



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, г. Фрязино*



**XVII Всероссийская Открытая конференция «Современные проблемы ДЗЗ из космоса»
(11-15 ноября 2019, ИКИ, Москва)**



ВВЕДЕНИЕ



Обширность масштаба распространения вечной мерзлоты на территории России и ограниченная доступность территорий делает чрезвычайно актуальной задачей дистанционный мониторинг состояния мерзлых почв.

Дистанционное зондирование предлагает перспективные методы для мониторинга приповерхностного состояния мерзлых/талых почв в широких географических масштабах (Khalidoune et al., 2008; 2011). 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).

Исследование мерзлых почв, как правило, связано с наземными измерениями глубины протаивания. 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 (Duguay et al., 2005). 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 (Duguay et al., 2005).

Исследования состояния талых/мерзлых почв с помощью РСА (радар с синтезом апертуры) проводятся с начала 90-х годов прошлого века с появления данных ERS-1 С-диапазона [4], [5]. Исследования продолжались с миссией ENVISAT ASAR [6], ALOS PALSAR L-диапазон [7], RADARSAT-2 С-диапазон [8], Sentinel 1 С-диапазон [9-11] и другими.



ВВЕДЕНИЕ



На постоянной основе дистанционный радарный мониторинг приповерхностного слоя мерзлых почв Арктических регионов России стал доступен с запуском аппаратов Sentinel 1, осуществляющих радиолокационную съемку в С-диапазоне длин волн с пространственным разрешением 10 м и периодом в 12 дней.

Однако, возможности радарной съемки ограничены из-за проникновения волны в мерзлую почву лишь на несколько см. Активные сенсоры различают мерзлую почву (МП) через изменение содержания жидкой воды в почве. Эти изменения связаны со значениями диэлектрической проницаемости (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 КОР на несколько децибел (Ulaby et al., 1982).

Помимо основного влияния на коэффициент обратного рассеяния (КОР) ДП почвы, на КОР влияют шероховатость поверхности и растительный покров.

Целью данной работы является определение состояния талых/мерзлых почв на территории Якутии, самого холодного обитаемого региона в Северном полушарии Земли, на основе многовременных радарных данных Sentinel 1.



РАЙОНЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

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

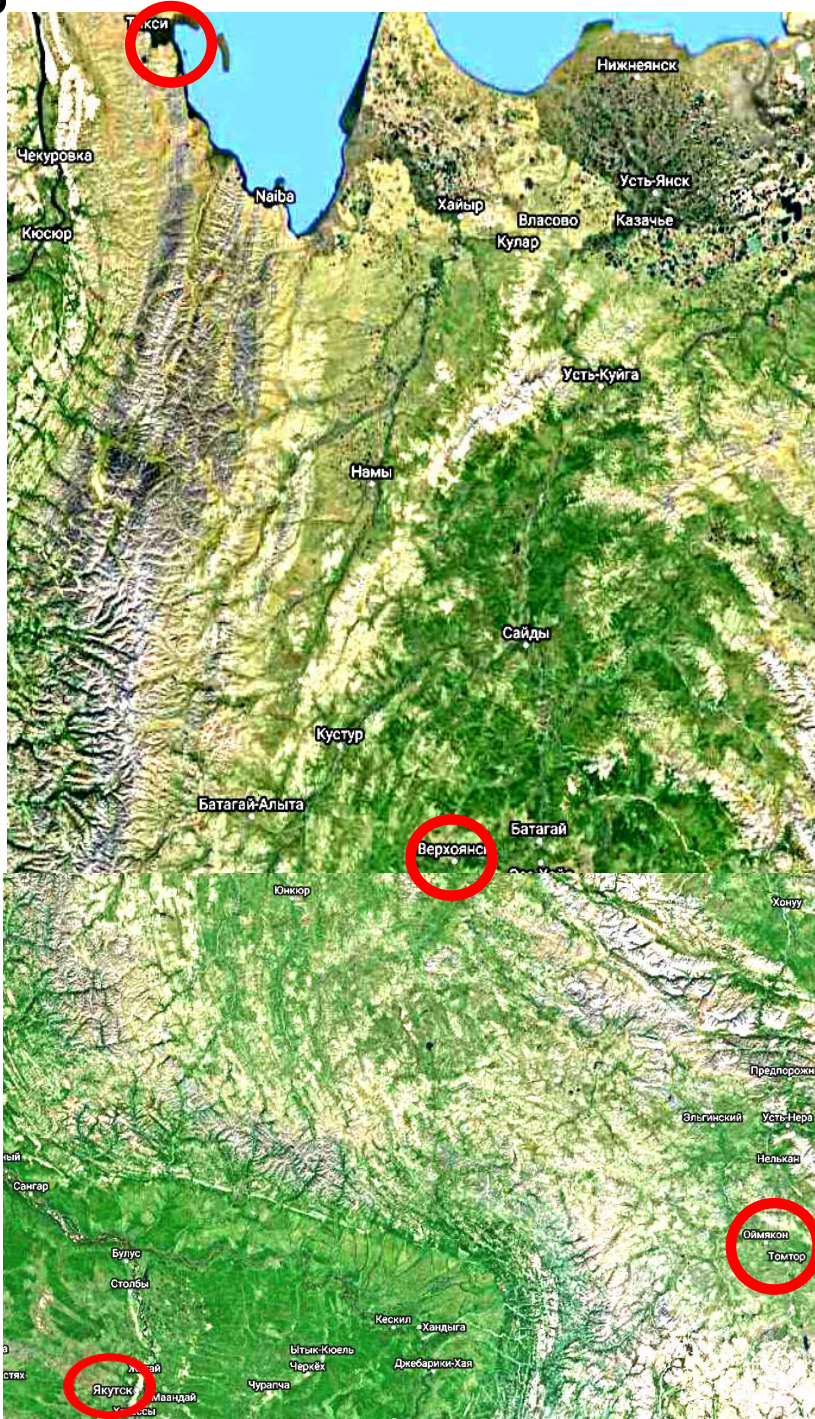
Тикси $71^{\circ}41.85'$ с.ш., $128^{\circ} 54.18'$ в.д.

Верхоянск 67.5468° с.ш. и 133.427° в.д.

Томтор 63.26382° с.ш., 143.210462° в.д.
(Оймякон)

Якутск 62.013306° с.ш., 129.656991° в.д.

Рис. 1. Google map районов исследования.





ТИКСИ

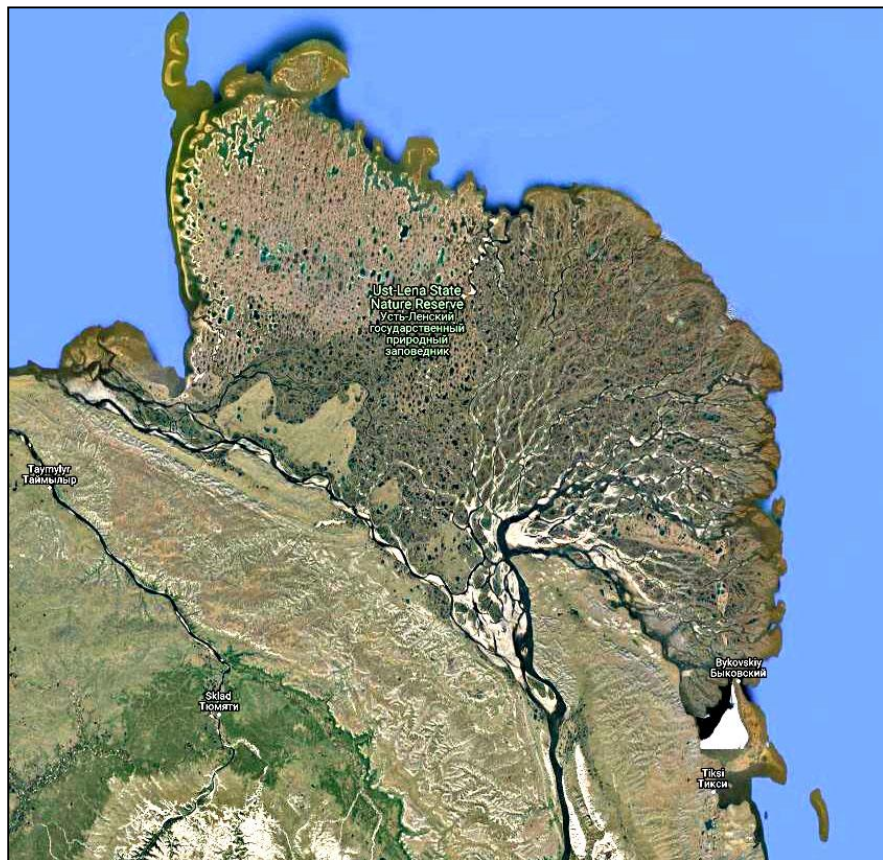
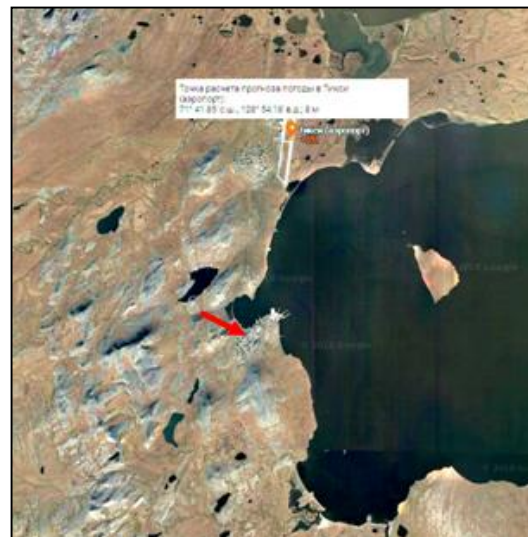


Рис. 2. Спутниковые изображения района расположения поселка Тикси



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. 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, составлявшую в 2006 году -27.6°C . Район исследований относится к зоне многолетней мерзлоты.



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 $-67,7$ С была зарегистрирована здесь в феврале 1892 года. Верхоянск часто называют [Полюсом холода северного полушария](#). На рисунке 3 показаны спутниковое изображение Верхоянска

Рис. 3. Спутниковое изображение Верхоянска.



Кратер Батагайка



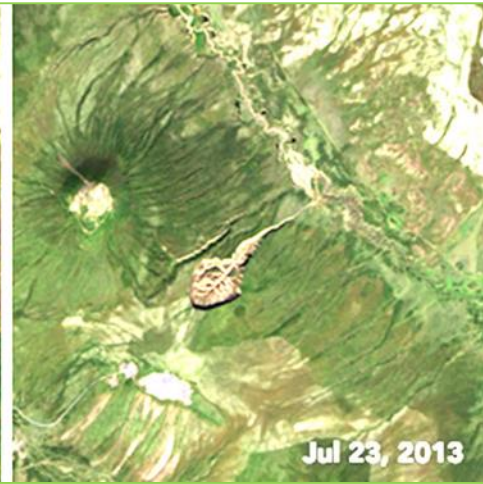
<https://nat-geo.ru/science/paleontology/batagayskiy-krater-proval-v-proshloe/>

Батагайский термокарстовый кратер, или Батагайка — термокарстовая котловина в многолетней мерзлоте у подножия горы Киргилях в 7 км от посёлка Батагай (административный центр Верхоянского улуса Якутии). Она появилась в 1960 годах после того, как к юго-западу от посёлка Батагай вырубил участок тайги. Глубина кратера составляет до 100 метров, ширина — 800 метров, длина — более километра. В Батагайском термокарстовом кратере учёными из Северо-Восточного федерального университета и японского университета Киндай в 2009 году были найдены хорошо сохранившийся трёхмесячный жеребёнок возрастом 4400 лет и останки детёныша бизона. Также в Батагайке нашли кости мамонтов и оленей.

Расстояние от Верхоянска до Батагай по прямой 54 км.



Кратер Батагайка



Кратер увеличивается примерно на 15 метров в год. С 2011 года здесь ведут исследования сотрудники Научно-исследовательского института прикладной экологии севера. Спустившись на дно расселины, специалисты взяли пробы почв и вмёрзших в них останков растений и живых организмов.

Судя по комментариям Мертона, самый древний из вскрывшихся геологических пластов образовался 200 000 лет назад. Его состав свидетельствует о том, что тысячи лет назад климат в окрестностях Верхоянска был таким же, как и теперь – и даже теплее. Доказательство тому – обломки древних деревьев, прекрасно сохранившиеся в вечной мерзлоте.



Томтор (Оймякон)

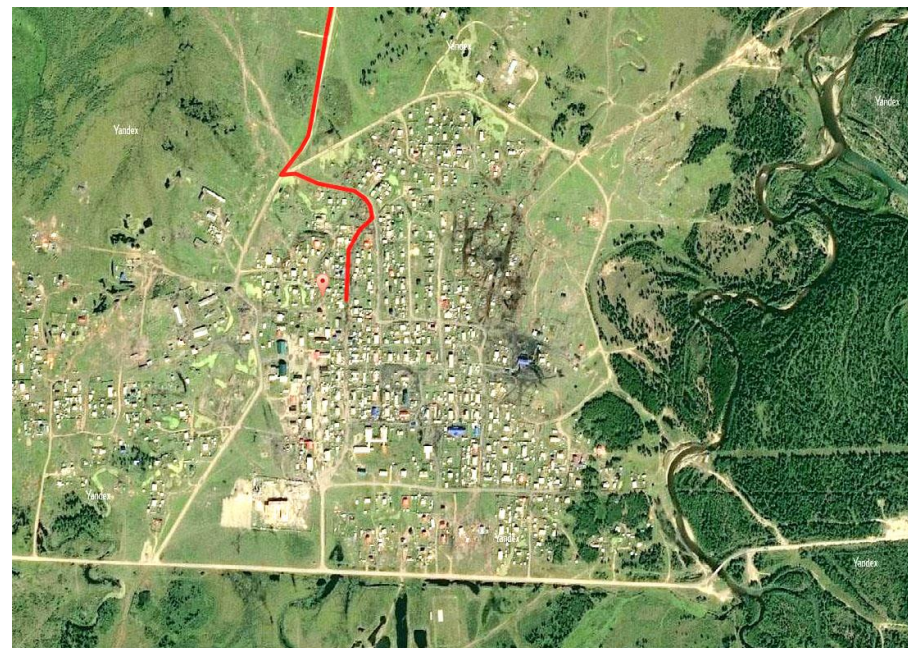
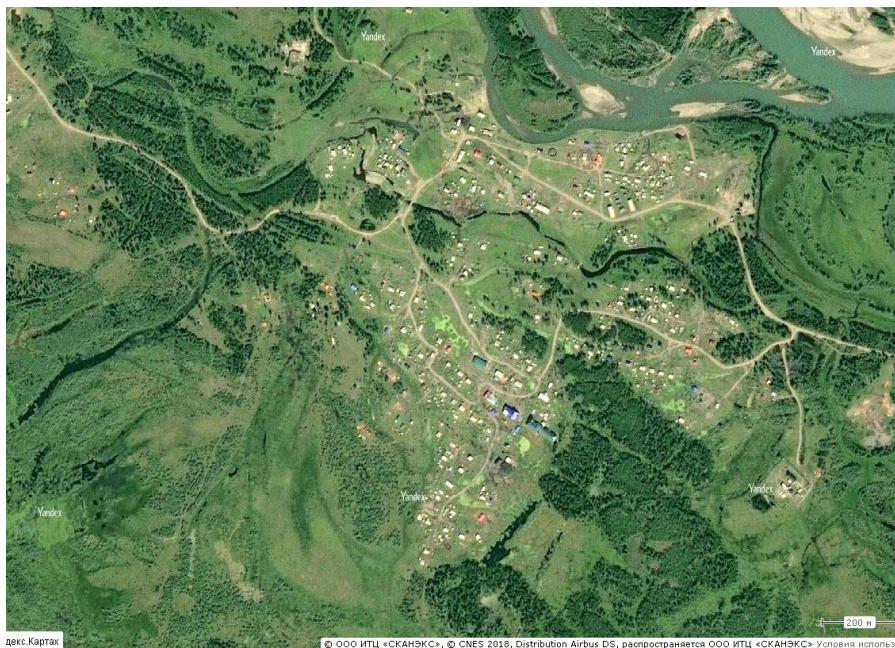
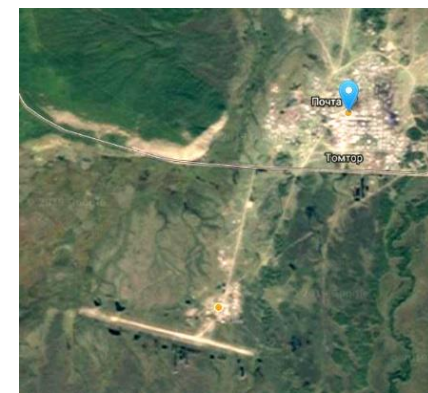


Рис. 4. Спутниковые изображения Оймякона, Томтора и аэропорта Томтора.

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.





Якутск



Рис.5. Спутниковое изображение Якутска.

Якутск-столица республики Саха. Самый крупный из городов, расположенных в зоне вечной мерзлоты. Число жителей несколько больше 300 тыс. человек. 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°C . 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°C ($102,8^{\circ}\text{C}$). Здесь располагается CALM площадка R42 с координатами $62.013306^{\circ}\text{с.ш.}$, $129.656991^{\circ}\text{в.д.}$ [8]. Ландшафт – луг, почва сухая – супесь, песок. Глубина протаивания составляет 185 – 215 см.



ИСХОДНЫЕ РАДАРНЫЕ ДАННЫЕ SENTINEL 1B



Рис. 6. Европейский спутник ДЗЗ Sentinel 1

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 10 м.

Работа с изображениями S1 осуществлялась с помощью программы S1Toolbox и позднее SNAP (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-1>).

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.

Название станции	Число обработанных сеансов съемки S1	Угол обзора	Период съемки	Количество точек в профиле
Тикси	39	40,5°	19.2.2017 – 14.6.2018	~20
Верхоянск	29	43°	21.10.2017-4.10.2018	~15
Томтор	25	37°	10.10.2017-25.7.2018	~15
Якутск	39	35,3°	21.2.2017-16.6.2018	~15



КОЭФФИЦИЕНТ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ (КОР)



Тикси

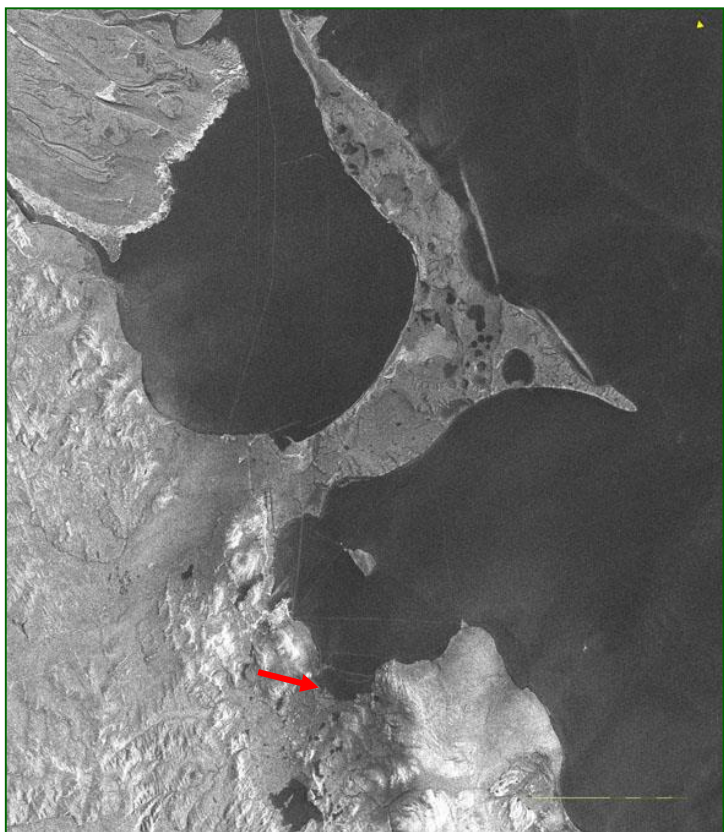
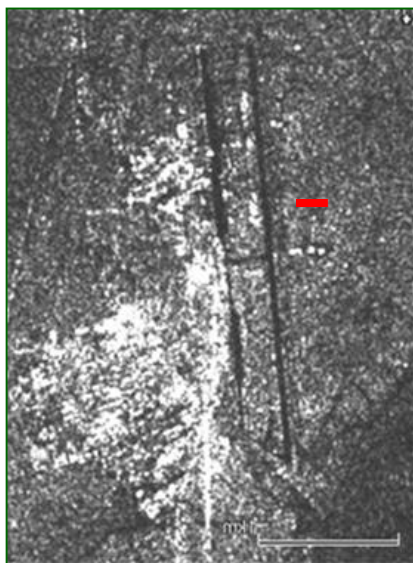
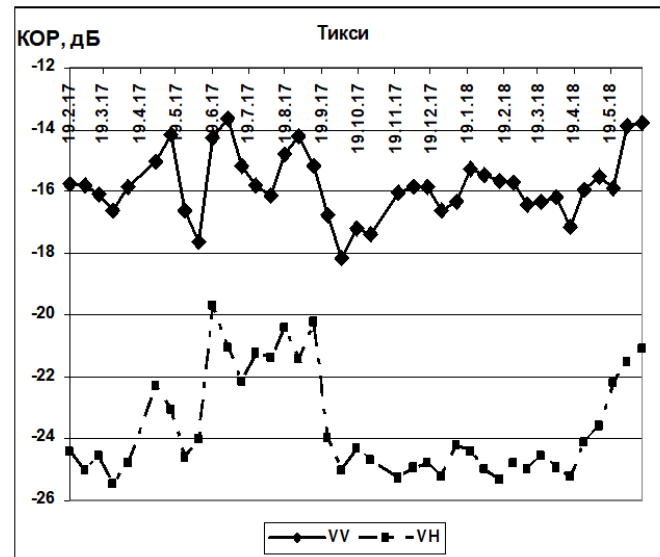


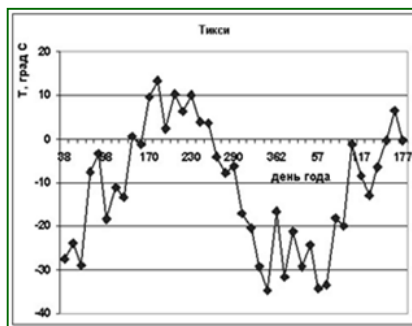
Рис. 7. РЛИ VV поляризации за 7.6.2017; бухта Тикси указана стрелкой



(а)



(в)



(б)

Рис. 8. Профиль (красная линия) для вычисления КОР вблизи аэропорта Тикси (а); температура воздуха в град Цельсия по данным gr5.ru (б); среднее значение КОР по профилю за период 19.2.2017-14.6.2018 (в)



КОЭФФИЦИЕНТ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ (КОР)

Верхоянск



Рис. 9. РЛИ дата съемки 12.7.2018 VV поляризация с профилем (координаты средней точки профиля 67.5468° с.ш., 133.427° в.д. вблизи о. Силях) для определения среднего значения КОР.



Рис. 10. Графики изменения КОР и температуры воздуха для тестового профиля за период 21.10.2017 – 4.10.2018.



Томтор (Оймякон)

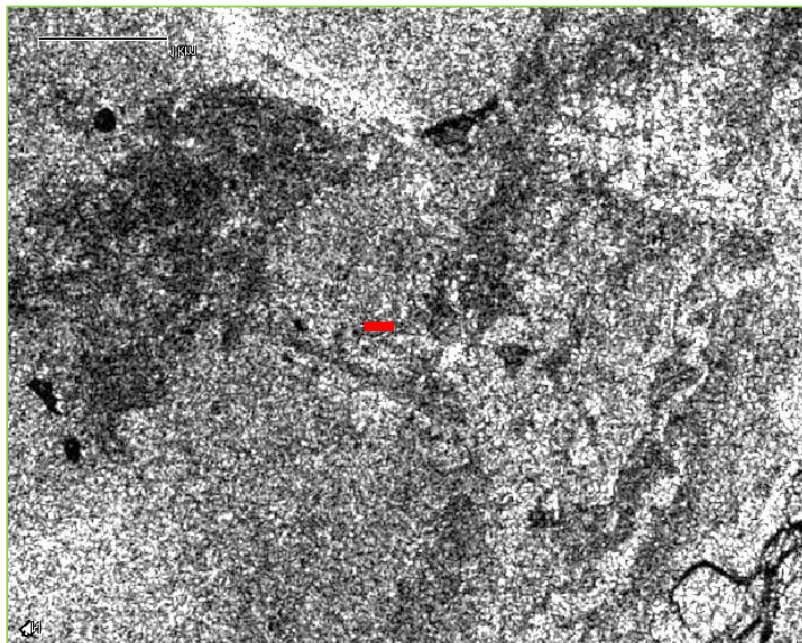


Рис. 11. РЛИ дата съемки 25.7.2018 VV поляризация с профилем (координаты средней точки профиля 63.2454° с.ш., 143.1754° в.д.) для определения среднего значения КОР.

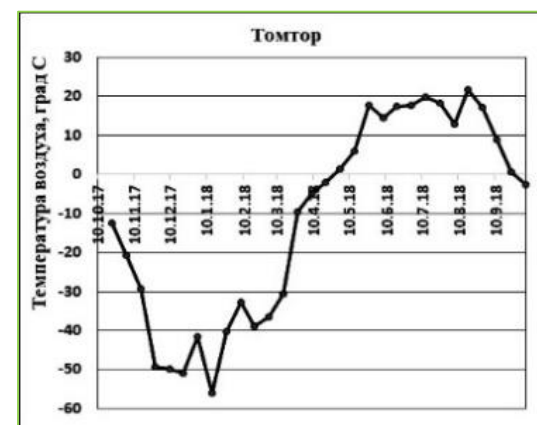
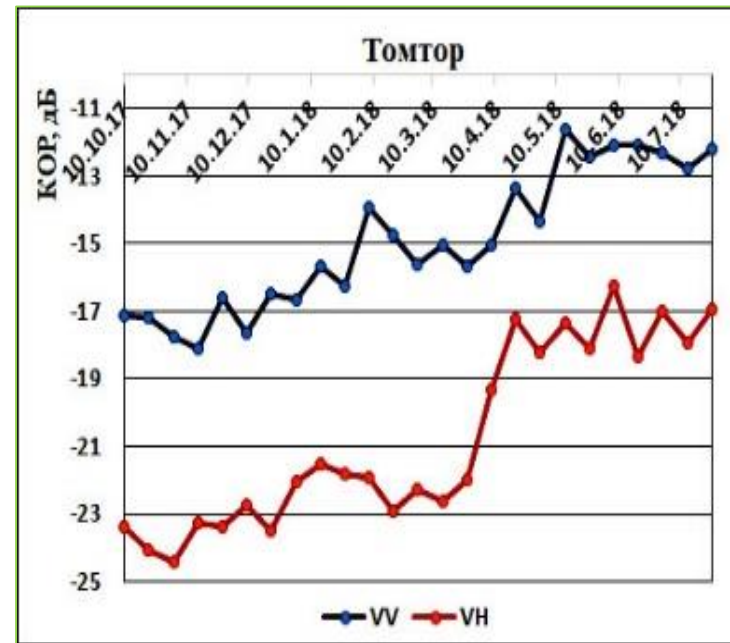


Рис. 12. Графики изменения КОР и температуры воздуха для тестового профиля за период 10.10.2017 – 25.7.2018 .

КОЭФФИЦИЕНТ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ (КОР) И ЕГО СВЯЗЬ С ТЕМПЕРАТУРОЙ ВОЗДУХА



Якутск

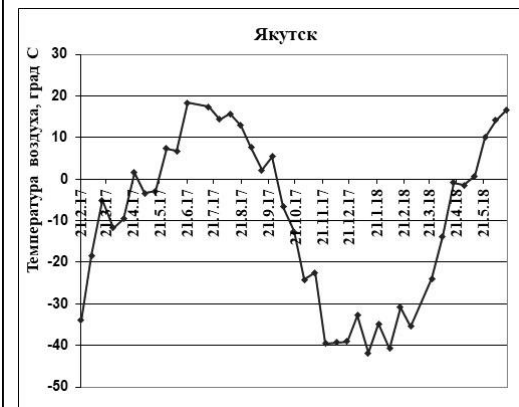
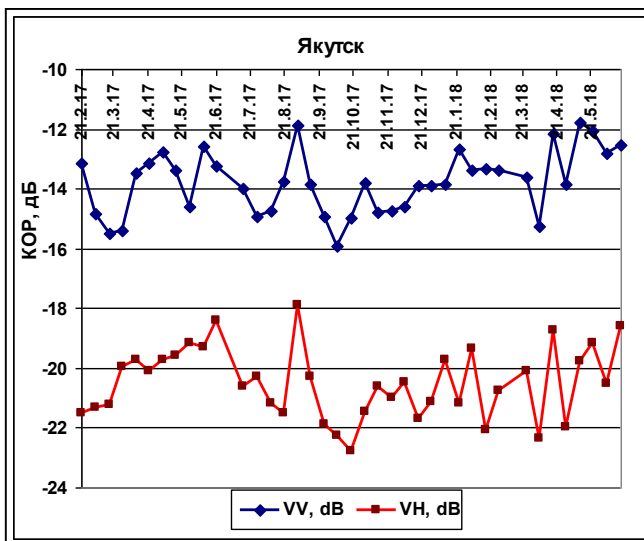


Рис. 14. График изменения температуры воздуха в Якутске за период 21.2.2017-16.6.2018 и изменение КОР в дБ VV и VH поляризаций за этот же период времени.

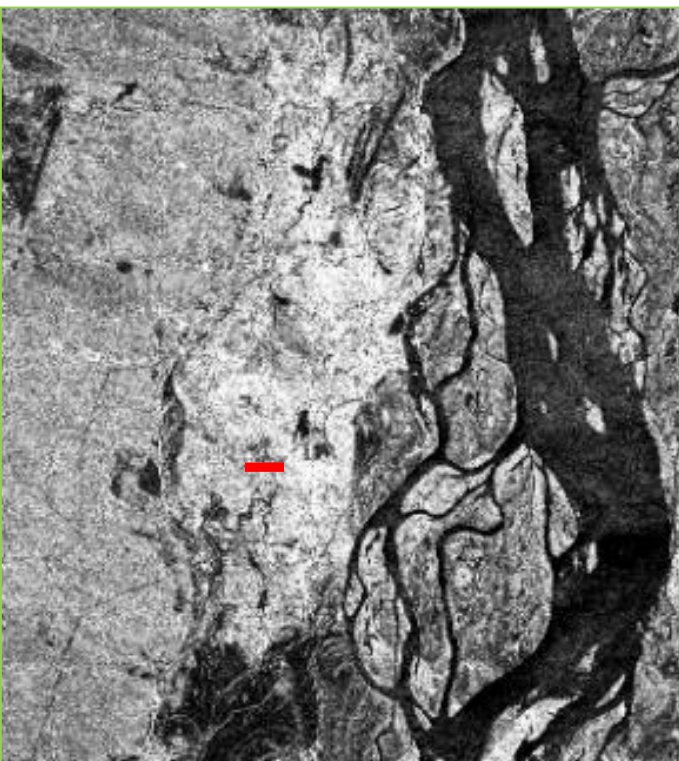


Рис. 13. Якутск, РЛИ VV поляризации сеанс 16.6.2018.

На VH поляризации корреляция выше или близка к корреляции на VV поляризации.

Коэффициент корреляции Спирмена между T° возд. и КОР	VV	VH
Тикси	$\rho_S = 0,21$ (p=0,1)	$\rho_S = 0,69$ (p<0,01)
Верхоянск	$\rho_S = 0,68$ (p<0,1)	$\rho_S = 0,67$ (p<0,01)
Томтор (Оймякон)	$\rho_S = 0,77$ (p<0,01)	$\rho_S = 0,76$ (p<0,01)
Якутск	$\rho_S = 0,19$ (p=0,11)	$\rho_S = 0,34$ (p=0,017)



МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТОЯНИЯ МЕРЗЛОЙ/ТАЛОЙ ПОЧВЫ ПО РАДАРНЫМ ДАННЫМ



А. Определение состояния мерзлой/талой почвы по многовременным радарным данным

Глубина проникновения э/м волны в почву определяется по формуле $\delta p \approx \frac{\lambda \cdot \sqrt{\varepsilon''}}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon''}$, где λ - длина э/м волны, $\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$ - диэлектрическая проницаемость почвы (ДП). Для Sentinel 1 длина волны равна 6 см. В случае мерзлой почвы с $\varepsilon' \sim 5.5$ и $0.1 \leq \varepsilon'' \leq 0.5$ получаем глубину проникновения э/м волны в почву $4,4 \leq \delta p \leq 22,2$ см.

Идентификация талого/мерзлого состояния почвы предполагает знание изменений во влажности и ДП почвы, на которые в первую очередь реагирует сигнал радара. Наиболее известной является полу-эмпирическая диэлектрическая смешанная модель Dobson et al. (Dobson et al., 1985), обобщенная на отрицательные температуры Zhang et al. (Zhang et al., 2003). В работе (Jagdhuber et al., 2014, (рис. 3)) показано на основе данной модели, что при падении температуры почвы ниже 0° С наблюдается резкое уменьшение значений ДП почвы для всех типов почв и всех частот от С- до Ku – диапазона, что и отслеживается по значениям КОР. Как показали работы (Khaldoune et al., 2008; 2011), 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.

А. Определение состояния МП по многовременным радарным данным



Используя временной ряд S_1 , определим даты начала замерзания/оттаивания МП по значительным перепадам КОР и далее стабильно низким/высоким значениям σ^0 .

Тикси

Верхоянск

Томтор

Якутск

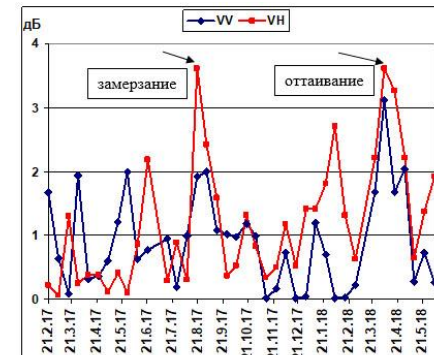
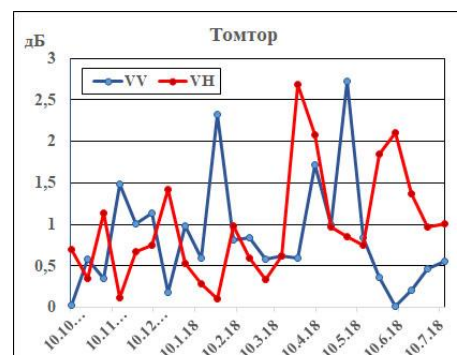
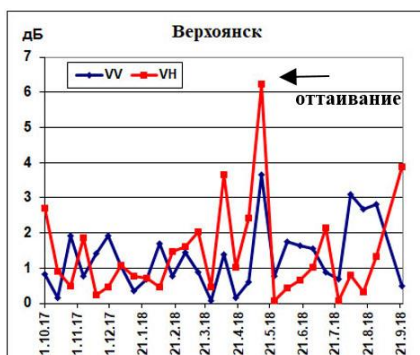
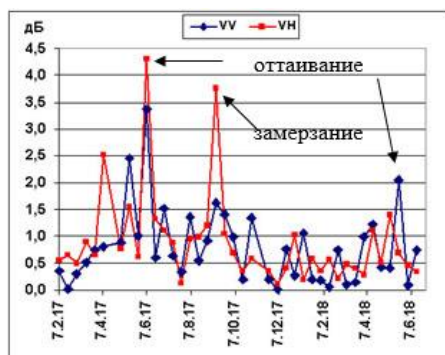


Рис.15. Разность значений $|\sigma^0|$ в дБ для соседних дат радарной съемки в районе исследуемых участков Тикси, Верхоянска, Томтора и Якутска.

По значениям скачков коэффициента обратного рассеяния (КОР) можно оценить изменения значений ДП почвы, используя формулу Dubois et al. [14], которая связывает КОР согласованной поляризации с параметрами почвы (реальной частью ДП почвы и шероховатостью поверхности). На рис. 15 показаны графики разности значений $|\sigma^0|$ по абсолютной величине в дБ для соседних дат радарной съемки тестовых участков Тикси, Верхоянска, Томтора и Якутска, где по максимумам $|\sigma^0|$ определяем даты начала замерзания и оттаивания почвы. Следует обратить внимание, что перепады σ^0 для кросс-поляризации превышают значения перепадов для согласованной поляризации, что свидетельствует о большей чувствительности VH поляризации к мерзлым почвам.

А. Определение состояния МП по многовременным радарным данным



Поляризация	Перепады КОР при оттаивании почвы дБ (2017; 2018)		Перепады КОР при замерзании почвы дБ (2017 г.)	
	VV	VH	VV	VH
Тикси	3.4; 2.0	3.3; 0,7	1.6	3.7
Верхоянск	3.6	6.2		≥ 4
Томтор	2.7	2.6		
Якутск	2.8	3.6	2.8	3.8

Оценка изменений ДП почвы, соответствующих полученным перепадам КОР

Уравнение Dubois et al. 1995 [] для VV поляризации:

$$\sigma_{VV}^0 = 10^{-2.37} \cdot \frac{\cos^3 \theta}{\sin^3 \theta} \times 10^{0.046 \varepsilon' \cdot \tan \theta} \cdot (ks \cdot \sin \theta)^{1.1} \cdot \lambda^{0.7}$$

где ks – нормализованная шероховатость поверхности, ε' – реальная часть диэлектрической проницаемости поверхности, θ – угол обзора, λ – длина волны.

Если пренебречь изменениями ks за 12 дней между соседними датами съемки, то из формулы Dubois et al. получим для перепада значений ε' при оттаивании и замерзании почвы:

$$|\varepsilon'_1 - \varepsilon'_2| = \left| \lg_{10} \frac{\sigma_1^{VV}}{\sigma_2^{VV}} \right| / (0,046 * \tan \theta)$$

где σ_1^{VV} , σ_2^{VV} , ε'_1 , ε'_2 – КОР VV поляризации для соседних сеансов съемки и соответствующие им значения действительной части ДП верхнего слоя почвы. Самые большие перепады отмечены для Верхоянска. Соответствующие скачки ДП почвы составляют при оттаивании порядка 8.5 отн. единиц.



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 предложили уравнение, характеризующее состояние поверхности почвы, аналогом для которого послужило уравнение в работе (Kim et al., 2011) для фактора, связанного с радиояркостной температурой почвы. Авторы (Mironov, Muzalevsky, 2013) характеризуют состояние поверхности почвы через фактор состояния поверхности (СПФ):

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

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 (Mironov, Muzalevsky, 2013) утверждают, что сезонные вариации СПФ сильно коррелируют с сезонными вариациями температуры почвы, принимая отрицательные значения при температуре почвы ниже 0°С. Сл., 5-см верхний слой почвы можно классифицировать как замерзший, если значение СПФ, измеренное радаром, становится отрицательным.

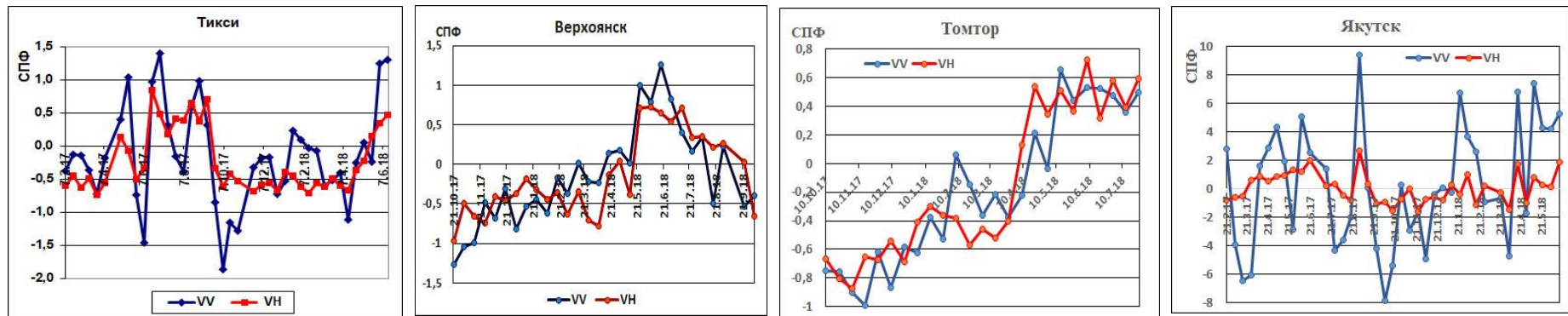


Рис.16 . Изменение СПФ для Тикси, Верхоянска, Томтора и Якутска

По формуле (3) получается, что пересечение значения СПФ=0 происходит для одного и того же значения $\sigma^0(t)$ для разного времени t, т.е. значение одно и то же как для точки замерзания, так и для точки оттаивания верхнего слоя почвы. Назовем это значение через $\sigma_{\text{порог}}^0$.

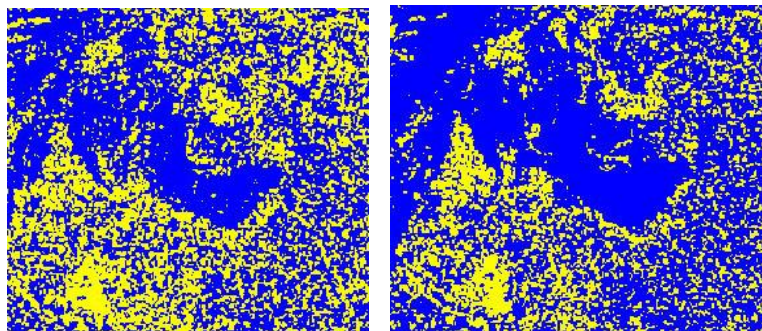
	$\sigma_{\text{порог}}^{\text{VV}}$	$\sigma_{\text{порог}}^{\text{VH}}$
Тикси	-15.6 дБ	-22.8 дБ
Верхоянск	-15.1 дБ	-22.1 дБ
Томтор	-14.2 дБ	-19.9 дБ
Якутск	-13.8 дБ	-20.6 дБ



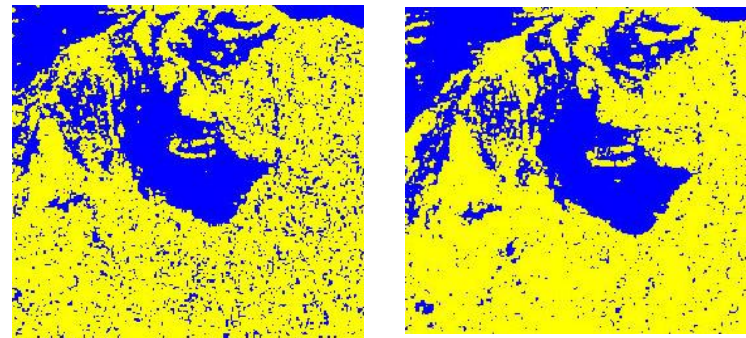
В. Локальные карты талых/мерзлых почв на основе пороговых значений σ^0



Верхоянск



VV 13.5.2018 VH



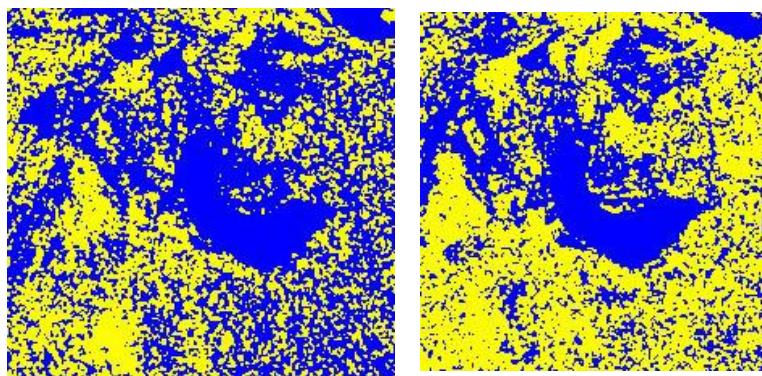
VV 25.5.2018 VH

Оттаивание

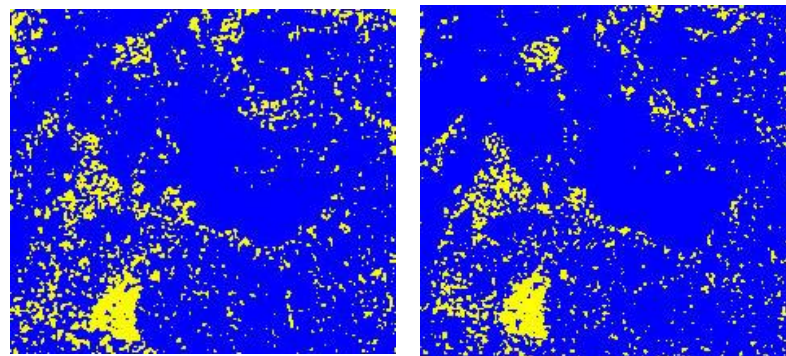
$$\sigma^0 < \sigma_{\text{порог}}^0$$



$$\sigma^0 \geq \sigma_{\text{порог}}^0$$



VV 22.9.2018 VH



VV 4.10.2018 VH

Замерзание

Рис. 17. Локальные карты талых/мерзлых почв



Изменение КОР VV и VH поляризаций с широтой места

Среднее значение КОР, аналогично $\sigma_{порог}^0$, зависит от широты места, уменьшаясь при увеличении широты. На рис. 18 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. Коэффициент детерминации регрессии равен 0.9 для кросс-поляризации и 0.8 для согласованной поляризации.

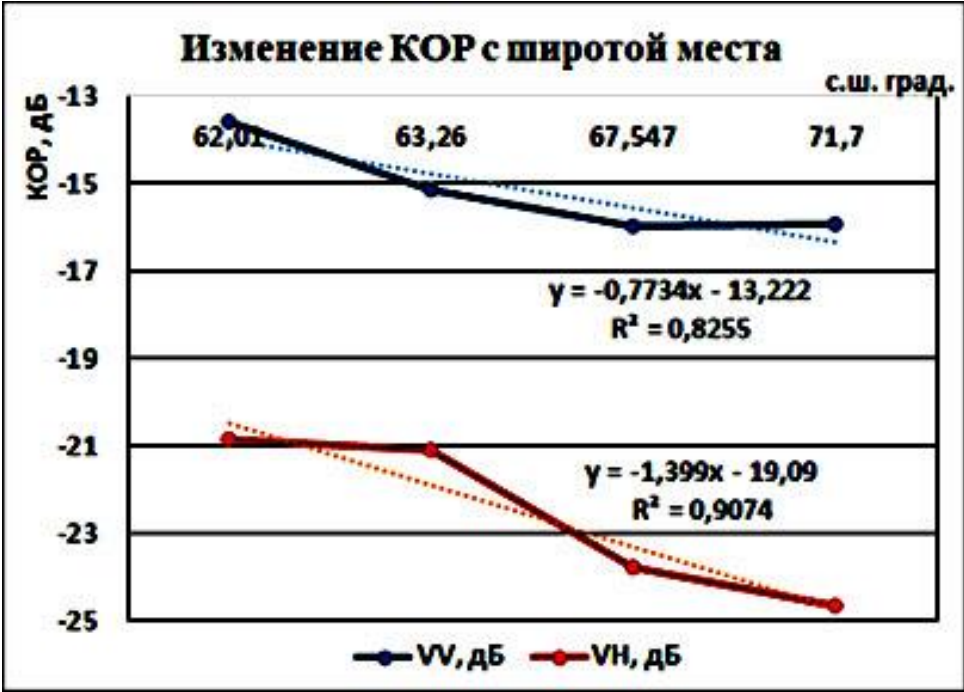


Рис. 18. Изменение КОР VV и VH поляризаций с широтой места.



Влияние растительности на КОР

Тикси, Якутск

Обратное рассеяние от поверхности почвы, покрытой растительностью, в соответствии с моделью водяного облака (Water Cloud Model- WCM) (Attema, Ulaby, 1978) представляется следующей формулой:

$$\sigma^0 = \sigma_{veg}^0 + \sigma_{veg+soil}^0 + \tau^2 \cdot \sigma_{soil}^0$$

где σ_{veg}^0 , $\sigma_{veg+soil}^0$ и $\tau^2 \cdot \sigma_{soil}^0$ являются, соответственно, являются, соответственно, радарным обратным рассеянием, вызванным только растительностью (объемное рассеяние), многократным взаимодействием, включающим как растительность, так и почву, и рассеяние от голой почвы, ослабленное слоем растительности (поверхностное рассеяние); τ^2 известно как двунаправленный удельный коэффициент пропускания растительностью, ослабляющий микроволны, когда они дважды проходят через растительный покров. Членом $\sigma_{veg+soil}^0$ в (3) можно пренебречь в случае слабого переотражения между растительностью и почвой.

Значение σ_{veg}^0 можно определить из соотношения (Attema, Ulaby, 1978):

$$\sigma_{veg}^0 = A \cdot w_c \cdot \cos \theta \cdot (1 - \tau^2)$$

$$\tau^2 = \exp(-2 \cdot B \cdot w_c \cdot \sec \theta)$$

где А и В – параметры, зависящие от геометрической структуры растительного покрова (эмпирические параметры); w_c -VWC - vegetation water content (кг/м²); θ - угол обзора.

Варианты оценки значения w_c : **1) через NDVI [Jackson et al., 1999].**
 В данной работе приведены эмпирические соотношения между NDVI и VWC для категории растительности –пастбище (трава и кусты):
Если NDVI ≤ 0.5, то
VWC(kg/m²) = 1.9134(NDVI)² - 0.3215(NDVI),
Если NDVI > 0.5, то
VWC = 4.2857(NDVI) - 1.5429.

(6)

Оценим значения VWC по значениям NDVI, определенным для тестовых участков Тикси и Якутска с помощью мультиспектральных данных спутника Sentinel-2 и программы обработки этих данных SNAP. Для Тикси наибольшее среднее значение NDVI по профилю получено для сеанса 29.7.2018 и равно NDVI~0.45. Для Якутска – сеанс 21.7.18 и 3.8.18, NDVI~0.35.

	Тикси	Якутск
NDVI	0.45	0.35
VWC [кг/м ²]	0.24	0.12



Определение влияния растительности на КОР по значениям NDVI

Тикси, Якутск

В работе (I. Gherboudj et al., 2011) приведены значения для A и b (формула (5)), полученных для C-диапазона разных поляризаций, двух углов обзора и трех культур в стадии зрелости: пшеница, горох и чечевица (высота от 15 до 75 см). Воспользуемся этими значениями для двух поляризаций VV и VH и двух углов 30° и 45°.

Тип растения	Параметры	30°	45°
		VV	VH
Пшеница	A	0.0008	0.0002
	b	0.47	0.31
Горох	A	0.0018	0.001
	b	0.13	0.15
Чечевица	A	-	0.00032
	b		0.075

	Тип растения	Тикси	Якутск
θ		40.5°	35°
NDVI		0.45	0.35
VWC		0.24	0.12
$\gamma = b \cdot VWC$	пшеница	0.0744	0.056
	горох	0.036	0.015
	чечевица	0.018	
$\tau^2 = \exp(-2 \cdot \gamma \cdot \sec\theta)$	пшеница	0.822	0.87
	горох	0.91	0.96
	чечевица	0.954	
$\sigma_{veg}^0 = A \cdot w_c \cdot \cos\theta \cdot (1 - \tau^2)$	пшеница	5*10⁻⁶	10⁻⁵
	горох	1.7*10⁻⁵	7*10⁻⁶
	чечевица	2.6*10⁻⁶	
σ_{VV}^0 σ_{VH}^0		0.032, 0.008	0.03 0.009



Модельные значения констант A и B для частиц разной формы



В работе (Park S.-E., Jang Y. T., Cho J.-H., Moon H. and Han S.-h. Theoretical evaluation of Water Cloud Model vegetation parameters//Remote Sens. **2019**, 11, 894; doi: 10.3390/rs11080894. P. 1-17) проведен теоретический анализ возможных значений эмпирических параметров A и B в модели WCM в зависимости от формы, размера и ориентации элементов растительности. Показано, что для **сферических частиц** коэффициент A меняется в зависимости от их размера. A , именно, коэффициент A меняется от $A=0.021$ для радиуса $r = \lambda/50$ до $A=2.6$ для $r = \lambda/10$. Коэффициент B определяется значением влажности частиц и меняется от $B=0.27$ для сухих частиц ($m_g=0.1$) до $B=0.014$ для влажных частиц ($m_g=0.9$), где m_g - гравиметрическая влажность, $m_g = \frac{W_w - W_d}{W_w}$, где W_w и W_d - влажная и сухая масса частицы.

Для **несферических частиц (иглы, диски)** константы A и B меняются в зависимости от поляризации. При моделировании рассмотрены растения со следующими параметрами: длина от 3 до 24 см, число частиц на m^3 от 200 до 4200, высота от 1 до 5 м, толщина иголок 0.1 см и дисков 0.01 см. Результаты показали, что на B сильно влияет форма частицы, т.е. значение B больше для дисков, чем для иголок. Аналогичное справедливо и для константы A . Ориентация частиц относительно направления волны также оказывает влияние на A и B . Так, B значительно уменьшается когда иголки ориентированы вертикально. Показано, что A и B растут с ростом угла обзора PCA.

В таблице показаны результаты моделирования параметров A и B в WCM для частоты 5 ГГц, VV поляризации, при угле обзора 30° для частиц в форме иголок.

Таблица. Результаты оценки параметров A и B на базе физической модели Generalized Rayleigh-Gans (GRG) (Karam M.A. Fung A.K., Leaf-Shape effects in electromagnetic wave scattering from vegetation//IEEE Trans. GRS, 1989, 27, 687-697)

	Ориентация	Толщина, см	B_{VV}	A_{VV}
1	Однородная ($0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$)	0.1	0.42	0.049
2		0.2	0.369	0.197
3		0.3	0.329	0.445
4	Средняя ($0^\circ \leq \beta \leq 60^\circ$)	0.1	0.386	0.025
5		0.2	0.34	0.1
6		0.3	0.303	0.226
7	Вертикальная ($0^\circ \leq \beta \leq 30^\circ$)	0.1	0.353	0.002
8		0.2	0.31	0.009
9		0.3	0.277	0.021



Определение влияния растительности на КОР по значениям комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) растений

Тикси

Формула для нахождения γ дана в работе Schmugge, Jackson, 1992:

$$\gamma = 4\pi \cdot (H / \lambda) \cdot \text{Im} \left[\sqrt{\epsilon_{\text{раст}}} \right]$$

где H-высота растения, λ – длина волны, $\epsilon_{\text{раст}}$ - КДП растения, Im – мнимая часть.

W	w=1.9 %		w=6.3 %		w=7.9 %		w=16.2 %		w=39.8 %		w=42 %	
багульник	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''
КДП	1.3479	0.0320 4	1.2923	0.0239	1.4914	0.0572	2.2202	0.2699	2.5079	0.3971	1.9162	0.2792
τ^2 , H=20 см												
Тикси	0,22		0,317		0,077		4,9E-05		1,14E-06		1,75E-5	
$\tau^2 = \exp(-2 \cdot \gamma \cdot \sec\theta)$ H=10 см												
Тикси	0,47		0,563		0,277		7E-03		1,07E-3		4,2E-03	

Данные по КДП багульника были любезно предоставлены автору Кочетковой Т.Д., сотрудницей Томского Гос. Университета. ДП багульника приведены для частоты 5.407 ГГц с разной весовой влажностью w (вес влаги к весу сухого остатка в %).



Определение влияния снежного покрова на КОР

Описание обратного рассеяния сигнала от поверхностей, покрытых снегом, дано в моделях рассеяния, которые подтверждены экспериментальными результатами (Ulaby, 1986; Fung, 1994). По этим моделям сигнал от покрытой снегом поверхности состоит из вклада поверхностного рассеяния на границе воздух-снег, объемного рассеяния слоем снега, поверхностного рассеяния на границе снег-земля, ослабленное снежным слоем.

В зависимости от содержания жидкой воды снег рассматривается как сухой или мокрый. Первый определяется как снег, состоящий из кристаллов льда в воздухе, при температурах ниже 0° С. Мокрый снег обнаруживается в сезон таяния, когда температура достигает 0° С, и снег содержит определенное количество жидкой воды, определяемое через процентное содержание, называемое влажностью w (Besic et al., 2012).

Эти два типа снега по своим диэлектрическим свойствам ведут себя как два совершенно разных материала из-за содержания мокрым снегом жидкой воды, диэлектрическая постоянная ϵ которой значительно отличается от ϵ льда.

Покрытие сухим снегом определяется ϵ , которая является функцией только плотности сухого снега $\rho_{\text{дс}}$ (Gareth Rees, 2006):
 $\epsilon'_{\text{дс}} = 1 + 1.9\rho_{\text{дс}} = 1 + 1.9\rho_{\text{лс}}f_{\text{лс}}$, где $\rho_{\text{дс}}$ зависит от объема фракции льда ($f_{\text{лс}}$), а $\rho_{\text{лс}}$ имеет значение 917 кг/м³. Диэлектрическая проницаемость сухого снега является чисто реальной величиной, показывающей отсутствие диэлектрических потерь в среде.

С другой стороны, ϵ мокрого снега является комплексной величиной, функцией объема фракции льда ($f_{\text{лс}}$), влажности (w) и частоты (f): $\epsilon_{\text{мс}} = \epsilon'_{\text{мс}} + j\epsilon''_{\text{мс}}$.

Для частотного диапазона 3 ГГц-15 ГГц действительная и мнимая части ϵ определяются следующими выражениями (Gareth Rees, 2006):

$$\epsilon'_{\text{мс}} = 1 + 1.83\rho_{\text{дс}} + 0.02w^{1.105} + \frac{0.073w^{1.31}}{1 + a^2} \quad \epsilon''_{\text{мс}} = \frac{0.073 \cdot a \cdot w^{1.31}}{1 + a^2} \quad a = f / 9.07$$

В отличие от сухого снега ϵ мокрого снега является комплексной величиной, имеет мнимую часть, показывающую присутствие поглощения в среде. Эта разница указывает на различие в механизмах обратного рассеяния для двух типов снега.

Сухой снег почти прозрачен в микроволновом диапазоне э/м спектра (Mätzler, 1996; Rott, Mätzler, 1987). В противоположность этому, мокрый снег с содержанием жидкой воды даже меньше 1% имеет значительное влияние на проницаемость снежного покрова. Увеличение поглощения приводит к значительному уменьшению КОР (Mätzler, 1987).

Заключение

Многовременные радарные данные позволяют определить начало процесса замерзания/оттаивания приповерхностного слоя почвы по максимальным перепадам значений сигма 0, которые для периода 2017/2018 годов для Тикси, Верхоянска, Томтора (Оймякона) и Якутска составляют до 6 дБ при оттаивании и до 4 дБ при замерзании верхнего слоя почвы, что соответствует изменению ДП почвы до 8 единиц при оттаивании и до единиц при замерзании почвы на основании модели (Dubois et al., 1995). Получено, что для Верхоянска наибольшие перепады КОР и, соответственно, скачки ДП почвы.

Найденные по радарным данным пороговые значения сигма 0, при которых температура в верхнем слое почвы опускается ниже 0°C, позволили построить локальные карты мерзлой и талой почвы в районе тестовых участков;



СПАСИБО!



ЛИТЕРАТУРА

1. Анисимов О.А., Анохин Ю.А., Лавров С.А., Малкова Г.В., Мяч Л.Т., Павлов А.В., Романовский В.А., Стрелецкий Д.А., Холодов А.Л., Шикломанов Н.И. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. Глава 8. Континентальная многолетняя мерзлота. М.: Росгидромет. 2012. С. 301–359.
2. Музалевский К.В., Миронов В.Л., Боике Дж., Швалева А.А., Евтюшкин А.В., Филатов А.В. Измерение температуры мерзлого деятельного слоя почвенного покрова арктической тундры по данным космического радара ALOS PALSAR// Изв. ВУЗов. Физика. 2013. №1. С. 1-3.
3. Родионова Н.В. Классификация поверхности на поляриметрических РЛИ с использованием текстуры и разложения по механизмам рассеяния// ИЗК. 2007. №34. С. 8-14.
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. (в печати).
5. Attema E.P.W., Ulaby F.T. Vegetation modeled as a water cloud// Radio Sciences. 1978.Vol. 13. P. 357-364.
6. Brown W.G. Difficulties associated with predicting depth of freeze and thaw// Canadian geotechnical J. 1964. 1(4). P. 215-226.
7. Dobson M.C., Ulaby F.T., Hallikainen M.T., El-Rayes M.A. Microwave dielectric behavior of wet soil Part II: Dielectric mixing models// IEEE Trans. GRS. 1985. GE-23. P. 35-46.
8. Dubois P.C., van Zyl J.J., Engman T. Measuring soil moisture with imaging radars// IEEE Trans. GRS. 1995. V. 33. № 4. P. 916-926.
9. Duguay C.R., Zhang T., Leverington D.W., Romanovsky V.E. Satellite remote sensing of permafrost and seasonally frozen ground// Remote sensing of Northern hydrology, geophysical monograph series 163. 2005. P. 91-117.
10. I. Gherboudj, R. Magagi, A. A. Berg, B. Toth. Soil moisture retrieval over agricultural fields from multi-polarized and multi-angular RADARSAT-2 SAR data// Rem. Sens. Envir. 115 (2011) 33–43
11. 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.
12. Haralick R.M. Statistical and structural approaches to texture// Proc. IEEE. 1979. 67(5). P. 786-804.



ЛИТЕРАТУРА

13. Jagdhuber Th., Stockamp J., Hajnsek I. and Ludwig R. Identification of Soil Freezing and Thawing States Using SAR Polarimetry at C-Band// Remote Sens. 2014. 6. P. 2008-2023; doi:10.3390/rs6032008
14. 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. IGARSS'2008. Boston. Mass. 2008. Vol.III-382-385.
15. 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.
16. Kim Y., Kimball J.S., McDonald K.S., Glassy J. // IEEE Trans. GRS., V. 49. No. 3. P. 949-960. 2011.
17. Mironov V.L., Muzalevsky K.V. Spaceborne radar monitoring of soil freezing/thawing processes in the arctic tundra// Russian Physics Journal. 2013. 55(8). P. 899- 902. (Russian Original No. 8. August, 2012).
18. Nyberg L., St'ahli M., Mellander P.-E., and Bishop K. H. Soil frost effects 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.
19. Park S.-E., Bart A., Sabel D., Wagner W., Naeimi V., Yamaguchi Y. Monitoring freeze/thaw cycles using ENVISAT ASAR global mode// Remote Sens. Environ. 2011. 115. P. 3457-3467.
20. Rajaei P., Baladi G. Y. Frost depth – a general prediction model// 94st Transportation Research Board Annual Meeting, Washington D.C. January 2015. P. 1-15.
21. Rignot E., Way J.B., McDonald K., Viereck L., Williams C., Adams P., Payne C., Wood W., Shi J. Monitoring of environmental conditions in taiga forests using ERS-1 SAR// Remote Sens. Environ. 1994. 49. P. 145-154.
22. Rousseau L.P., Magagi R., Leconte R., Berg A., Toth B. Potentials of RADARSAT-2 data to monitor freezing/thawing cycles over agricultural lands in Canada// Proc. IGARSS'2009. Cape Town, South Africa. 12-17 July 2009. P. 598-601.
23. Schmugge T.J., Jackson T.J. A dielectric model of the vegetation effects on the microwave emission from soils// IEEE Trans/ GRS. Vol. 30. No. 4. 1992. P. 757-760.
24. Shiklomanov N.I. From Exploration to Systematic Investigation: Development of Geocryology in 19th- and Early– 20th-Century Russia// Physical Geography. 2005. No.4. P. 249-263.
25. Ulaby F.T., Moore R.K., Fung A.K. Microwave Remote Sensing: Active and Passive: Vol. 1// Fundamentals and Radiometry. 1982. Artech House, Dedham, Mass, USA.
26. Wegmüller U. The effect of freezing and thawing on the microwave signatures of bare soil// Remote Sens. Environ. 1990. 33. P. 123-135.
27. www.iki.rssi.ru/books/2003boyarsky.pdf
28. Zhang L., Shi J., Zhang Z., Zhao K. The estimation of dielectric constant of frozen soil-water mixture at microwave bands// Proc. IGARSS'2003. Toulouse, France. 21-25 July 2003. P. 608-611.