

# 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 1B C-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 C-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 C-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 1B.** В работе использованы находящиеся в открытом доступе Sentinel 1B (S1) радарные данные C-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 1A и Sentinel 1B, 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.

**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) 71°41.85' с.ш., 128° 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  $-37.3^{\circ}\text{C}$ , 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 рис. 1 показаны спутниковое изображение Тикси, температура воздуха в Тикси за период 19.2.2017-14.6.2018 по данным [gr5.ru](http://gr5.ru), радарное изображение района аэропорта Тикси и линия профиля, вдоль которого вычислялось среднее значение коэффициента обратного рассеяния (КОР) (координаты средней точки профиля  $71.7015^{\circ}$  с.ш. и  $128.9205^{\circ}$  в.д.) и графики изменения КОР двух поляризаций. Значения температуры воздуха взяты на момент съемки территории радаром S1.

**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  $-40^{\circ}$ . 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 рис. 2 показаны спутниковое изображение Верхоянска, температура воздуха за период 21.10.2017-4.10.2018 по данным [gr5.ru](http://gr5.ru), положение профиля на радарном изображении для определения среднего значения КОР. Координаты средней точки на профиле  $67.5468^{\circ}$  с.ш. и  $133.427^{\circ}$  в.д.

Информация об использованных радарных данных Sentinel 1B.

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

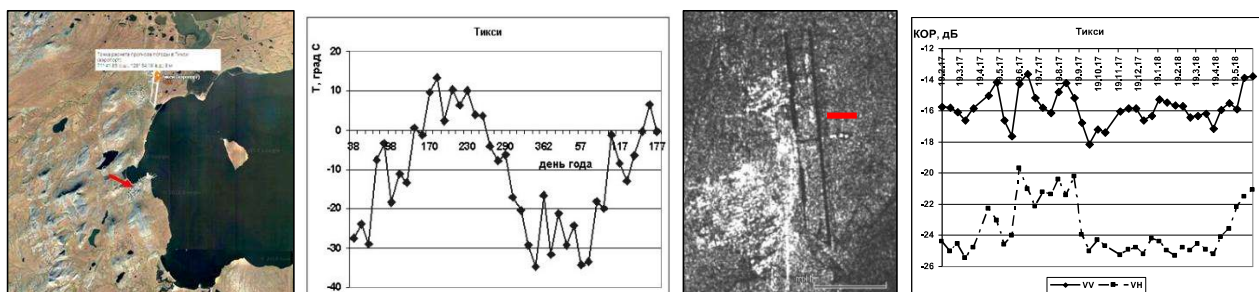


Рис. 1. Бухта с поселком Тикси и аэропортом с точкой расчета прогноза погоды, температура воздуха в Тикси, радарное изображение с профилем (красная линия), среднее значение КОР по профилю.

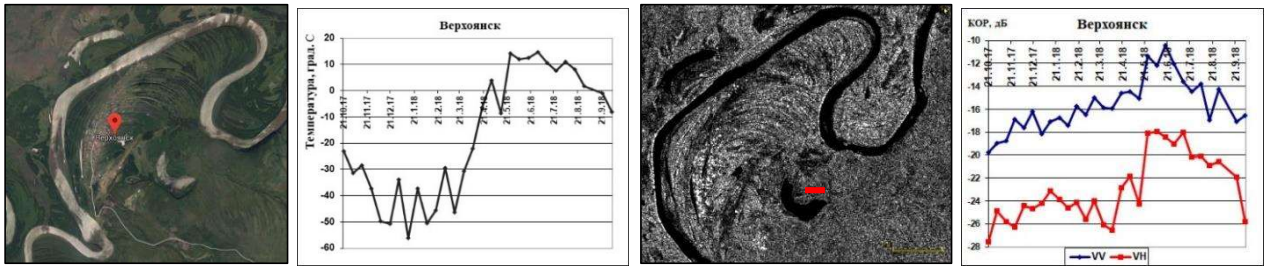


Рис. 2. Верхоянск на google map, температура воздуха, радарное изображение с профилем (красная линия), среднее значение коэффициента обратного рассеяния по профилю.

**Томтор (Оймякон).** Хотя официально статус Полюса холода отдан Верхоянску, но право о статусе самого холодного места северного полушария оспаривается Оймяконом (-65,4 °С). 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<sup>0</sup>С. Село Томтор с метеостанцией (координаты 63.26382<sup>0</sup> с.ш., 143.210462<sup>0</sup> 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 рис. 3 показаны спутниковое изображение Томтора, температура воздуха за период 10.10.2017-25.7.2018 по данным гр5.ru, положение профиля на радарном изображении вблизи аэропорта с координатами средней точки 63.2454<sup>0</sup> с.ш., 143.1754<sup>0</sup> в.д. и графики среднего значения КОР по профилю за исследуемый период.

**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<sup>0</sup>С. Для лета характерно небольшое количество осадков и часто сильная жара до +40<sup>0</sup>. Годовая амплитуда T<sup>0</sup> 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<sup>0</sup>с.ш., 129.656991<sup>0</sup> в.д. [8]. Ландшафт – луг, почва сухая – супесь, песок. Глубина протаивания составляет 185-215 см. На рис. 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.

Коэффициент корреляции Спирмена между температурой воздуха и КОР для Тикси равен  $\rho_s=0.21$  ( $p=0.1$ ) для VV поляризации (слабая корреляции) 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  $\rho_s=0.198$  ( $p=0.113$ ) – VV и  $\rho_s=0.34$  ( $p=0.017$ ) – VH поляризация. На кросс-поляризации корреляция выше или близка к корреляции на согласованной поляризации.

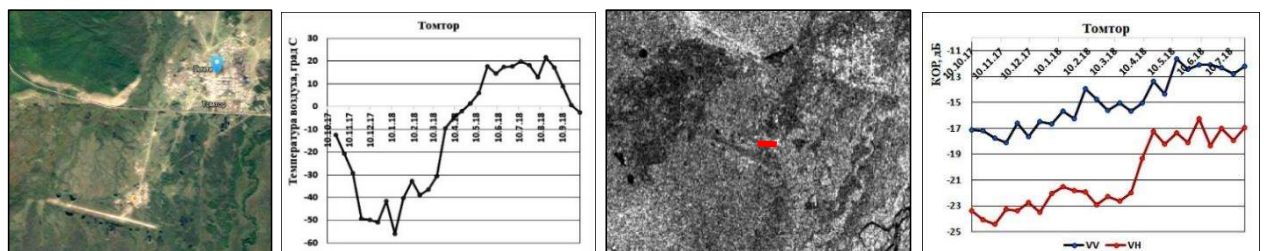


Рис. 3. Спутниковый снимок Томтора, температура воздуха по данным гр5.ru, РЛИ за 25.7.2018 VV поляризации и графики КОР за период 10.10.2017-25.7.2018.

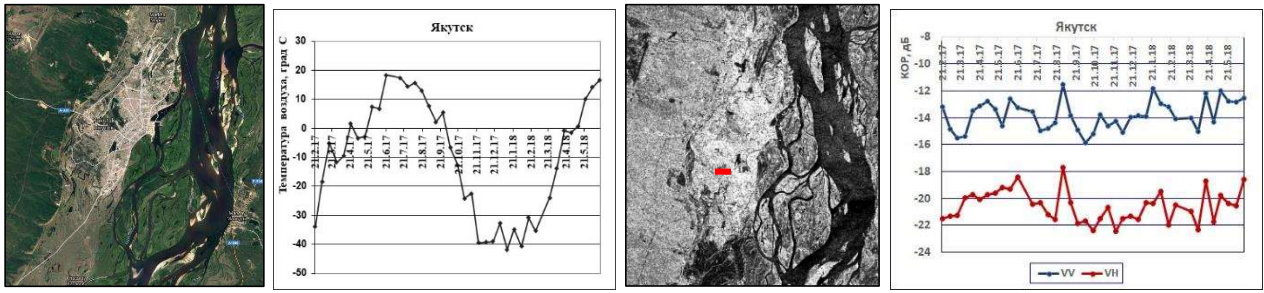


Рис. 4. Якутск, температура воздуха, РЛИ с линией профиля и графики изменения КОР.

**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  $\delta p = \frac{\lambda \cdot \sqrt{\epsilon'}}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon''}$ , где  $\lambda$  - 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  $4 \leq \delta p \leq 20$  см. С помощью радара дистанционно можно определить состояние только приповерхностного слоя почвы, которое меняется при падении температуры почвы ниже  $0^{\circ}\text{C}$  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  $\sigma^0$  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.

**Использование фактора состояния поверхности.** В работе [10] предложено определять состояние поверхности почвы через фактор состояния поверхности (СПФ), определяемый по радарным данным:  $\text{СПФ} = \frac{1}{2} + \frac{\sigma^0(t) - \sigma_{\text{лето}}^0}{\sigma_{\text{лето}}^0 - \sigma_{\text{зима}}^0}$ , 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 [10] утверждают, что сезонные вариации СПФ сильно коррелируют с сезонными вариациями температуры почвы, принимая отрицательные значения при температуре почвы ниже  $0^{\circ}\text{C}$ . 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.

Назовем значение  $\sigma^0(t)$ , при котором СПФ=0, пороговым значением  $\sigma_{\text{порог}}^0$ . Тогда условие  $\sigma^0 < \sigma_{\text{порог}}^0$  определяет мерзлую почву, а условие  $\sigma^0 \geq \sigma_{\text{порог}}^0$  - талую почву. Для Тикси по-

лучаем  $\sigma_{порог}^0 = -15,6$  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 рис. 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.

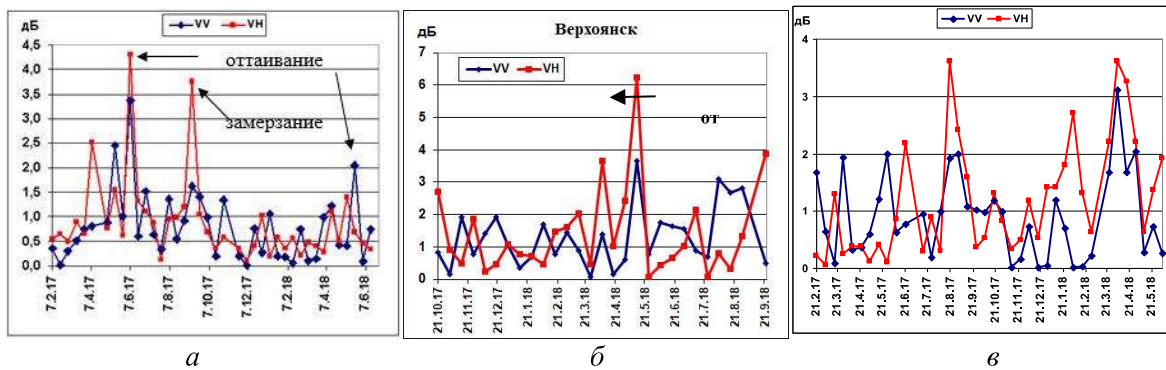


Рис. 5. Разность значений  $|\sigma^0|$  в дБ для соседних дат радарной съемки в районах исследования Тикси (а), Верхоянска (б) и Якутска (в).

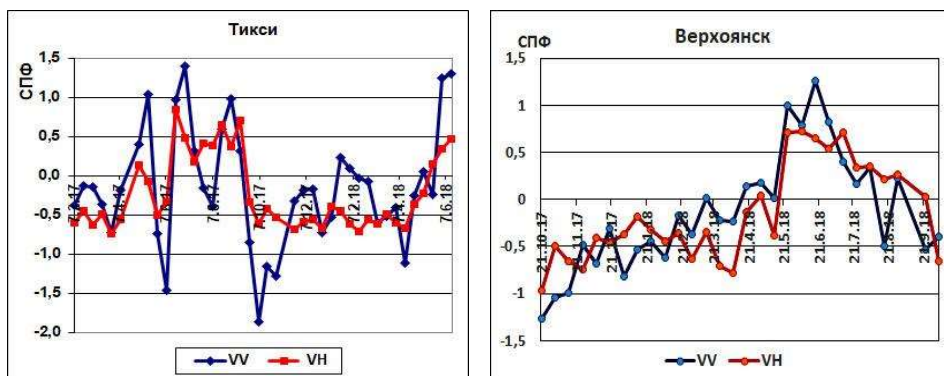


Рис. 6. Изменение СПФ для Тикси и Верхоянска.

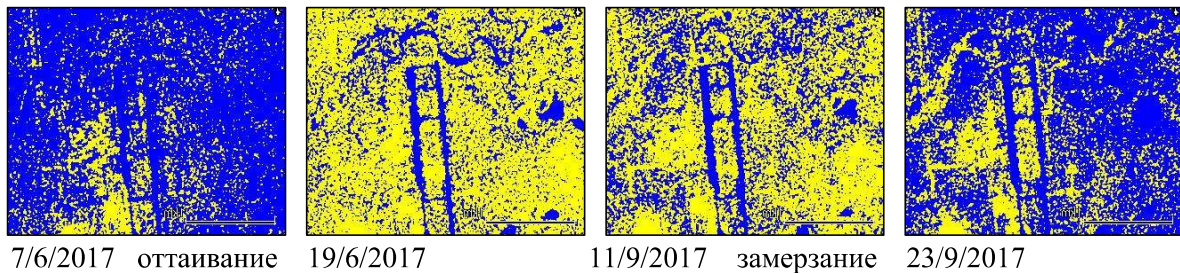


Рис. 7. Тикси, даты съемки 7.06.2017 и 19.06.2017 (период оттаивания почвы), и даты съемки 11.09.2017 и 23.09.2017 (период замерзания почвы). Синий цвет – значения  $\sigma^0 < \sigma_{порог}^0$

(мерзлая почва), желтый цвет – значения  $\sigma^0 > \sigma_{порог}^0$  (талая почва).

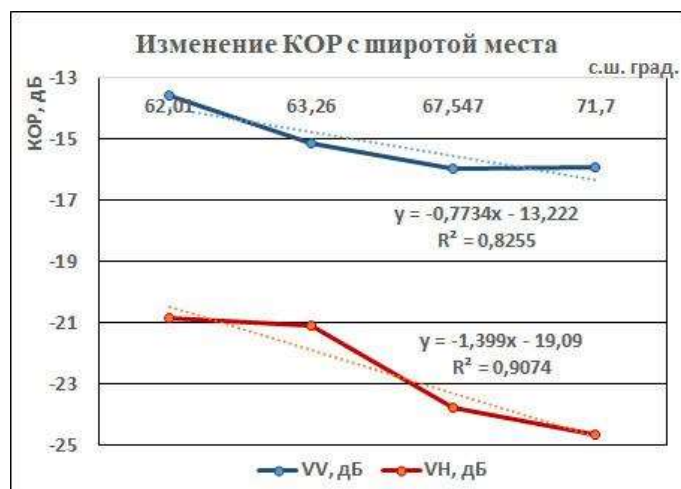


Рис. 8. Изменение КОР VV и VH поляризаций с широтой места.

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 поляризаций 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.

**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: 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.