

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

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

© 2019 г. Н. В. Родионова

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Московская обл.*

*E-mail: rnv@ire.rssi.ru, rnv1948123@yandex.ru*

Поступила в редакцию 30.05.2018 г.

В работе рассматривается вопрос о различении талых и мерзлых почв в верхнем 5-см слое в районе метеостанций в Белой Горе (Якутия) с широтой места 68.5° с.ш. и Анадыре (Чукотка) с широтой 64.78° с.ш. по радарным данным Sentinel 1 С-диапазона за период 2014–2016 гг. Определение состояния мерзлой почвы осуществляется тремя способами: 1) по многовременным радарным данным на основе значительного на 3–5 дБ перепада значений коэффициента обратного рассеяния  $\sigma^0$  (КОР) при переходе к состоянию замерзания/оттаивания почвы; 2) по нахождению порогового значения  $\sigma^0_{\text{порог}}$ , при котором температура в верхнем слое почвы опускается ниже 0°C; 3) по текстурным признакам для одноканальных изображений. Построены графики индекса промерзания почвы за период 2012–2018 гг. по архивным данным температуры воздуха для исследуемых территорий с нахождением тренда.

**Ключевые слова:** радарные данные С-диапазона, коэффициент обратного рассеяния, температура воздуха, замерзание/оттаивание почвы

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019129-37>

#### ВВЕДЕНИЕ

Дистанционное зондирование (ДЗ) предлагает перспективные методы для мониторинга поверхностного состояния мерзлых и талых почв в широких географических масштабах (Khalidoune 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. 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 коэффициента обратного рассеяния (КОР) на несколько децибел (Ulaby et al., 1982).

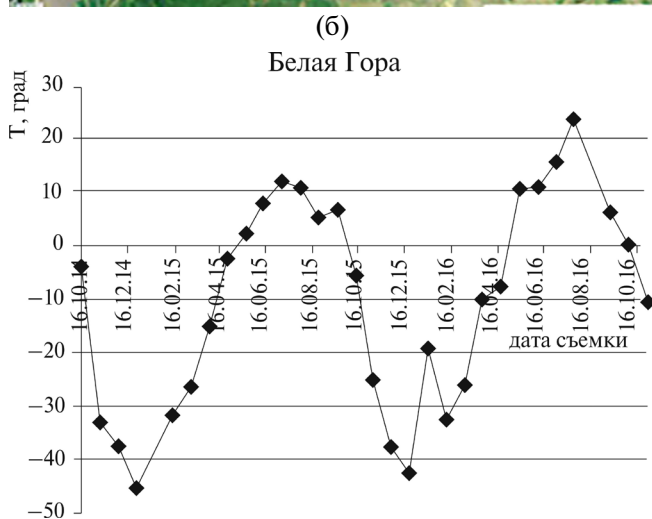
Свойства почвы (структура, текстура, дренаж) влияют на содержание воды в почве и, следовательно, на динамику процесса ее замерзания. Минерализованные почвы замерзают быстрее и на большую глубину, нежели органические почвы, из-за их меньшей возможности сохранять воду (Nyberg et al., 2001).

Не только влажность почвы влияет на КОР, но и шероховатость поверхности и растительный покров.

#### ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

##### *Белая Гора*

Белая Гора — поселок городского типа, административный центр Абыйского улуса Республики Саха (Якутия), находится за полярным кругом.



**Рис. 1.** (а) — спутниковое изображение Белой Горы (стрелка); (б) — температура воздуха в градусах Цельсия для Белой Горы за период 16.10.2014–29.10.2016 по данным gr5.ru.

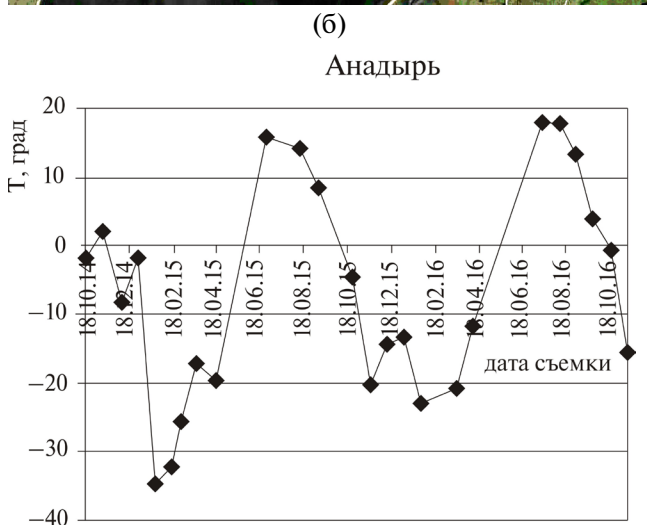
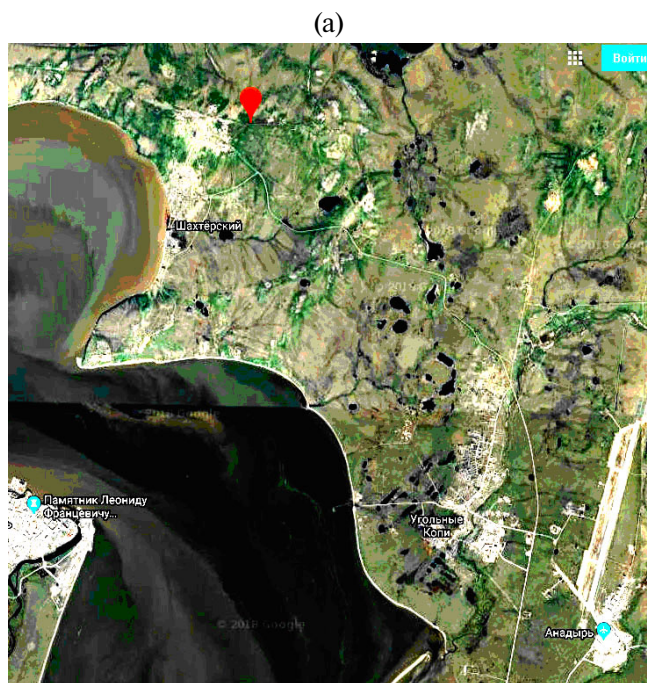
Координаты 68.537847°, 146.184769°. Координаты метеостанции (WMO 24194) 68°32' с.ш. 146°12' в.д.

Большую часть территории Абыйского улуса (района) занимает Абыйская низменность, расположенная в среднем течении р. Индигирка. Преобладают многолетнемерзлые породы и мерзлотные формы рельефа. Низменность сложена различными рода морскими, речными и озерными отложениями с высоким содержанием ископаемого льда в силу преобладания многолетней мерзлоты. Ландшафт в основном представлен лесотундрой, в растительности преобладает даурская лиственница. Климат варьируется от резко континентального на юге до субарктического и арктического на севере, средняя температура января

–40.7°С, июля +14°С. За год выпадает в среднем 218 мм осадков в виде дождя и снега. Зимы суровые, холодные и продолжительные. Территория района является полюсом холода Северного полушария. Бывают периоды, когда температура опускается до –70°С.

На рис. 1 показано спутниковое изображение Белой Горы (стрелка указывает на расположение поселка) и график изменений температуры воздуха по данным метеостанции вблизи поселка (68°32' с.ш., 146°12' в.д.) за период 16.10.2014–29.10.2016, представленные на сайте gr5.ru.

### Анадырь



**Рис. 2.** (а) - Анадырь, нахождение метеостанции отмечено красным цветом; (б) - температура воздуха в градусах Цельсия за период 18.10.2014–12.11.2016.

Анадырь (Чукотка) расположен на широте  $64.7337^{\circ}$  с.ш.,  $177.4968^{\circ}$  в.д. на правом берегу близ устья р. Казачка, впадающей в Анадырский залив Берингова моря, в зоне вечной мерзлоты. Центральную часть округа занимает сильно заболоченная Анадырская низменность — обширная равнина на Чукотке с высотами до 100 м над уровнем моря с множеством озер. Вечная мерзлота залегает повсеместно и начинается очень неглубоко от поверхности. Координаты метеостанции (WMO 25563)  $64.78^{\circ}$  с.ш. и  $177.57^{\circ}$  в.д.

Ландшафт в основном представлен крупнокустарниковой травяно-кочкарной (бугристой) 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, снежная пурга продолжается порой много дней подряд. Лето очень короткое, дождливое и холодное, в отдельных местах снег даже не успевает растаять, образуя наледи.

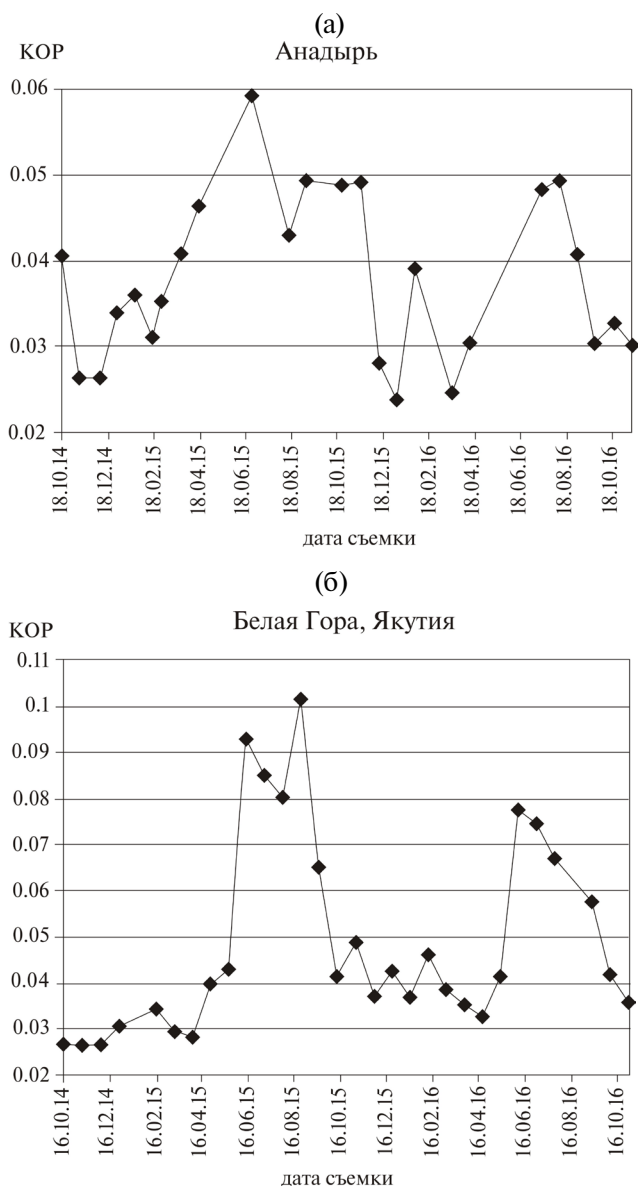
На рис. 2а дано спутниковое изображение Анадыря, где в верхней части красным цветом показано положение метеостанции, а на рис. 2б представлен график изменений температуры воздуха по данным метеостанции за период 18.10.2014–12.11.2016, находящихся в архиве на сайте [gp5.ru](http://gp5.ru).

### ИСХОДНЫЕ РАДАРНЫЕ ДАННЫЕ 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 10 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.

В таблице приведены данные для каждой станции по числу обработанных сеансов съемки, углу обзора,



**Рис. 3.** Коэффициент обратного рассеяния в районе метеостанций Анадыря с координатами  $64.78^{\circ}$  с.ш.,  $177.57^{\circ}$  в.д. за период 18.10.2014–12.11.2016 и Белой Горы с координатами  $68.505^{\circ}$  с.ш.,  $146.155^{\circ}$  в.д. за период 16.10.2014–29.10.2016.

временному периоду съемки и количеству точек при усреднении КОР по профилю.

Изменение КОР для района Белой Горы с координатами  $68.505^{\circ}$  с.ш. и  $146.155^{\circ}$  в.д. (метеостанция) и Анадыря с координатами  $64.78^{\circ}$  с.ш. и  $177.57^{\circ}$  в.д.

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

Название станции	Число обработанных сеансов съемки S1	Угол обзора, град	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



(метеостанция) за указанный в таблице период съемки показано на рис. 3.

Коэффициент корреляции Спирмена между температурой воздуха и КОР для Анадыря равен  $\rho_S = 0.36$  ( $p = 0.04$ ,  $N = 25$ , где  $N$  — количество сеансов съемки), и для Белой Горы  $\rho_S = 0.69$  ( $p = 1 \cdot 10^{-5}$ ,  $N = 30$ ).

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТОЯНИЯ МЕРЗЛОЙ ПОЧВЫ ПО РАДАРНЫМ ДАННЫМ

### Определение состояния МП по многовременным радарным данным

Глубина проникновения э/м волны в почву определяется по формуле

$$\delta p \approx \frac{\lambda \cdot \sqrt{\epsilon'}}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon''},$$

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 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.

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

Используя временной ряд S1, определим даты замерзания/оттаивания МП по значительным перепадам КОР и далее стабильно низким/высоким значениям  $\sigma^0$ . На рис. 4 показан график разности значений по абсолютной величине  $\sigma^0$  в дБ для соседних дат съемки Белой Горы, где по максимумам  $|\sigma^0|$  определяем даты замерзания и оттаивания почвы. Первый максимум равен  $\max = 3.35$  дБ  $= |\sigma^0_{20.5.2015} - \sigma^0_{13.6.2015}|$  [дБ] — даты оттаивания почвы. Второй максимум определяет даты замерзания почвы,  $\max = 1.97$  дБ  $= |\sigma^0_{17.9.2015} - \sigma^0_{11.10.2015}|$ . Оба

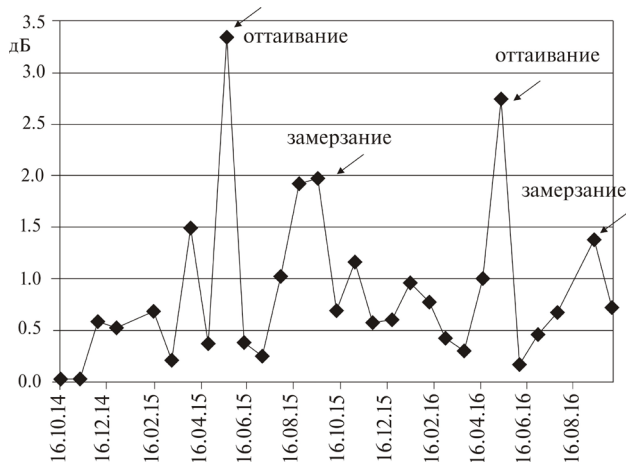


Рис. 4. Разность значений  $|\sigma^0|$  в дБ для соседних дат радарной съемки Белой Горы.

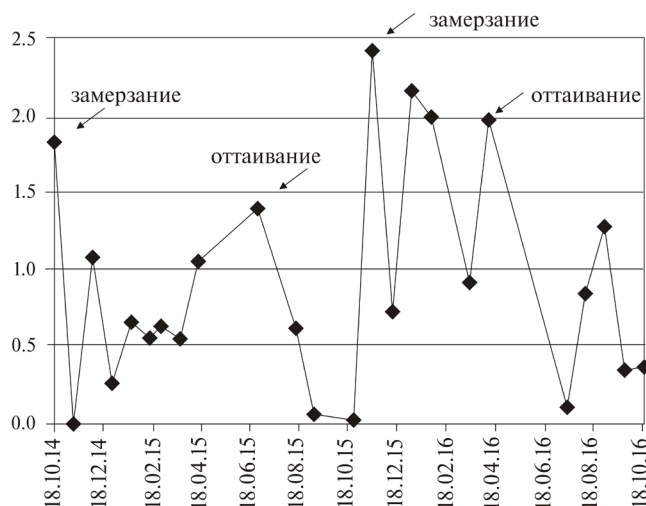


Рис. 5. Разность значений  $|\sigma^0|$  в дБ для соседних дат радарной съемки Анадыря.

максимума для 2015 г. Для 2016 г. первый максимум равен  $\max = 2.74$  дБ  $= |\sigma^0_{14.5.2016} - \sigma^0_{7.6.2016}|$  — это даты оттаивания почвы. Второй максимум определяет даты замерзания почвы,  $\max = 1.37$  дБ  $= |\sigma^0_{11.9.2016} - \sigma^0_{5.10.2016}|$ . Следует отметить, что точность дистанционного определения времени замерзания и оттаивания почвы определяется частотой съемки исследуемой территории.

На рис. 5 показан аналогичный рис. 4 график для Анадыря. Что касается определения периода оттаивания почвы, то из-за отсутствия съемки под определенным углом для Анадыря, а именно — не было съемки с 17.04.2015 по 26.06.2015 и с 11.04.2016 по 14.07.2016, указанные на графике точки весьма отдаленно отвечают за даты оттаивания почвы. Период замерзания почвы для 2014 г.,  $\max = 1.8$  дБ  $= |\sigma^0_{18.10.2014} - \sigma^0_{11.11.2014}|$ , и для 2015 г.,  $\max = 2.4$  дБ  $= |\sigma^0_{18.11.2015} - \sigma^0_{12.12.2015}|$ .

Следует отметить, что чем более резкий по перепадам температур климат, тем надежнее по радарным данным можно определить даты оттаивания/замерзания почвы в приповерхностном слое толщиной 5 см.

### 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, приведен 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.



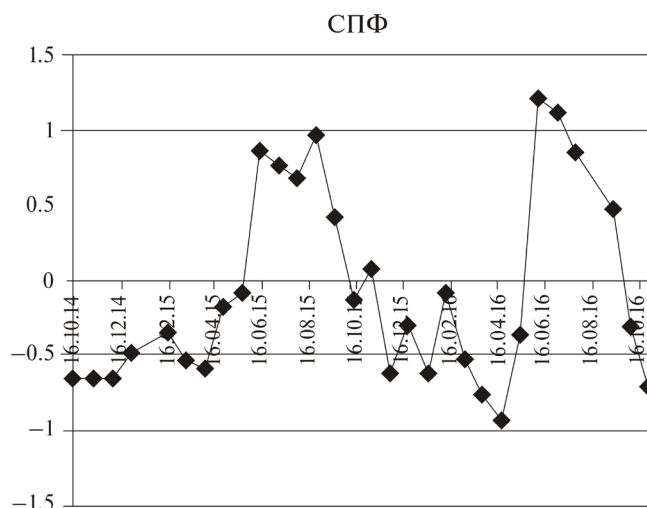


Рис. 6. Изменение СПФ для Белой Горы.

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

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

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  $0^\circ\text{C}$ . Следовательно, 5-см верхний слой почвы можно классифицировать как замерзший, если значение СПФ, измеренное радаром, становится отрицательным. На рис. 6 показан график СПФ для Белой Горы.

Для Белой Горы  $\sigma_{\text{лето}}^0$  и  $\sigma_{\text{зима}}^0$  определяем по радарным данным между точками замерзания/оттаивания почвы. 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  $\sigma^0$  одно и то же как для точки замерзания, так и для точки оттаивания почвы на глубине 5 см. И это значение можно определить для каждого места, зная средние значения  $\sigma_{\text{лето}}^0$  и  $\sigma_{\text{зима}}^0$ . Назовем это значение  $\sigma^0$  через  $\sigma_{\text{порог}}^0$ . Для Белой Горы значения  $\sigma_{\text{порог}}^0$  следующие:

2014–2015 гг.:  $\sigma_{\text{лето}}^0 = -11.6$  дБ,  $\sigma_{\text{зима}}^0 = -15.2$  дБ,  $\sigma_{\text{порог}}^0 = -13.4$  дБ,

2015–2016 гг.:  $\sigma_{\text{лето}}^0 = -12.3$  дБ,  $\sigma_{\text{зима}}^0 = -14.1$  дБ,  $\sigma_{\text{порог}}^0 = -13.2$  дБ.

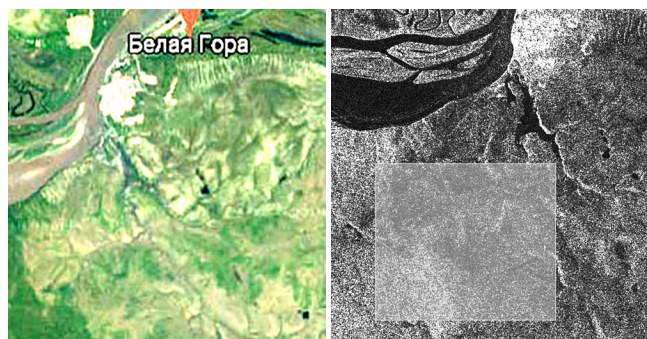


Рис. 7. Радарное изображение места вблизи Белой Горы (дата съемки 20.05.2015), где белый прямоугольник выделяет участок с определением замерзшей/оттаявшей почвы по  $\sigma_{\text{порог}}^0$  (справа), и google map данного участка (слева).

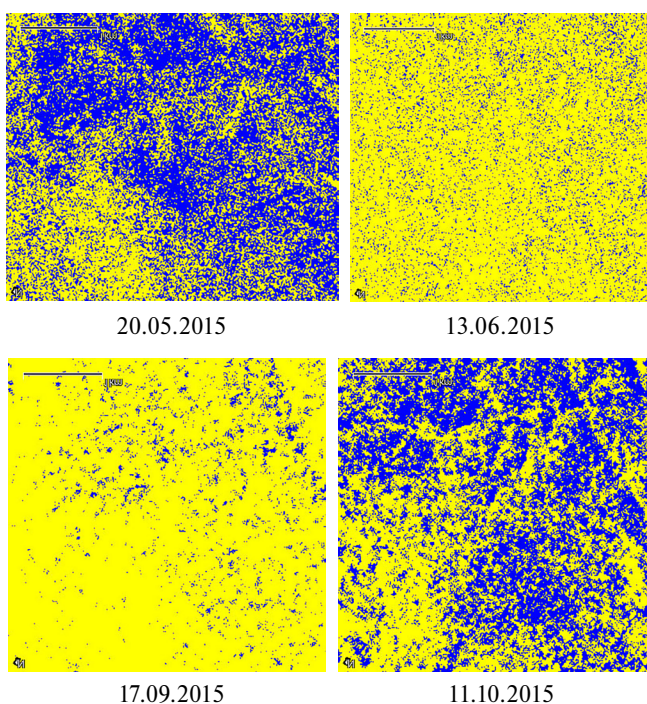


Рис. 8. Белая Гора, 20.05.2015 и 13.6.2015 (период оттаивания почвы), 17.09.2015 и 11.10.2015 (период замерзания почвы). Синий цвет — значения  $\sigma^0 < \sigma_{\text{порог}}^0 = 13.4$  дБ (замерзшая почва), желтый цвет — значения  $\sigma^0 > \sigma_{\text{порог}}^0$  (оттаявшая почва).

Используя значения  $\sigma_{\text{порог}}^0$ , можно построить локальные карты мест замерзания/оттаивания 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  $4 \times 4$  км, для которого определялась замерзшая и оттаявшая почва по  $\sigma_{\text{порог}}^0$ . На рис. 8 приведены изображения после фильтрации спеклов за 20.05.2015 и 13.6.2015 (период оттаивания почвы) и для дат 17.09.2015

и 11.10.2015 (период замерзания почвы) с порогом  $\sigma_{\text{порог}}^0 = -13.4$  дБ. Синий цвет — значения  $\sigma^0 < \sigma_{\text{порог}}^0$  (замерзшая почва), желтый цвет — значения  $\sigma^0 > \sigma_{\text{порог}}^0$  (оттаявшая почва). Отмечаем значительное уменьшение площади замёрзшей почвы на изображении за 13.06.2015 при оттаивании и, соответственно, увеличение площади замёрзшей почвы на изображении за 11.10.2015 при замерзании.

#### *Определение состояния МП по текстурным признакам*

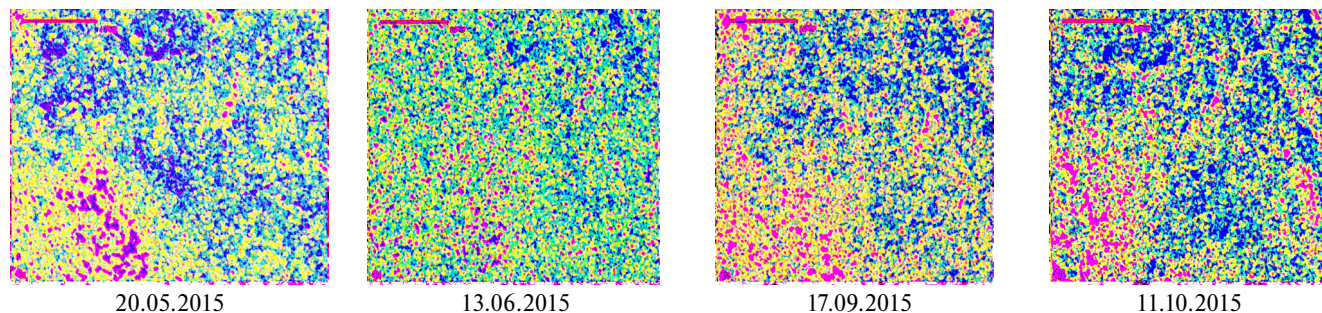
Радарная съемка S1 территории Анадыря и Белой Горы осуществлялась только с одной поляризацией VV. Но и для одноканальных изображений есть возможность выделить разные типы поверхности, используя текстурные признаки Харалика (Haralick, 1979). В работе (Родионова, 2007) показана такая возможность на примере использования трех текстурных признаков — «контраста», «энтропии» и «обратного момента» — для изображений SIR-C/X-SAR. 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 замёрзшей/оттаявшей почвы использовать значение текстурного признака обратный момент, значение которого больше для замёрзшей почвы. На рис. 9 показаны текстурные изображения после фильтрации спеклов для тех же дат, что и на рис. 8, в следующей RGB-кодировке: красный цвет — контраст, зеленый — энтропия, синий — обратный момент. Сравнивая рис. 8 и 9, видим, что именно обратный момент показывает области с мерзлой почвой.

#### **ИНДЕКС ПРОМЕРЗАНИЯ/ОТТАИВАНИЯ ПОЧВЫ**

Температура воздуха, как известно (Brown, 1964), коррелирует с температурой почвы и глубиной промерзания почвы. Аккуратные предсказания глубины промерзания почвы являются важным аспектом в различных инженерных проектах. На реальную глубину промерзания влияют механический состав почвы, ее термические свойства, влажность почвы, климатические условия, такие как температура, 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. Следовательно, использование численных или аналитических моделей подразумевает оценку точности при отсутствии необходимых входных данных, которые влияют на надежность результатов.

При наличии всех входных данных результаты таких моделей могут быть достаточно точными. С другой стороны, 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, модели Berggren и Chisholm и Phang. В работе (Rajaei, Baladi, 2015) рассмотрена точность предсказания глубины промерзания почвы для этих трех аналитических и полуэмпирических моделей. Ввиду того, что 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 ее промерзания для двух



**Рис. 9.** Текстурные изображения после фильтрации спеклов в RGB кодировке: красный цвет — контраст, зеленый — энтропия, синий — обратный момент.



типов почв: глинистой и песчаной, на основе измеренных значений глубин промерзания в 2010–2011 гг. 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

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

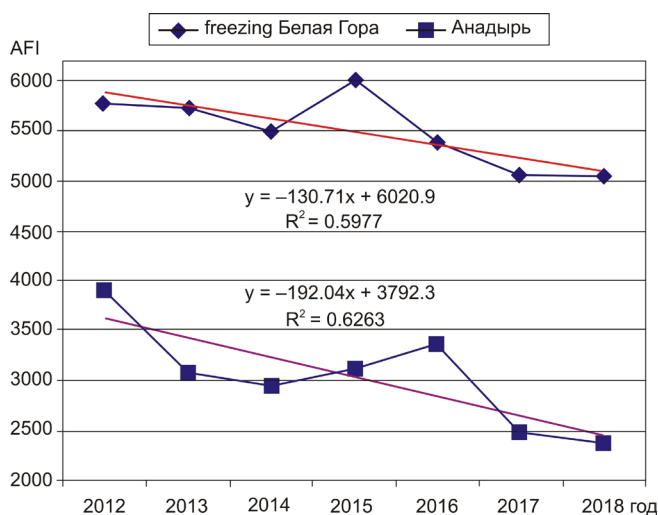
с коэффициентом детерминации 0.91 (число измерений 129);

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

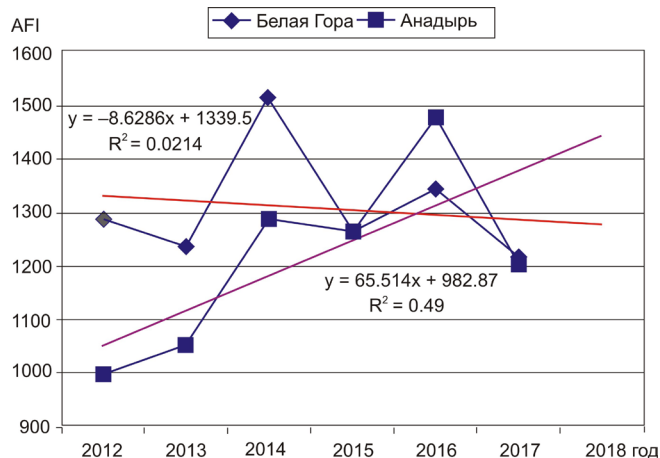
где  $h$  — глубина промерзания почвы в см,  $T_{\min}^{\text{воздух}}$  и  $T_{\max}^{\text{воздух}}$  — минимальная и максимальная температура воздуха за сутки, CFI — суммарный индекс промерзания (the cumulative freezing index).

Авторы (Rajaei, Baladi, 2015) 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 определяется по разнице максимального и минимального значений CFI за год. Максимум CFI соответствует точке перехода от положительных к отрицательным температурам, минимум CFI соответствует переходу от отрицательных температур к положительным.



**Рис. 10.** Значение AFI по годам с отрицательным трендом, характеризующее максимальную глубину промерзания почвы.



**Рис. 11.** Значение AFI по годам, характеризующее максимальную глубину оттаивания почвы. Отрицательный тренд для Белой Горы и положительный для Анадыря.

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. 10 приведены значения AFI, характеризующие максимальную глубину промерзания почвы, для Белой Горы и Анадыря за 2012–2018 гг. с линиями тренда. В обоих случаях тренд отрицательный с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0.59$  и  $R^2 = 0.62$  соответственно, что свидетельствует об уменьшении максимальной глубины промерзания почвы для исследуемых территорий.

На рис. 11 приведены значения AFI, характеризующие максимальную глубину оттаивания почвы, для Анадыря и Белой Горы за 2012–2017 гг. с линиями тренда. Для Белой Горы тренд отрицательный, с очень малым значением  $R^2$ , а для Анадыря — положительный, с  $R^2 = 0.49$ .

Таким образом, однозначный вывод о тренде для максимальной глубины оттаивания почвы в исследуемых районах за 2012–2017 годы сделать нельзя.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассматривается вопрос о различии талых и мерзлых почв в верхнем 5-см слое для наземных станций в Белой Горе (Якутия) и Анадыре (Чукотка) по радарным данным Sentinel 1 C-диапазона за период 2014–2016 гг. Определение состояния мерзлой почвы осуществляется тремя способами: 1) по многовременным радарным данным на основе значительного на 3–5 дБ перепада значений коэффициента обратного рассеяния  $\sigma^0$  при



переходе к состоянию замерзания/оттаивания почвы. Для Белой Горы максимальное значение перепада  $\sigma^0$  составило 3.35 дБ при оттаивании и 1.97 дБ при замерзании почвы и для Анадыря соответственно, 2.74 дБ и 1.37 дБ; 2) по нахождению порогового значения  $\sigma^0_{\text{порог}}$ , при котором температура в верхнем слое почвы опускается ниже  $0^\circ\text{C}$ . Найденные значения  $\sigma^0_{\text{порог}}$  позволили построить локальные карты мерзлой и талой почвы для участка вблизи Белой Горы; 3) Из-за наличия радарной съемки на исследуемые территории только на VV-поляризации для проверки правильности определения мест мерзлой/талой почвы использовались текстурные признаки Харалика для сегментации одноканальных изображений. В результате показано, что ТП обратный момент идентифицирует области с мерзлой почвой.

Построены графики AFI, характеризующие максимальную глубину промерзания/оттаивания почвы, за период 2012–2018 гг. по архивным данным температуры воздуха для исследуемых территорий. Показано наличие отрицательного тренда AFI как для Белой Горы, так и для Анадыря с коэффициентом детерминации соответственно 0.59 и 0.62. Для оттаивания почвы однозначного ответа нет, поскольку для Белой Горы получен слабый отрицательный тренд, а для Анадыря — положительный тренд.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Родионова Н.В. Классификация поверхности на поляризметрических РЛИ с использованием текстуры и разложения по механизмам рассеяния// Иссл. Земли из космоса. 2007. № 34. С. 8–14.
- Brown W.G. Difficulties associated with predicting depth of freeze and thaw// Canadian geotechn. J. 1964. V. 1. № 4. P. 215–226.
- 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. V. 23. № 1. P. 25–34.
- Haralick R.M. Statistical and structural approaches to texture// Proc. IEEE. 1979. V. 67. № 5. P. 786–804.
- 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. of IGARSS'2008. Boston Mass. 2008. V.III-382–385.
- Khaldoune J., Van Bochove E., Bernier M., Nolin M.C. Mapping agricultural frozen soil on the watershed scale using remote sensing data// Appl. Environ. Soil Sci. 2011. Article ID193237. P. 1–16. DOI: 10.1155/2011/193237
- Kim Y., Kimball J.S., McDonald K.C., Glassy J. Developing a global data record of daily landscape freeze/thaw status using satellite passive microwave remote sensing//IEEE Trans. GRS. 2011.V. 49. №3. P. 949–960.
- Mironov V.L., Muzalevsky K.V. Spaceborne radar monitoring of soil freezing/thawing processes in the arctic tundra// Russian Phys. J. 2013. V. 55. № 8. P. 899–902 (Russian Orig. № . 8. August 2012).
- Nyberg L., Sr`ahli M., Mellander P.-E., Bishop K.H. Soil frost effects on soil water and runoff dynamics along a boreal forest transect: 1. Field investigations// Hydrol. Proc. 2002. V.15. P. 909–926. DOI: 10.1002/hyp.256
- Rajaei P., Baladi G.Y. Frost depth — a general prediction model// 94<sup>st</sup> Transp. Res. Board Annual Meeting, Washington D.C. January 2015. P. 1–15.
- Rautiainen K., Parkkinen T., Lemmetyinen J., Schwank M., Wiesmann A., Ikonen J., Derksen Ch., Davydov S., Davydova A., Boike J., Langer M., Drusch M., Pulliainen J. SMOS prototype algorithm for detecting autumn soil freezing// Rem. Sens. Environ. 2016. V. 180. P. 346–360.
- Ulaby F.T., Moore R.K., Fung A.K. Microwave Remote Sensing: Active and Passive: V. 1 // Fundam. and Radiom. 1982. Artech House, Dedham, Mass, USA.
- www.iki.rssi.ru/books/2003boyarsky.pdf

## Analysis of Sentinel 1 Radar Data to Identify Freezing/Thawing Soils in the Area of Anadyr (Chukotka) and Belaya Gora (Yakutia)

N. V. Rodionova

*Institute of Radioengineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, Fryazino, Moscow Region*

*E-mail: rnv@ire.rssi.ru, rnv1948123@yandex.ru*

The paper deals with the distinction between thawed and frozen soils in the upper 5 cm layer for two stations in Russia: Belaya Gora (Yakutia)  $68.5^\circ\text{N}$  and Anadyr (Chukotka)  $64.78^\circ\text{N}$  — by using Sentinel 1 C-band radar data for the period of 2014–2016 years. 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  $\sigma^0$  in the transition of freezing/thawing soil state, 2) by finding the threshold value of  $\sigma^0$  at which the temperature in the upper soil layer falls below  $0^\circ\text{C}$ , 3) by texture features for one- channel images. The graphs of the AFI (air freezing index) for the period of 2012–2018 with trends are constructed based on the archive data of air temperature for the study areas.

**Keywords:** C-band radar data, backscattering coefficient, air temperature, soil freezing/thawing

## REFERENCES

- Rodionova N.V.* Klassifikatsiya poverkhnosti na polyarimetricheskikh RLI s ispol'zovaniyem tekstury i razlozheniya po mekhanizmam rasseyaniya [Classification of the surface on polarimetric radar with use of texture and expansion by scattering mechanisms] // Issl. Zemli iz kosmosa. 2007. № 34. S. 8–14. (In Russian).
- Brown W.G.* Difficulties associated with predicting depth of freeze and thaw// Canadian geotechn. J. 1964. V. 1. № 4. P. 215–226. *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. V. 23. № 1. P. 25–34.
- Haralick R.M.* Statistical and structural approaches to texture// Proc. IEEE. 1979. V. 67. № 5. P. 786–804.
- 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. of IGARSS'2008. Boston Mass. 2008. V.III-382–385.
- Khaldoune J., Van Bochove E., Bernier M., Nolin M.C.* Mapping agricultural frozen soil on the watershed scale using remote sensing data// Appl. Environ. Soil Sci. 2011. Article ID193237. P. 1–16, doi: 10.1155/2011/193237
- Kim Y., Kimball J.S., McDonald K.C., Glassy J.* Developing a global data record of daily landscape freeze/thaw status using satellite passive microwave remote sensing//IEEE Trans. GRS. 2011.V. 49. №3. P. 949-960.
- Mironov V.L., Muzalevsky K.V.* Spaceborne radar monitoring of soil freezing/thawing processes in the arctic tundra// Russian Phys. J. 2013. V. 55. № 8. P. 899–902 (Russian Orig. № . 8. August 2012).
- Nyberg L., Stähli M., Mellander P.-E., Bishop K.H.* Soil frost effects on soil water and runoff dynamics along a boreal forest transect: 1. Field investigations// Hydrol. Proc. 2002. V.15. P. 909–926. DOI: 10.1002/hyp.256
- Rajaei P., Baladi G.Y.* Frost depth — a general prediction model// 94<sup>th</sup> Transp. Res. Board Annual Meeting, Washington D.C. January 2015. P. 1–15.
- Rautiainen K., Parkkinen T., Lemmetyinen J., Schwank M., Wiesmann A., Ikonen J., Derksen Ch., Davydov S., Davydova A., Boike J., Langer M., Drusch M., Pulliainen J.* SMOS prototype algorithm for detecting autumn soil freezing// Rem. Sens. Environ. 2016. V.180. P. 346–360.
- Ulaby F.T., Moore R.K., Fung A.K.* Microwave Remote Sensing: Active and Passive: V. 1 // Fundam. and Radiom. 1982. Artech House, Dedham, Mass, USA.  
www.iki.rssi.ru/books/2003boyarsky.pdf