, отсутствие осадков привели к тому, что в городе живет 1122

человека (2018 год). Это граница субарктического и умеренного поясов. Климат характеризуется коротким, сухим и теплым летом, и зимой со средней температурой -40° . Верхоянск — одно из самых холодных мест на Земле, самый холодный город в мире. Самая низкая температура $-67,7^{\circ}\text{C}$ была зарегистрирована здесь в феврале 1892 года. Верхоянск часто называют Полюсом холода северного полушария. На рисунке 2 показаны спутниковое изображение Верхоянска, температура воздуха за период 21.10.2017 – 4.10.2018 по данным gr5.ru, положение профиля на радарном изображении для определения среднего значения КОР. Координаты средней точки на профиле 67.5468° с.ш. и 133.427° в.д.

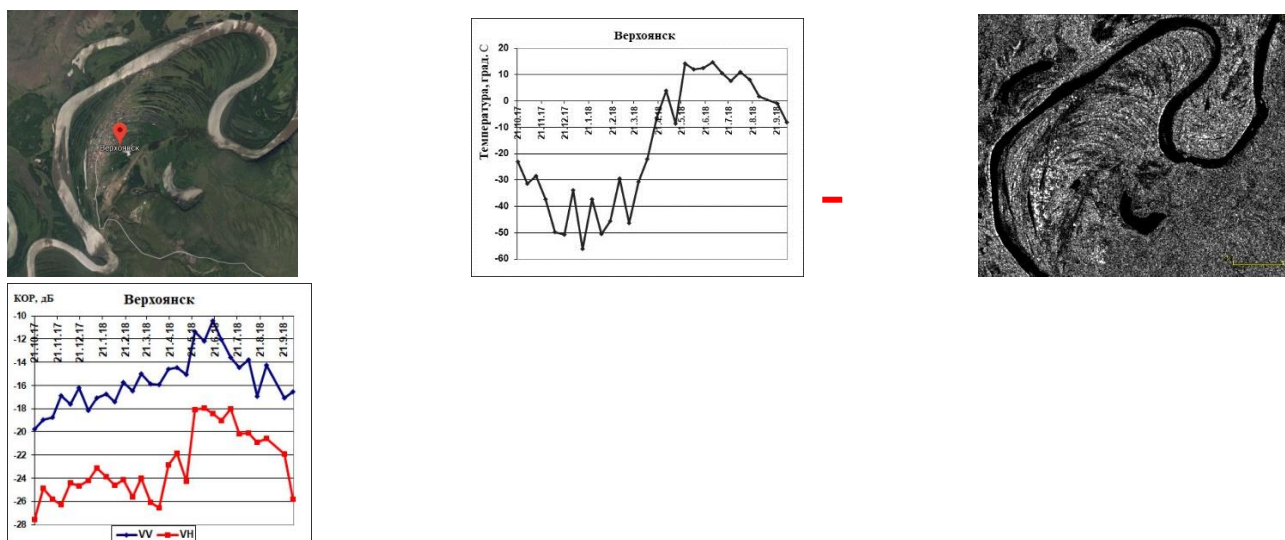


Рис. 2. Верхоянск на google map, температура воздуха, радарное изображение с профилем (красная линия), среднее значение коэффициента обратного рассеяния по профилю.

Томтор (Оймякон). Хотя официально статус Полюса холода отдан Верхоянску, но право о статусе самого холодного места северного полушария оспаривается Оймяконом ($-65,4^{\circ}\text{C}$). Численность населения села Оймякон 500 человек. Оймякон находится во впадине и со всех сторон защищен горами, задерживающими выход тяжелого холодного воздуха. Здесь резко континентальный климат. Среднемесячная температура января -61°C . Село Томтор с метеостанцией (координаты 63.26382° с.ш., 143.210462° в.д.) находится в 30 км на юго-восток от Оймякона. В двух км от Томтора находится аэропорт. Населения здесь в 2 раза больше, чем в Оймяконе. На рисунке 3 показаны спутниковое изображение Томтора, температура воздуха за период 10.10.2017 – 25.7.2018 по данным gr5.ru, положение профиля на радарном изображении вблизи аэропорта с координатами средней точки 63.2454° с.ш., 143.1754° в.д. и графики среднего значения КОР по профилю за исследуемый период.

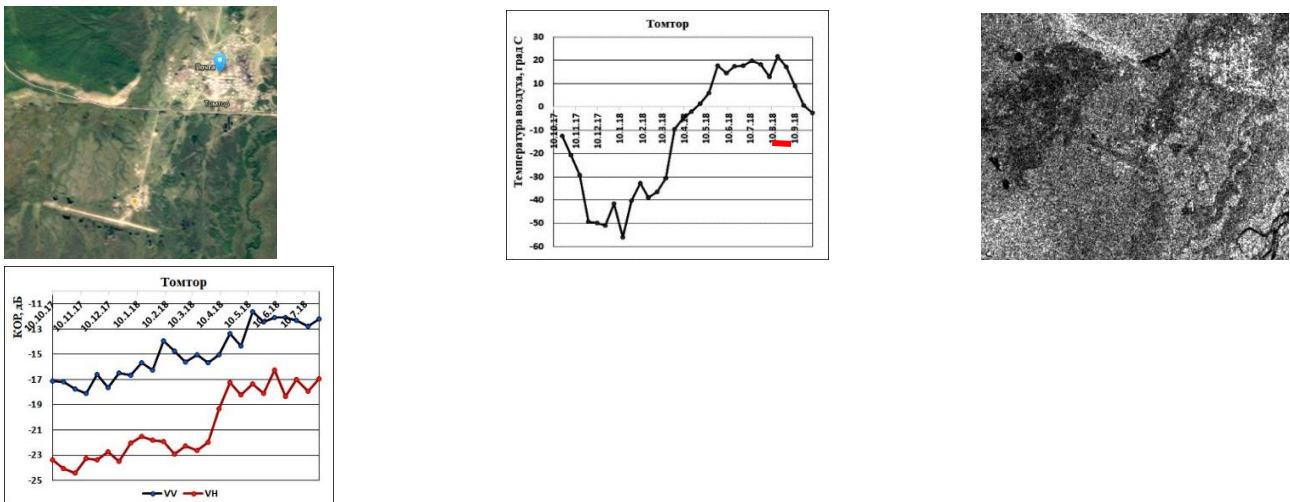


Рис. 3. Спутниковый снимок Томтора, температура воздуха по данным gr5.ru, РЛИ за 25.7.2018 VV поляризации и графики КОР за период 10.10.2017-25.7.2018.

Якутск. Якутск-столица республики Саха. Самый крупный из городов, расположенных в зоне вечной мерзлоты. Город расположен в равнинной местности, в долине Туймаада на левом берегу реки Лены. Находится несколько севернее параллели 62 градуса северной широты. Климат города —резко континентальный. Среднегодовая температура — $-8,8$ С. Зима в Якутске исключительно сурова, средняя температура января составляет около -40 С. Самая низкая зафиксированная температура -64° С. Для лета характерно небольшое количество осадков и часто сильная жара до $+40^{\circ}$. Годовая амплитуда T° Якутска— одна из наибольших на планете, примерно равна годовой амплитуде «полюсов холода»— Оймякона и Верхоянска, и превышает 100 С ($102,8$ С). Здесь располагается CALM площадка R42 с координатами 62.013306° с.ш., 129.656991° в.д. [8]. Ландшафт – луг, почва сухая – супесь, песок. Глубина протаивания составляет $185 - 215$ см. На рисунке 4 показаны спутниковое изображение Якутска, температура воздуха за период 21.2.2017 – 16.6.2018, положение профиля на радарном изображении для определения среднего значения КОР и изменение значений КОР за исследуемый период времени.

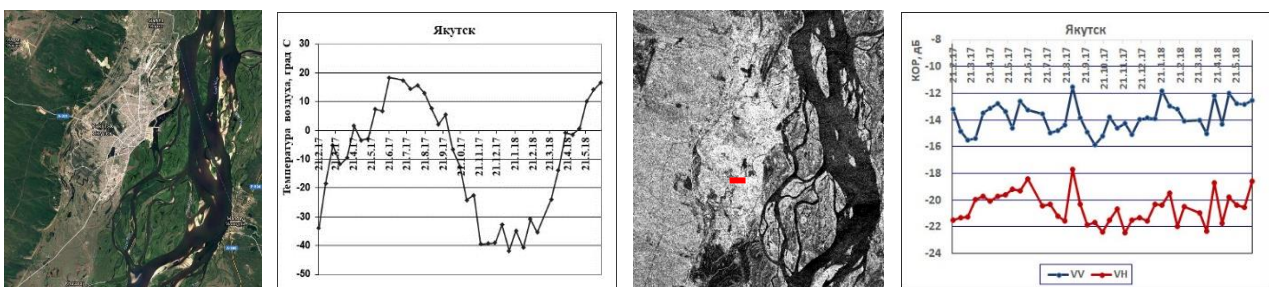


Рис. 4. Якутск, температура воздуха, РЛИ с линией профиля и графики изменения КОР.

Коэффициент корреляции Спирмена между температурой воздуха и КОР для Тикси равен $\rho_s=0.21$ ($p=0.1$) для VV поляризации (слабая корреляция) и $\rho_s=0.69$ ($p<0.01$) для VH поляризации. Для Верхоянска $\rho_s=0.68$ ($p<0.01$)- VV и $\rho_s=0.67$ ($p<0.01$) - VH поляризация. Для Томтора $\rho_s=0.77$ ($p<0.01$) - VV и $\rho_s=0.76$ ($p<0.01$) - VH поляризация. Для Якутска ρ_s

$=0.198$ ($p=0.113$) - VV и $\rho_s=0.34$ ($p=0.017$) - VH поляризация. На кросс поляризации корреляция выше или близка к корреляции на согласованной поляризации.

Определение состояния талой/мерзлой почвы по многовременным радарным данным. Сигнал радара от поверхности преимущественно зависит от диэлектрической проницаемости почвы, которая напрямую связана с содержанием в ней воды и льда, кроме того, на КОР влияют шероховатость поверхности и растительный покров. Глубина проникновения

э/м волны в почву определяется по формуле $\delta r = \frac{\lambda \cdot \sqrt{\epsilon'}}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon''}$, 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 (МП) с $\epsilon' \approx 5.5$ и $0.1 \leq \epsilon'' \leq 0.5$ получаем глубину проникновения э/м волны в почву $4 \leq \delta r \leq 20$ см. С помощью радара дистанционно можно определить состояние только приповерхностного слоя почвы, которое меняется при падении температуры почвы ниже 0°C с переходом воды в почве от жидкого к мерзлому состоянию. Данный процесс приводит к скачку значения ДП почвы и, соответственно, скачку в значениях КОР.

Использование многовременных радарных данных. Используя многовременную последовательность радарных данных, построим графики разности значений КОР по абсолютной величине между соседними датами радарной съемки. Это позволит выявить скачки значений КОР, и, следовательно, даты начала процессов замерзания/оттаивания почвы. Кроме того, по значениям скачков КОР можно оценить изменения значений ДП почвы, используя формулу Dubois et al. [9], которая связывает КОР согласованной поляризации с параметрами почвы (реальной частью ДП почвы и шероховатостью поверхности). На рис. 5 показаны графики разности значений σ^0 по абсолютной величине в дБ для соседних дат съемки тестовых участков Тикси (а), Верхоянска (б) и Якутска (в), где по максимумам $|\sigma^0|$ определяем даты начала замерзания и оттаивания почвы. Следует обратить внимание, что перепады $|\sigma^0|$ для кросс-поляризации превышают значения перепадов для согласованной поляризации, что свидетельствует о большей чувствительности VH поляризации к мерзлым почвам.

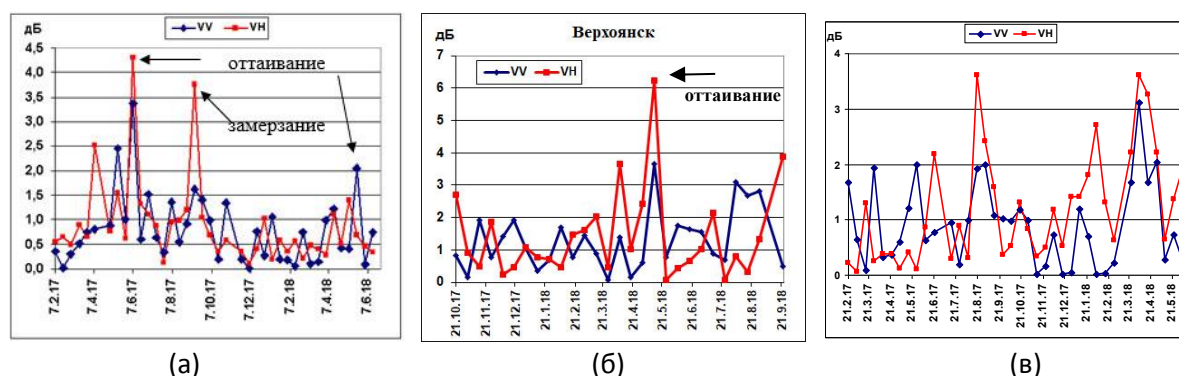


Рис. 5. Разность значений $|\sigma^0|$ в дБ для соседних дат радарной съемки в районах исследования Тикси (а), Верхоянска (б) и Якутска (в).

Использование фактора состояния поверхности. В работе [10] предложено определять состояние поверхности почвы через фактор состояния поверхности (СПФ), определяе-

мый по радарным данным: $СПФ = \frac{1}{2} + \frac{\sigma^0(t) - \sigma_{лето}^0}{\sigma_{лето}^0 - \sigma_{зима}^0}$, где $\sigma_{лето}^0$ и $\sigma_{зима}^0$ - средние значения КОР

летом и зимой в дБ, $\sigma^0(t)$ - текущее значение КОР, t – время. Авторы [10] 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 6 показаны графики СПФ для Тикси и Верхоянска.

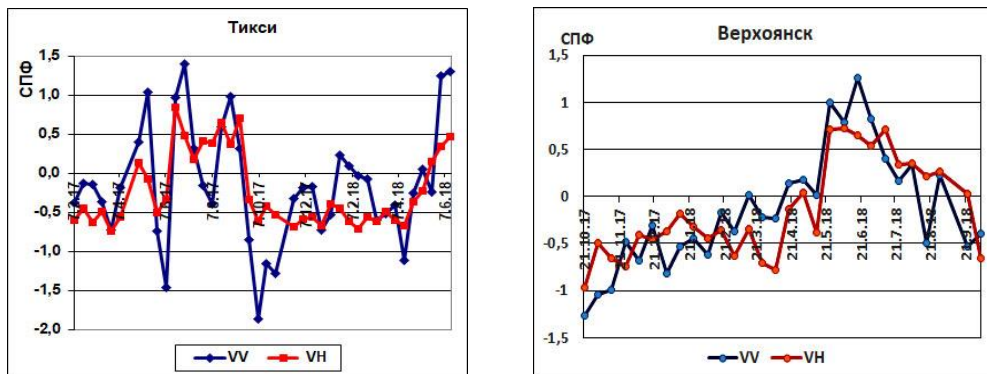
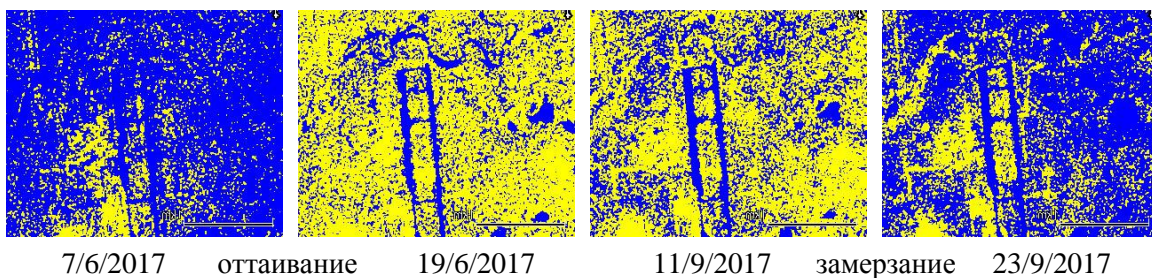


Рис. 6. Изменение СПФ для Тикси и Верхоянска.

Назовем значение $\sigma^0(t)$, при котором СПФ=0, пороговым значением $\sigma_{порог}^0$. Тогда условие $\sigma^0 < \sigma_{порог}^0$ определяет мерзлую почву, а условие $\sigma^0 \geq \sigma_{порог}^0$ -талую почву. Для Тикси получаем $\sigma_{порог}^0 = -15,6$ дБ для VV поляризации и $\sigma_{порог}^0 = -22,8$ дБ для VH поляризации. Для Верхоянска $\sigma_{порог}^0 = -15,1$ дБ для VV и $\sigma_{порог}^0 = -22,1$ дБ для VH поляризации. В работе [5] приведена регрессия для зависимости $\sigma_{порог}^0$ от широты места. Для Тикси и Верхоянска также прослеживается такая зависимость.

Используя пороговые значения $\sigma_{порог}^0$, построим локальные карты изменения мест талой и мерзлой почвы в районе аэропорта Тикси для дат 7.6.2017 и 19.6.2017 – оттаивание, и 11.9.2017 и 23.9.2017 – замерзание. Полученные изображения показаны на рисунке 7. Синий цвет - значения $\sigma^0 < \sigma_{порог}^0$ (мерзлая почва), желтый цвет – значения $\sigma^0 \geq \sigma_{порог}^0$ (талая почва). Отмечаем значительное уменьшение площади мерзлой почвы на изображении за 19.06.2017 при оттаивании и, соответственно, увеличение площади мерзлой почвы на изображении за 23.9.2017 при замерзании.



7/6/2017 оттаивание 19/6/2017 11/9/2017 замерзание 23/9/2017

Рис. 7. Тикси, даты съемки 7.06.2017 и 19.06.2017 (период оттаивания почвы), и даты съемки 11.09.2017 и 23.09.2017 (период замерзания почвы). Синий цвет - значения $\sigma^0 < \sigma_{порог}^0$ (мерзлая почва), желтый цвет – значения $\sigma^0 > \sigma_{порог}^0$ (талая почва).

Пороговое значение $\sigma_{порог}^0$, как отмечено в [10] и получено в работе [5] для Аляски, зависит от широты места, уменьшаясь при увеличении широты. Аналогичная зависимость есть и для значений КОР. На рис. 8 приведены графики изменения среднего значения КОР VV и VH поляризации за период с октября 2017 по июнь 2018 года для Якутска, Томтора, Верхоянска и Тикси в порядке возрастания широты места с коэффициентом детерминации регрессии 0.9 для кросс-поляризации и 0.8 для согласованной поляризации.

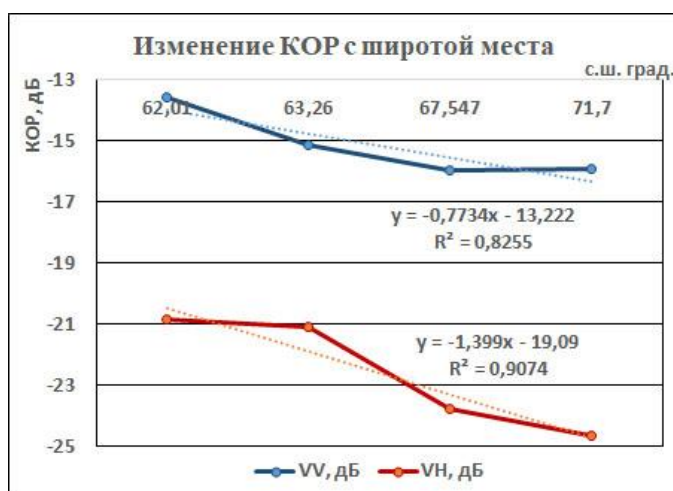


Рис. 8. Изменение КОР VV и VH поляризации с широтой места.

Использование текстурных признаков. Текстурные признаки Харалика [11] позволяют осуществить интерпретацию изображений, выделяя области с перепадом высот, гладкие поверхности. В работе [4] подробно описывается применение текстурных признаков для определения состояния мерзлой/талой почвы и приведены локальные карты мест талой/мерзлой почвы, где индикатором служит текстурный признак ‘обратный момент’, значение которого растет в местах с замершей почвой.

Заключение. В работе показаны некоторые возможности получения информации о состоянии мерзлой почвы в ряде мест Якутии по радарной съемке с помощью PCA Sentinel 1. По перепадам КОР возможно определить время начала замерзания/оттаивания почвы. По величинам перепадов КОР оценить величины перепадов значений ДП почвы в процессе замерзания/оттаивания почвы. По фактору состояния поверхности почвы можно получить пороговое значение КОР, позволяющее построить локальные карты мест талой/мерзлой почвы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]. *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.
- [2]. *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.

- [3]. *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.
- [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. №1. С. 29-37. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019129-37>.
- [5]. *Родионова Н.В.* Обратное рассеяние от приповерхностного слоя талых/мерзлых почв Аляски по радарным данным Sentinel 1// *РЭНСИТ.* 2019. Т. 11. №1. С. 21-30.
- [6]. *Baghdadi N., Bazzi H., El Hajj M., Zribi M.* Detection of frozen soil using Sentinel-1 SAR data//*Remote Sens.* 2018. 10. 1182; doi: 10.3390/rs10081182.
- [7]. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-1>.
- [8]. <https://www2.gwu.edu/~calm/data.north.html>.
- [9]. *Dubois P.C., van Zyl J.J., Engman T.* Measuring soil moisture with imaging radars // *IEEE Trans. GRS.* 1995. 33(4). P. 916-926.
- [10]. *Mironov V.L., Muzalevsky K.V.* Spaceborne radar monitoring of soil freezing/thawing processes in the arctic tundra// *Russian Physics Journal.* 2013. 55(8). (Russian Original №. 8. August, 2012).
- [11]. *Haralick R.M.* Statistical and structural approaches to texture// *Proc. IEEE.* 1979. 67(5). P. 786-804.