

АНАЛИЗ РАДАРНЫХ ДАННЫХ SENTINEL 1 ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ТАЛЫХ И МЕРЗЛЫХ ПОЧВ В РАЙОНЕ АНАДЫРЯ (ЧУКОТКА) И БЕЛОЙ ГОРЫ (ЯКУТИЯ)

Родионова Н.В.

ФИРЭ им. В.В. Котельникова РАН, Фрязино

E-mail: rnv@ire.rssi.ru

ВВЕДЕНИЕ

Дистанционное зондирование предлагает перспективные методы для мониторинга приповерхностного состояния мерзлых и талых почв в широких географических масштабах (Khalidoun et al., 2008; 2011). Использование радиометров ограничено очень большими территориями из-за низкого пространственного разрешения. В отличие от ИК и микроволновых радиометров РСА (радар с синтезом апертуры) системы могут давать информацию о динамическом состоянии почвы и под снежным покровом (сухой снег) при высоком пространственном разрешении вне зависимости от наличия облачности и времени суток. Сигнал радара преимущественно зависит от диэлектрической проницаемости (ДП) почвы, которая напрямую связана с содержанием воды и льда.

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. В критических зимних условиях большая часть воды в почве замерзает, что приводит к значительному уменьшению среднего значения ДП почвы. Мерзлая вода имеет 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 коэффициента обратного рассеяния (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. Минеральные почвы замерзают быстрее и на большую глубину, нежели органические почвы, из-за их меньшей возможности сохранять воду (Nyberg et al., 2001). Такое же различие существует между песчаными и глинистыми почвами.

На КОР влияет не только влажность почвы, но и шероховатость поверхности и растительный покров.

Целью работы является идентификация талых/мерзлых почв в приповерхностном слое в районах с вечной мерзлотой на основе использования только радарных данных ДЗЗ.

Характеристика районов исследования

Белая Гора

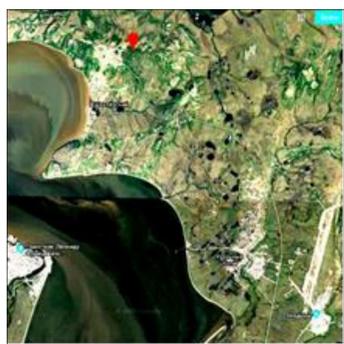


Белая Гора — посёлок городского типа, административный центр Абыйского улуса Республики Саха (Якутия), находится за полярным кругом. Координаты 68.5378470 с.ш., 146.1847690 в.д. Большую часть территории Абыйского улуса (района) занимает Абыйская низменность, расположенная в среднем течении реки Индигирка. Преобладают многолетнемерзлые породы и мерзлотные формы рельефа.

Территория района является полюсом холода Северного полушария. Бывают периоды, когда температура опускается до -70°C .

Рис.1 Спутниковое изображение Белой Горы (стрелка)

Анадырь



Анадырь (Чукотка) расположен на широте 64,73370 с.ш., 177,49680 в.д. на правом берегу близ устья реки Казачка, впадающей в Анадырский залив Берингова моря, в зоне вечной мерзлоты. Центральную часть округа занимает сильно заболоченная Анадырская низменность. Вечная мерзлота залегает повсеместно.

Ландшафт в основном представлен крупнокустарниковой травяно-кочкарной тундрой со злаковыми лужайками. В восточной части преобладают ольховые и ивовые кусты, а в западной - кедровостланиковые. На низменностях распространены глеевые, глеево-болотные и торфянисто-глеевые почвы; по долинам рек и подлиственничным редколесьям — глеево-подзолистые почвы. В восточных районах свирепствуют особенно сильные ветры. Лето очень короткое, дождливое и холодное, в отдельных местах снег даже не успевает растаять, образуя наледи.

Рис.2. Спутниковое изображение Анадыря

Исходные радарные данные Sentinel 1 A

<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-1>

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

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

Таблица 1. Информация об использованных радарных данных Sentinel 1

Название станции	Количество обработанных сеансов съемки S1	Угол обзора	Период съемки	Количество точек в профиле
Белая Гора	30	41°	16.10.14 – 29.10.16	20
Анадырь	25	43°	18.10.14 – 12.11.16	20

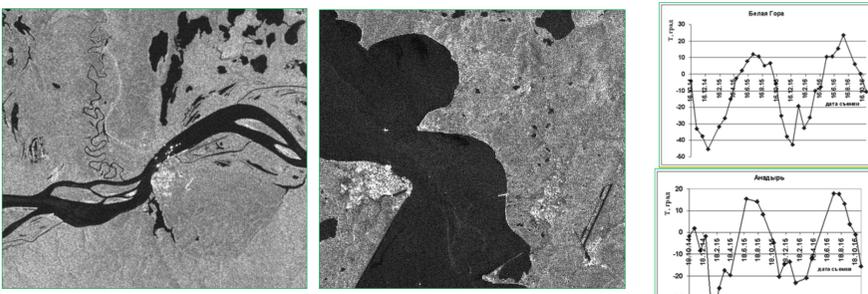


Рис. 3. Радиолокационные изображения Белой Горы за 7/6/2016 и Анадыря за 8/8/2016 и графики температуры воздуха в градусах Цельсия для Белой Горы и Анадыря по данным тр5.ru

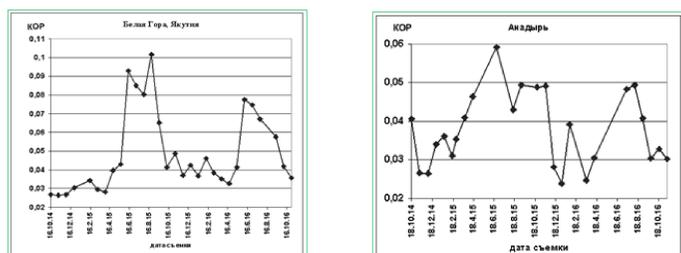


Рис. 4. Коэффициент обратного рассеяния (КОР) в районе метеостанций Белой Горы и Анадыря

Коэффициент корреляции Спирмена между температурой воздуха и КОР для Анадыря равен 0,36 ($p=0,04$, $N=25$, где N – количество сеансов съемки), и для Белой Горы 0,69 ($p=1*10^{-5}$, $N=30$).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТОЯНИЯ МЕРЗЛОЙ/ТАЛОЙ ПОЧВЫ ПО РАДАРНЫМ ДАННЫМ

А. Определение состояния МП по многовременным радарным данным

Глубина проникновения э/м волны в почву определяется по формуле $\delta p = \frac{\lambda \cdot \sqrt{\epsilon'}}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\epsilon''}}$, 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 $2.85 \leq \delta p \leq 6.38$ см.

Метод идентификации талого и мерзлого состояния почвы основывается на перепаде КОР на 3-5 дБ при переходе к состоянию замерзания или оттаивания (Khalidoun et al., 2008; 2011).

Используя временной ряд S1, определим даты замерзания/оттаивания МП по значительным перепадам КОР и далее стабильно низким/высоким значениям σ^0 .

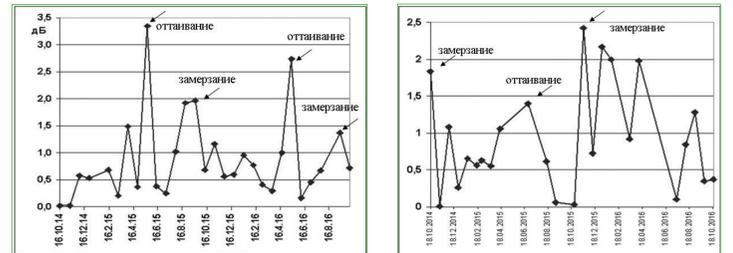


Рис. 5. Разность значений $|\sigma^0|$ в дБ для соседних дат радарной съемки Белой Горы и Анадыря

Таблица 2. Скачок значений $|\sigma^0|$ при замерзании/оттаивании верхнего слоя почвы

	$\Delta\sigma^0$ (дБ) при оттаивании почвы		$\Delta\sigma^0$ (дБ) при замерзании почвы		
	2015	2016	2014	2015	2016
Белая Гора	3,35	2,74		1,97	1,37
Анадырь			1,8	2,4	

Оценка изменений ДП почвы, соответствующих полученным перепадам КОР (Dubois et al., 1995)

$$|\epsilon_1' - \epsilon_2'| = \left| \lg \frac{\sigma_1^{VV}}{\sigma_2^{VV}} \right| / (0,046 * \tan \theta) \quad (1)$$

Таблица 3. Скачок значений ДП при замерзании/оттаивании верхнего слоя почвы

	$\Delta\epsilon$ при оттаивании почвы		$\Delta\epsilon$ при замерзании почвы		
	2015	2016	2014	2015	2016
Белая Гора	8,3	6,8		4,9	3,4
Анадырь			4,3	5,6	

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

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

где $\sigma_{\text{лето}}^0$ и $\sigma_{\text{зима}}^0$ – средние значения КОР летом и зимой, $\sigma^0(t)$ – 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°C . Сл., приповерхностный слой почвы можно классифицировать как замерзший, если значение СПФ, измеренное радаром, становится отрицательным. На рис. 6 показан график СПФ для Белой Горы.

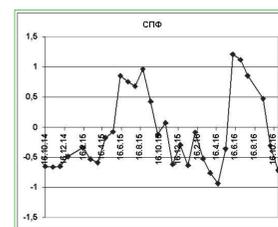


Рис. 6. Изменение СПФ для Белой Горы

По формуле (2) получается, что пересечение значения СПФ=0 происходит для одного и того же значения σ^0 , но для разного времени t , т.е. значение $\sigma^0(t)$ одно и то же, как для момента замерзания, так и оттаивания приповерхностного слоя почвы. Назовем это значение через $\sigma_{\text{порог}}^0$. Для Белой Горы $\sigma_{\text{порог}}^0$ значения следующие: 2014-2015 гг.: $\sigma_{\text{порог}}^0 = -13,4$ дБ, 2015-2016 гг.: $\sigma_{\text{порог}}^0 = -13,2$ дБ.

Используя значения $\sigma_{\text{порог}}^0$, можно построить локальные карты мест талой/мерзлой почвы в окрестности рассматриваемого района исследования.

На рис. 7 показано радарное изображение района вблизи Белой Горы за 20.05.2015, где белым прямоугольником выделен участок, размером порядка $4*4$ км, для которого определялась замерзшая и оттаявшая почва по $\sigma_{\text{порог}}^0$, а также приведены изображения этого участка после фильтрации спеклов за 20.05.2015 и 13.6.2015 (период оттаивания почвы) и для дат 17.09.2015 и 11.10.2015 (замерзание почвы) с порогом $\sigma_{\text{порог}}^0 = -13,4$ дБ. Синий цвет – значения $\sigma^0 < \sigma_{\text{порог}}^0$ (мерзлая почва), желтый цвет – $\sigma^0 > \sigma_{\text{порог}}^0$ (таялая почва).

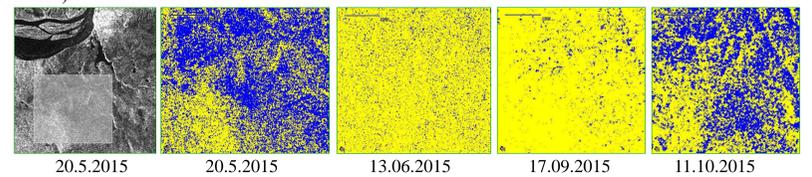


Рис. 7. Белая Гора, 20.05.2015 и 13.6.2015 (период оттаивания почвы), 17.09.2015 и 11.10.2015 (период замерзания почвы).

В. Определение состояния МП по текстурным признакам

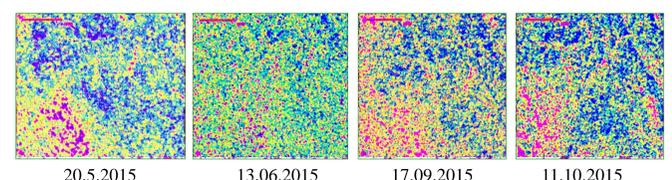


Рис. 8. Текстурные изображения после фильтрации спеклов в RGB кодировке: красный цвет – контраст, зеленый – энтропия, синий – обратный момент (Haralick, 1979)

Сравнивая рис. 7 и 8, видим, что именно 'обратный момент' указывает на области с мерзлой почвой.

Заключение

Три способа идентификации талых/мерзлых почв в приповерхностном слое с использованием только радарных данных ДЗЗ позволил: 1) определить временной промежуток начала процесса замерзания/оттаивания верхнего слоя почвы по максимальным скачкам значений КОР; 2) определить пороговое значение КОР, при котором температура в верхнем слое почвы проходит через нулевое значение, 3) используя пороговое значение $\sigma_{\text{порог}}^0$ построить локальные карты талых/мерзлых почв на исследуемых территориях.

Литература

- Dubois P.C., van Zyl J.J., Engman T. Measuring soil moisture with imaging radars// IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 1995. V. 33. № 4. P. 916-926.
- 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. Geosci. Remote Sensing. 1985. V. 23. № 1. P. 25-34.
- Haralick R.M. Statistical and structural approaches to texture// Proc. IEEE. 1979. V. 67. № 5. P. 786-804.
- Khalidoun 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. of IGARSS'2008. Boston Mass. 2008. VIII-382-385.
- Khalidoun 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.
- Mironov V.L., Muzalevsky K.V. Spaceborne radar monitoring of soil freezing/thawing processes in the arctic tundra// Russian Physics Journal. 2013. V. 55. № 8. P. 899-902 (Russian Original № 8, August, 2012).
- Nyberg L., Ståhl M., Mellander P.-E., and Bishop K. H. Soil frost freezing 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.
- Ulaby F.T., Moore R.K., Fung A.K. Microwave remote sensing: active and passive. From Theory to Application, Vol. III. Dedham, MA: Artech House. 1986.
- www.tki.rssi.ru/books/2003bojarsky.pdf