

Микроволновый радиометрический метод измерения температуры поверхности почвы арктической тундры

В.Л. Миронов, К.В. Музалевский, З. Ружичка

*Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск, 660036, Россия
E-mails: rsdvm@ksc.krasn.ru, rsdkm@ksc.krasn.ru*

В данной работе представлены результаты дистанционного зондирования температуры почвенного покрова на тестовом участке п-ва Ямал с использованием угловых зависимостей радиояростной температуры, наблюдаемых космическим аппаратом SMOS на частоте 1,4 ГГц. Расположение пикселя зондирования космического аппарата SMOS было выбрано в районе между метеостанциями Марресале и Васькины дачи на п-ве Ямал. Исследование охватывает период с 22 октября 2012 г. по 10 мая 2014 г. для мерзлого состояния почвенного покрова. Метод восстановления температуры почвы основан на решении обратной задачи путем минимизации нормы невязки между наблюдаемыми и рассчитанными значениями радиояростной температуры. Расчет радиояростной температуры производился с использованием полуэмпирической модели, учитывающей затухание волны в снежном покрове, диэлектрическую проницаемость почвенного покрова, на основе модели комплексной диэлектрической проницаемости почвы с высоким содержанием органического вещества. Модель комплексной диэлектрической проницаемости почвенного покрова была создана в лабораторных условиях с использованием методов диэлектрической спектроскопии с использованием почвенных образцов отобранных на тестовом участке п-ва Ямал. Среднеквадратическое отклонение и коэффициент детерминации между восстановленными и измеренными значениями температуры почвы оказались равны 4,5°C и 0,59 соответственно. Полученный результат указывает на перспективность использования поляриметрических угловых наблюдений радиояростной температуры на частоте 1,4 ГГц для измерения температуры арктической тундровой почвы.

Ключевые слова: микроволновая радиометрия, температура почвы, арктическая зона

*Одобрена к печати: 20.03.2017
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-61-71*

Введение

Температура почвы арктической зоны играет решающую роль в энергетическом балансе между почвенным покровом и атмосферой, определяя интенсивность процессов выделения углекислого газа и метана в атмосферу, а также динамику свойств деятельного слоя почвы в зоне вечной мерзлоты в ходе глобальных климатических изменений. В настоящее время малое количество метеостанций в северных широтах не обеспечивает достаточную полноту данных о температуре почвы в климатических моделях как глобального, так и регионального масштаба. Недавние исследования (Nachem et al., 2012; Jones et al., 2007), показали, что методы спутникового дистанционного зондирования температуры почвы являются перспективными информационными технологиями для получения дополнительных данных о температуре почвы.

В работе (Nachem et al., 2012) значения температуры поверхности почвы (ТПП) были получены с использованием инфракрасного (ИК) радиометра MODIS и сопоставлены со значениями температуры почвы, измеренными с помощью метеорологических станций на глубине 3–5 см. Наблюдения проводились на 12 тестовых полигонах в период с 2000 г. по 2008 г. на севере США и Канады. Среднеквадратичное отклонение (СКО) между восстановленными и измеренными значениями температуры почвы варьировалось от 4,4°C до 14,7°C, а коэффициент детерминации (КД) изменялся от 0,49 до 0,92. Одним из основных факторов, ограничивающих использование ИК радиометров для из-

мерения ТПП, являются неблагоприятные погодные условия (облачность, дождь и т.д.). Так, в соответствии с (Nachem et al., 2012) в 40% случаев наблюдений MODIS восстановление температуры было невозможно из-за облачности. Кроме того, показано (Nachem et al., 2012), что температура видимой поверхности земли, которая восстанавливается MODIS, больше коррелирует с температурой воздуха (КД=0,98) на высоте 2 м, чем с ТПП (КД=0,62).

В работе (Jones et al., 2007) была восстановлена ТПП с использованием усовершенствованного микроволнового сканирующего радиометра (AMSR-E), который работает в диапазоне частот от 6,9 ГГц до 89 ГГц, для семи тестовых участков, расположенных на севере США и Канады, за период с 2002 г. по 2004 г. Восстановленные значения ТПП были сопоставлены со значениями температуры почвы, измеренными с помощью контактных температурных датчиков, размещенных на глубине 0–8 см. СКО между измеренными и восстановленными значениями ТПП варьировались для различных тестовых участков в пределах от 2,2°C до 10,5°C, КД изменялся от 0,24 до 0,77. При этом, как показывают оценки, выполненные в (Jones et al., 2007) и (Zhao et al., 2012), толщина эффективно излучающего слоя в случае талой почвы (Jones et al., 2007) оказывается не более 3 см, а в случае мерзлой почвы не превышает 6 см (Zhao et al., 2012). Поскольку в диапазоне частот от 6,9 ГГц до 89 ГГц снежный покров оказывает значительное влияние на радиотепловое излучение почвы (Zhao et al., 2012), применение частоты 1,4 ГГц, используемой в космическом аппарате (КА) SMOS, может существенно уменьшить влияние снежного покрова и увеличить глубину зондируемого слоя почвы. В работе (Mironov et al., 2013) проведено теоретическое изучение возможности восстановления температуры мерзлой почвы из поляриметрических угловых наблюдений радиояркой температуры (РТ) на частоте 1,4 ГГц. РТ рассчитывались на основе полуэмпирической модели радиотеплового излучения почв (Wigneron et al., 2011a) и температурно-зависимой модели комплексной диэлектрической проницаемости почвенного покрова с высоким содержанием органической компоненты (Mironov et al., 2010). Кроме того, были использованы данные о влажности почвы, плотности сухого сложения почвы и профилях температуры деятельного слоя почвы, измеренные на метеостанции Франклин Блафс, Аляска (69,6500° с.ш., 148,7167° з.д.) с 1999 г. по 2001 г. На основе смоделированных угловых зависимостей РТ, которые выступали в роли исходных наблюдаемых значений КА SMOS, были восстановлены градиенты температуры в деятельном слое почвы и температура поверхности почвы. Предложенный в теоретической работе (Mironov et al., 2013) подход нуждается в экспериментальной проверке для подтверждения принципиальной возможности проводить космические измерения температуры почвы из угловых поляриметрических радиотепловых измерений на частоте 1,4 ГГц. В данной работе экспериментально будет исследоваться возможность восстановления эффективной температуры поверхностного слоя почвы на тестовом участке полуострова Ямал. При этом в отличие от работы (Mironov et al., 2013) температура в деятельном слое почвы будет считаться постоянной по глубине.

Тестовый участок, спутниковые и наземные данные

В качестве тестового участка выбрана область, расположенная между метеостанцией Марресале ($69,7151^\circ$ с.ш., $66,8209^\circ$ в.д.) и Васькины дачи ($70,3897^\circ$ с.ш., $68,3540^\circ$ в.д.) на полуострове Ямал. Этот выбор обусловлен следующими двумя факторами. Во-первых, ранее в районе метеостанции Марресале были отобраны образцы почвенного покрова, на основе которых была разработана модель комплексной диэлектрической проницаемости почвы (Mironov et al., 2015a, 2015b, 2015c) с высоким содержанием органической компоненты. Во-вторых, метеостанциями Марресале ($69,7151^\circ$ с.ш., $66,8209^\circ$ в.д.) и Васькины дачи ($70,3897^\circ$ с.ш., $68,3540^\circ$ в.д.) ведутся измерения среднесуточных температур почвы и воздуха. Для дальнейшего сравнения в качестве опорной информации о температуре почвы будет использоваться временной ряд усредненных значений температуры почвы, вычисленных на основе доступных измерений температуры почвы метеостанцией Марресале и Васькины дачи с 22 октября 2012 г. по 10 мая 2014 г.

Ландшафт тестового участка представляет собой типичную тундру, покрытую травами, мхом, лишайниками и редкими карликовыми кустарниками высотой не более 40 см. В пределах тестовой площадки почвы, покрытые растительностью, занимали 93,7%, а открытые водные объекты занимали 6,3%. Растительный покров был классифицирован следующим образом: кустарниковая тундра (45,6%), травянистая тундра (48,1%). Эти данные были получены на основе электронных карт растительности и водных объектов полуострова Ямал Геофизического института Университета Аляски Фэйербэнкс.

С целью создания диэлектрической модели и определения гранулометрических характеристик почв на тестовом участке в районе метеостанции Марресале были отобраны 8 образцов почвенного покрова. Почвенные образцы были отобраны в виде цилиндрических колонок 25 см в высоту и 10 см в диаметре. Образцы почвенного покрова были отобраны в различных ландшафтных условиях на местности (на холмах и в долинах рек и озер, в заболоченной и относительно сухой части тундрового покрова). Верхний горизонт отобранных почв содержал растительные полусгнившие остатки и минеральные частицы, толщина его варьировалась от 2 см до 25 см и в среднем составляла 10 см. В этом слое весовое содержание органической компоненты составляло не менее 60%. Средняя плотность сухого сложения верхнего органического горизонта почвы 0–10 см оказалась равна $0,46 \text{ г/см}^3$. Нижняя часть почвенных образцов была представлена минеральной почвой с различным содержанием глинистой и песчаной фракции. Усредненные по площади пикселя зондирования КА SMOS значения гранулометрических характеристик минерального почвенного горизонта, полученные с использованием электронных карт (Pavlov, 1998; FAO/IIASA/ISRIC/ISSCAS/JRC, 2012), составили: песок – 36,7%, глина – 13,2%, пыль – 50,1%.

Исходя из того, что верхний слой почвы является наиболее существенным при формировании микроволнового излучения почвенного покрова, далее при моделировании будем рассматривать почвенный покров в виде однородного полупространства, сформированного почвами с высоким содержанием органической компоненты.

В качестве источника экспериментально измеренных угловых зависимостей РТ на горизонтальной и вертикальной поляризации в пределах углов наблюдения от 10° до 65° на частоте 1,4 ГГц были выбраны данные космического аппарата SMOS (Kerr et al., 2010). В алгоритме восстановления температуры почвы использовались усредненные угловые зависимости РТ, измеренные SMOS на восходящих (6 часов утра по местному времени) и нисходящих (6 часов вечера по местному времени) витках орбиты. В период с 22 октября 2012 г. по 10 мая 2014 г. по тестовому участку средняя погрешность радиометрических измерений SMOS составляла $\sim 7\text{K}$ во всем диапазоне углов наблюдения и для обеих поляризаций. Эти оценки были сделаны на основе данных предоставляемых в рамках стандартного продукта SMOS (SCLF1C). Из почти 400 имеющихся наблюдений только 320 были обработаны. Остальные данные были отброшены во время обработки, так как: а) угловые зависимости РТ были измерены в диапазоне углов менее 10 градусов или содержали менее 10 угловых отсчетов, вследствие чего алгоритм восстановления температуры расходился; б) СКО отклонение между рассчитанными и измеренными значениями РТ оказывались больше чем 7K .

Теоретическая модель радиояркостной температуры тундрового почвенного покрова

Для моделирования РТ $T_{B,p}^{th}(\theta)$ в зависимости от угла наблюдения θ , на горизонтальной, $p = H$, и вертикальной, $p = V$, поляризациях использовалась полуэмпирическая модель микроволнового излучения, предложенная в (Wigneron et al., 2007) в случае значений межполяризационного фактора, равного $Q \equiv 0$, а углового фактора $N_p \equiv 2$:

$$T_{B,p}^{th}(\theta) = \left(1 - |R_p(\theta, \varepsilon_s)|^2 e^{-H_r \cos^2 \theta - 2\tau / \cos \theta}\right) \cdot T_s. \quad (1)$$

Здесь T_s – эффективная температура поверхности почвы (ЭТПП); $R_p(\theta, \varepsilon_s)$ – коэффициент отражения Френеля; H_r – параметр шероховатости поверхности почвы; ε_s – комплексная диэлектрическая проницаемость (КДП) почвы; τ – оптическая толщина снежного покрова. В данной модели предполагается, что температура почвы и снежного покрова одинаковая. Модель (1) учитывает только поглощение волны в снежном покрове, пренебрегая эффектами объемного рассеяния и рефракции волны в снежном покрове. В связи с тем, что в модели (1) температура и влажность почвы считается постоянной по глубине, влияние неоднородной структуры, вызванной процессами промерзания и оттаивания, не учитывалось. Модель (1) не учитывает также рельеф местности, наличие которого, как показано в (Mialon et al., 2008), могло привести к погрешностям в рассчитанных значениях РТ порядка 2K , которая меньше погрешности измерения РТ КА SMOS. Отметим, что модель (1) также не учитывает влияния водоемов в формировании радиотеплового излучения. Это пренебрежение, в свою очередь, является источником ошибок для определения

температуры почвы. Однако, как показано в работе (Ye et al., 2015), если доля водных объектов в пределах пикселя зондирования не превышает 8%, то максимальное отклонение между измеренной РТ и рассчитанной без учета водных объектов РТ не превышает 4К (меньше погрешности измерения РТ КА SMOS).

При расчете РТ в модели (1) была использована модель диэлектрической проницаемости (Mironov et al., 2015a, 2015b, 2015c) для арктической тундровой почвы с высоким содержанием органической компоненты, образцы для создания которой были отобраны на тестовом подспутниковом участке.

Модель диэлектрической проницаемости почвенного покрова

Для создания температурно-зависимой диэлектрической модели почвы (ТДМП) были использованы почвенные образцы, отобранные на территории метеостанции Марресале (Mironov et al., 2015a, 2015b, 2015c). Почвенные образцы извлекались из органического слоя с глубины 9–14 см. Процентное содержание органических и минеральных компонент в почвенных образцах оказалось равно: органическое вещество ~ 60%, кварц ~ 30%, калиевый полевой шпат ~ 5–10%, плагиоклаз ~ 5–10%, хлориты, слюда, смектит в остаточных количествах – <1%.

Процедура обработки почвенных образцов, методика диэлектрических измерений и регрессионного анализа, используемые при создании ТДМП, изложены в работах (Mironov et al., 2010, 2015a, 2015b). ТДМП позволяет рассчитать КДП почвы с высоким содержанием органической компоненты в зависимости от плотности сухого сложения ρ_d , гравиметрической влажности почвы: $0,03 \text{ г/г} < m_g < 0,55 \text{ г/г}$, частоты электромагнитной волны: $0,05 \text{ ГГц} < f < 15 \text{ ГГц}$, и температуры почвы: $-30^\circ\text{C} < T_s < 25^\circ\text{C}$. При измерениях КДП почвы в коаксиальном контейнере плотность сухого сложения образцов варьировалась от $0,72 \text{ г/см}^3$ до $0,87 \text{ г/см}^3$. Экспериментальная проверка этой модели демонстрирует хорошее согласие с результатами измерений (Mironov et al., 2015a, 2015b, 2015c). Значения КД между модельными и измеренными значениями КДП составили 0,997 и 0,991 соответственно для действительной и мнимой части КДП. СКО между модельными и измеренными значениями КДП составили 0,348 и 0,188 соответственно для действительной и мнимой части КДП (Mironov et al., 2015a, 2015b). Рассчитанные и измеренные значения нормированного показателя преломления $(n_s - 1) / \rho_d$ и коэффициента затухания κ_s / ρ_d на частоте КА SMOS 1,4 ГГц показаны в зависимости от температуры и влажности почвы на *рис. 1*.

Показатель преломления и коэффициент затухания связаны следующим соотношением с КДП почвы: $n_s^* = \sqrt{\epsilon_s} = n_s + i\kappa_s$, где i – мнимая единица, n_s^* – комплексный показатель преломления (КПП). Как видно из *рис. 1*, КПП талой почвы в большей степени зависит от влажности почвы, чем от температуры. В случае мерзлой почвы, если содержание влаги в почве больше чем 0,23 г/г (количество связанной воды), КПП в большей степени

зависит от температуры, чем от влажности почвы. В связи с этим в качестве первого шага в данной работе будет проведено восстановление температуры мерзлой почвы.

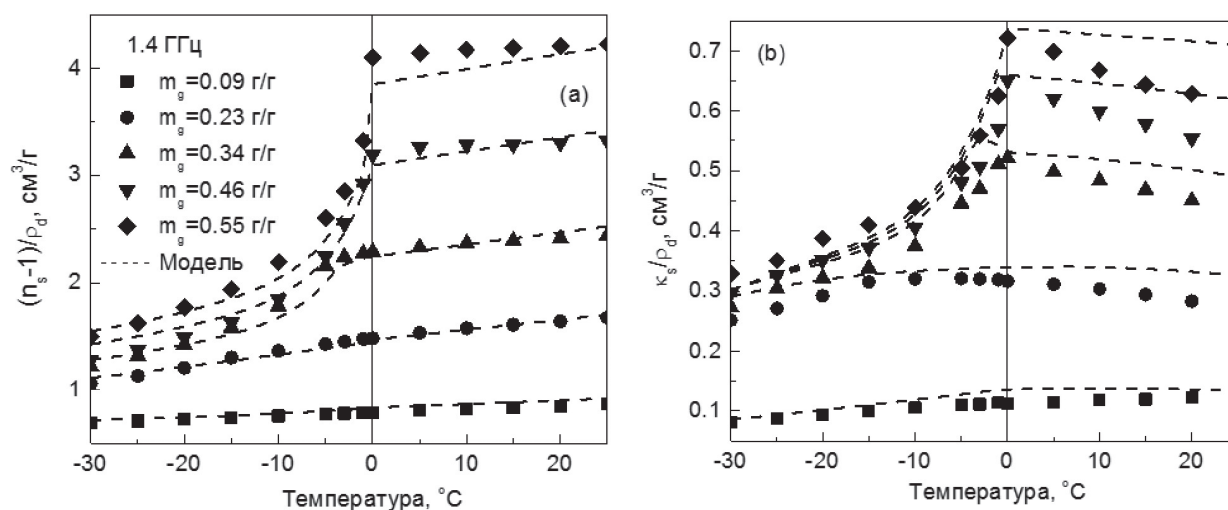


Рис. 1. Зависимость нормированного показателя преломления (а) и коэффициента затухания (б) от температуры и весовой влажности почвы на частоте 1,4 ГГц. Измеренные и рассчитанные величины показаны символами и пунктирной линией соответственно

Результаты восстановления температуры почвы

В соответствии с уравнением (1) и ТДМП (Mironov et al., 2015a, 2015b, 2015c) РТ почвы, покрытой слоем снега, $T_{B,p}^{th}(\theta)$, может быть представлена как функция следующих переменных: $T_{B,p}^{th}(\theta) = T_{B,p}^{th}(\theta, \rho_d, m_g, T_s, H_r, \tau)$. Для уменьшения числа параметров, которые могут быть восстановлены в модели (1), зададим плотность сухого сложения почвы, равную (0,46 г/см³) средней плотности верхнего горизонта почвенных образцов, отобранных на тестовой площадке. Метод восстановления температуры почвы основан на решении обратной задачи путем минимизации нормы невязки между измеренной КА SMOS $T_{B,p}^m(\theta_i)$ и рассчитанной $T_{B,p}^{th}(\theta_i)$ на основе модели (1) РТ:

$$F = \sum_{p=H,V} \sum_{i=1}^N |T_{B,p}^m(\theta_i) - T_{B,p}^{th}(\theta_i)|^2, \quad (2)$$

где N – общее число углов наблюдения радиояростной температуры в диапазоне $0^\circ \leq \theta \leq \leq 60^\circ$ не более 50. В результате при решении обратной задачи следующие параметры задачи восстанавливались: $m_V(m_V = \rho_d m_g), T_s, H_r, \tau$.

Восстановленные значения температуры и влажности почвы, параметра шероховатости поверхности почвы, оптической толщины снежного покрова охватывают периоды с 1 октября по 1 июня 2013 г. и 2014 г., когда температура поверхности почвы была меньше нуля градусов Цельсия по данным метеостанции. За период с 1 октября по 1 июня 2013 г.

были восстановлены следующие значения влажности почвы, параметра шероховатости и оптической толщины (среднее значение и СКО): $m_v = 0,38 \pm 0,07 \text{ см}^3/\text{см}^3$, $H_r = 0,75 \pm 0,14$, $\tau = 0,18 \pm 0,07$ соответственно. За период с 1 октября по 1 июня 2014 г. были восстановлены следующие значения влажности почвы, параметра шероховатости и оптической толщины (среднее значение и СКО): $m_v = 0,32 \pm 0,06 \text{ см}^3/\text{см}^3$, $H_r = 0,62 \pm 0,20$, $\tau = 0,21 \pm 0,11$ соответственно. В соответствии с физическими принципами, заложенными в диэлектрической модели (Mironov et al., 2015a, 2015b, 2015c), восстановленные значения влажности почвы следует интерпретировать как общее содержание воды, компонентами которой является незамерзшая вода и лёд. К сожалению, наземные измерения влажности почвы на тестовом участке п-ва Ямал не проводятся, и сравнить восстановленные значения влажности почвы можно лишь качественно со значениями влажности талой почвы, которые предоставляются в данных КА SMOS. По данным КА SMOS, средние значения влажности талой почвы равны $0,23 \pm 0,06 \text{ см}^3/\text{см}^3$ и $0,21 \pm 0,04 \text{ см}^3/\text{см}^3$ соответственно за 2013 г. и 2014 г. Эти значения влажности близки к восстановленным значениям влажности мерзлой почвы в данной работе. Для детальной верификации восстанавливаемых значений влажности почвы необходимы данные наземных измерений.

Поскольку территория тестового участка, входящая в пиксель зондирования SMOS ($43 \times 43 \text{ км}$), содержит большое разнообразие типов поверхностей почвенного покрова, различающихся степенью мелкомасштабных неровностей, а также принимая во внимание, что наблюдения радиояркостной температуры КА SMOS происходят под различными азимутальными углами, восстановленные параметры шероховатости имели значительные вариации. На основе восстановленных параметров шероховатости поверхности почвы H_r и формулы (7) из работ (Wigneron et al., 2011, 2013) оценка СКО высот неровностей поверхности почвенного покрова дает значение $\sim 2 \pm 1 \text{ см}$, что по порядку величины соответствует данным наземных измерений этой величины, выполненным на тестовом участке в ходе отбора почвенных образцов.

Восстановленные из радиометрических данных SMOS и измеренные метеостанцией *in situ* значения температуры почвы показаны на *рис. 2* и *рис. 3*.

В периоды времени, когда измеренная метеостанцией температура поверхности мерзлой почвы менялась от -4°C до 0°C , разница между измеренными и восстановленными значениями температуры почвы достигала $\sim 15\text{--}20^\circ\text{C}$. По-видимому, этот результат получается из-за неучета в модели (1) неоднородной слоистой структуры КДП, возникающей при промерзании и оттаивании верхнего слоя почвы. Это явление экспериментально наблюдалось и изучалось ранее в работах (Bobrov et al., 2006, 2010). В остальные периоды времени, когда верхний слой, формирующий радиотепловое излучение почвы, оказывался полностью промерзшим, СКО и КД между восстановленными и измеренными значениями температуры почвы оказались равны $4,5^\circ\text{C}$ и $0,59$ соответственно. В величину этой ошибки могут вносить вклад такие не учтенные в модели (1) явления как рефракция и объемное рассеяние волн в слое снега, а также вариации типа почвы и присутствие водных объектов в пределах пикселя зондирования SMOS. Доля различных типов почв и водных объектов

в пределах пикселя SMOS может быть учтена при помощи использования электронных карт водных объектов и типов почв в сочетании с температурно-зависимыми диэлектрическими моделями почв органических (Mironov et al., 2010, 2015a, 2015b) и минеральных (Mironov et al., 2009, 2015c) типов. В этом случае интегральная РТ может быть рассчитана в виде суперпозиции РТ различных типов почв и водных объектов в соответствии с долей площади, занимаемой этими объектами в пределах пикселя КА SMOS.

Несмотря на простоту используемой модели, в данной работе экспериментально продемонстрирована возможность восстановления температуры почвы из радиометрических наблюдений КА SMOS для конкретного тестового участка. Учет всех вышеперечисленных факторов в более сложной модели позволит повысить точность измерения температуры почвы.

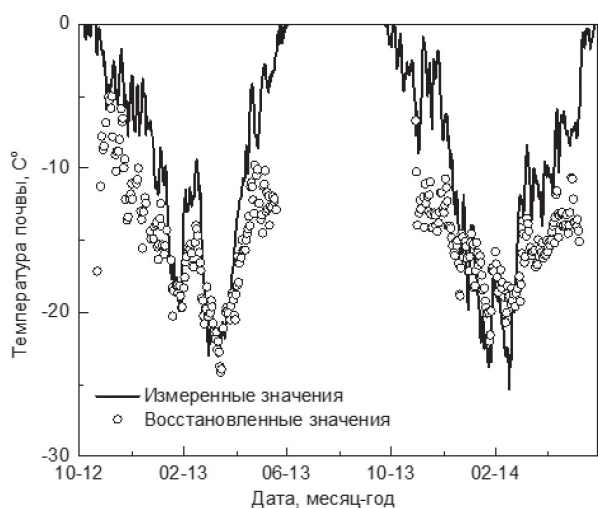


Рис. 2. Измеренные метеостанцией и восстановленные из радиометрических данных КА SMOS значения температуры мерзлой почвы

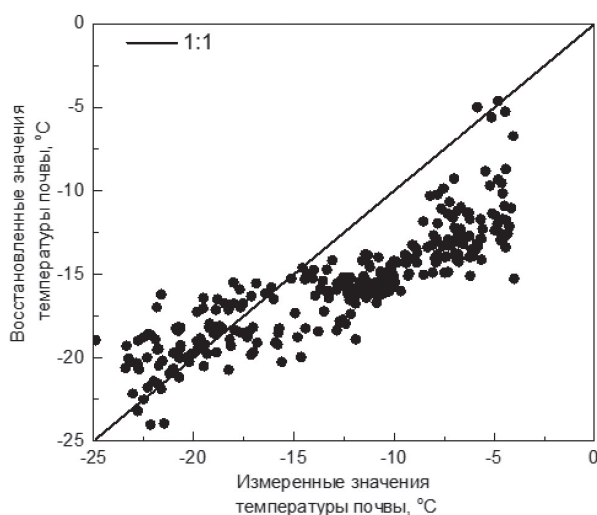


Рис. 3. Корреляция между измеренными метеостанцией и восстановленными из радиометрических данных КА SMOS значениями температуры мерзлой почвы

Заключение

Основная цель данной работы заключалась в проведении экспериментального тестирования метода измерения температуры почвы арктической тундры, предложенного в работе (Mironov et al., 2013), на основе наблюдения угловых зависимостей радиояркостной температуры КА SMOS на частоте 1,4 ГГц на вертикальной и горизонтальной поляризациях. Результаты исследования указывают на перспективность использования поляриметрических угловых наблюдений радиояркостной температуры на частоте 1,4 ГГц КА SMOS с целью измерения температуры почвы в Арктическом регионе. Полученная в данной работе погрешность измерения температуры почвы $4,5^{\circ}\text{C}$ может быть достигнута при условии полного промерзания излучающего слоя почвы. Предлагаемая методика восстановления температуры в случае полностью промерзшего излучающего слоя почвы обладает потенциалом для увеличения точности в ходе усложнения используемой модели.

Тем не менее, несмотря на существенные упрощения модели радиоизлучения почвы, оказалось возможным применить предлагаемую методику зондирования температуры полностью промерзшего слоя почвы с погрешностью 4,5°C. Следующие наиболее значимые факторы должны быть включены в модели излучения с целью увеличения точности восстановления температуры почвы: 1) градиент температуры в промерзшем слое почвы; 2) влияние снежного покрова; 3) присутствие водных объектов и неоднородность типов почвенного покрова в пределах пикселя SMOS. Кроме того, в будущем должна быть решена проблема построения модели радиоизлучения и алгоритма восстановления температуры почвы для промерзающего или оттаивающего излучающего слоя почвы.

Литература

1. Bobrov P.P., Krivaltsevich S.V., Mironov V.L., Yashchenko A.S. The Effect of Frozen Soil Layer Thickness On Thermal Emission at the wavelength 3.6–11 cm // Russian Physics Journal. 2006. Vol. 49. No. 9. P. 907–912.
2. Bobrov P.P., Mironov V.L., Yashchenko A.S. Diurnal Dynamics of Soil Brightness Temperatures Observed at Frequencies of 1.4 and 6.9 GHz in the Processes of Freezing and Thawing // Journal of Communications, Technology and Electronics. 2010. Vol. 55. No. 4. P. 395–402.
3. FAO/IIASA/ISRIC/ISSCAS/JRC, 2012. Harmonized World Soil Database (version 1.2). FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria.
4. Hachem S., Duguay C.R., Allard M. Comparison of MODIS-derived land surface temperatures with ground surface and air temperature measurements in continuous permafrost terrain // The Cryosphere. 2012. No. 6. P. 51–69.
5. Jones L.A., Kimball J.S., McDonald K.C., Chan S.T.K., Njoku E.G., Oechel W.C. Satellite Microwave Remote Sensing of Boreal and Arctic Soil Temperatures From AMSR-E // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2007. Vol. 45. No. 7. P. 2004–2018.
6. Kerr Y.H., Waldteufel P., Wigneron J.-P., Delwart S., Cabot F., Boutin J., Escorihuela M.-J., Font J., Reul N., Gruhier C., Juglea S.E., Drinkwater M.R., Hahne A., Martin-Neira M., Mecklenburg S. The SMOS Mission: New Tool for Monitoring Key Elements of the Global Water Cycle // Proceedings of the IEEE. 2010. Vol. 98. No. 5. P. 666–687.
7. Mialon A., Coret L., Kerr Y.H., Secherre F., Wigneron J.-P. Flagging the Topographic Impact on the SMOS Signal // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2008. Vol. 46. No. 3. P. 689–694.
8. Mironov V.L., Fomin S.V. Temperature Dependable Microwave Dielectric Model for Moist Soils // Proceedings of PIERS. 2009. P. 831–835.
9. Mironov V.L., De Roo R.D., Savin I.V. Temperature-Dependable Microwave Dielectric Model for an Arctic Soil // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2010. Vol. 48. No. 6. P. 2544–2556.
10. Mironov V.L., Muzalevskiy K.V., Savin I.V. Retrieving Temperature Gradient in Frozen Active Layer of Arctic Tundra Soils From Radiothermal Observations in L-Band-Theoretical Modeling // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2013. Vol. 6. No. 3. P. 1781–1785.
11. Mironov V.L., Savin I.V., Muzalevskiy K.V. A Temperature-Dependent Multi-Relaxation Spectroscopic Dielectric Model for Thawed and Frozen Organic Soil at 0.05–15 GHz // In: Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). 2015a. Vol. 83–84. P. 2031–2034.
12. Mironov V., Savin I. A Temperature-Dependent Multi-Relaxation Spectroscopic Dielectric Model for Thawed and Frozen Organic Soil at 0.05–15 GHz // Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C. 2015b. P. 57–64.
13. Mironov V.L., Molostov I.P., Scherbinin V.V. Dielectric model of a mineral arctic soil thawed and frozen at 0.05–15 GHz // Proceedings of International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 2015c. P. 1–7.
14. NOAA's National Centers for Environmental Information. (2015). [Online]. WMO Weather Station Database. Available: <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/gsoad/>.
15. Pavlov A.V. Active layer monitoring in northern West Siberia // Proceedings of the Permafrost Seventh International Conference. 1998. P. 101–110.
16. Permafrost Laboratory University of Alaska. (2015). [Online]. Marresale database. Available: [http://permafrost.gi.alaska.edu/site/ms1 \(/ms2, /ms3, /ms5\)](http://permafrost.gi.alaska.edu/site/ms1 (/ms2, /ms3, /ms5)).
17. Toolik-Arctic Geobotanical Atlas. (2016). [Online]. Geobotanical Atlas. Available: <http://www.arcticatlas.org/maps/catalog/>.
18. Wigneron J.P., Kerr Y.H., Waldteufel P., Saleh K., Escorihuela M.-J., Richaume P., Ferrazzoli P., de Rosnay P., Gurney R., Calvet J.C., Grant J.P., Guglielmetti M., Hornbuckle B., Matzler C., Pellarin T., Schwank M. L-band microwave emission of the biosphere (L-MEB) model: Description and calibration against experimental data sets over crop fields // Remote Sensing of Environment. 2007. Vol. 107. P. 639–655.
19. Wigneron J., Chanzy A., Kerr Y.H., Lawrence H., Jiancheng Shi, Escorihuela M.J., Mironov V., Mialon A., Demontoux F., de Rosnay P., Saleh-Contell K. Evaluating an Improved Parameterization of the Soil Emission in L-MEB // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2011. Vol. 49. No. 4. P. 1177–1189.
20. Wigneron J.P., Chanzy A., Kerr Y.H., Lawrence H., Jiancheng Shi, Escorihuela M.J., Mironov V., Mialon A., Demontoux F., de Rosnay P., Saleh-Contell K. Correction to "Evaluating an improved parameterization of the

- soil emission in L-MEB [Apr 11 1177-1189]" // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2013. Vol. 51. No. 5. P. 3200–3200.
21. Ye N., Walker J.P., Guerschman J., Ryu D., Gurney R.J. Standing water effect on soil moisture retrieval from L-band passive microwave observations // Remote Sensing of Environment. 2015. Vol. 169. P. 232–242.
 22. Zhao S., Zhang L., Zhang T., Hao Z., Chai L., Zhang Z. An empirical model to estimate the microwave penetration depth of frozen soil // Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). 2012. P. 4493–4496.

Microwave radiometric method for measuring soil temperature in Arctic tundra

V.L. Mironov, K.V. Muzalevskiy, Z. Ruzicka

L.V. Kirensky Institute of Physics SB RAS, Krasnoyarsk 660036, Russia
E-mails: rsdvm@ksc.krasn.ru, rsdkm@ksc.krasn.ru

In this paper, the results of radiothermal remote sensing of soil temperature at a test site on the Yamal Peninsula using full-polarimetry multi-angular brightness temperature (BT) observations at the frequency of 1.4 GHz are presented. The BT data were obtained from the Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) satellite with the SMOS footprint near the Polar Weather Station Marresale and Vaskiny Dachi, the Russian Federation. The SMOS data covered the period from October 22, 2012 to May 10, 2014. The method to retrieve the soil temperature was based on solving an inverse problem by minimizing the norm of the residuals between the observed and predicted values of BT. The calculation of BT was performed using a semi-empirical model of radiothermal emission which incorporated an attenuation of microwaves in snow pack and a temperature-dependent multi-relaxation spectral dielectric model (TD MRSMD) for organic-rich tundra soil. The TD MRSMD was specifically designed on the base of laboratory measurements of complex permittivity of organic-rich soil samples collected at the test site on the Polar Weather Station Marresale. As a result, in case of frozen soil, the values of root-mean-square error (RMSE) and determination coefficient between the retrieved and measured soil temperatures were determined to be 4.5°C and 0.59, respectively. These results indicate the perspectives of using full-polarimetric multi-angular BT observations in the L-band for the purpose of measuring soil temperature in the Arctic region.

Keywords: microwave radiometry, soil measurements, temperature measurement, Arctic region

Accepted: 20.03.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-61-71

References

1. Bobrov P.P., Krivaltsevich S.V., Mironov V.L., Yaschenko A.S., The Effect of Frozen Soil Layer Thickness On Thermal Emission at the wavelength 3.6–11 cm, *Russian Physics Journal*, 2006, Vol. 49, No. 9, pp. 907–912.
2. Bobrov P.P., Mironov V.L., Yashchenko A.S., Diurnal Dynamics of Soil Brightness Temperatures Observed at Frequencies of 1.4 and 6.9 GHz in the Processes of Freezing and Thawing, *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2010, Vol. 55, No. 4, pp. 395–402.
3. FAO/IIASA/ISRIC/ISSCAS/JRC, 2012. *Harmonized World Soil Database (version 1.2)*. FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria.
4. Hachem S., Duguay C.R., Allard M., Comparison of MODIS-derived land surface temperatures with ground surface and air temperature measurements in continuous permafrost terrain, *The Cryosphere*, 2012, No. 6, pp. 51–69.
5. Jones L.A., Kimball J.S., McDonald K.C., Chan S.T.K., Njoku E.G., Oechel W.C., Satellite Microwave Remote Sensing of Boreal and Arctic Soil Temperatures From AMSR-E, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2007, Vol. 45, No. 7, pp. 2004–2018.
6. Kerr Y.H., Waldteufel P., Wigneron J.-P., Delwart S., Cabot F., Boutin J., Escorihuela M.-J., Font J., Reul N., Gruhier C., Juglea S.E., Drinkwater M.R., Hahne A., Martin-Neira M., Mecklenburg S., The SMOS Mission: New Tool for Monitoring Key Elements of the Global Water Cycle, *Proceedings of the IEEE*, 2010, Vol. 98, No. 5, pp. 666–687.
7. Mialon A., Coret L., Kerr Y.H., Secherre F., Wigneron J.-P., Flagging the Topographic Impact on the SMOS Signal, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, Vol. 46, No. 3, pp. 689–694.
8. Mironov V.L., Fomin S.V., Temperature Dependable Microwave Dielectric Model for Moist Soils, *Proceedings of PIERS*, 2009, pp. 831 – 835.

9. Mironov V.L., De Roo R.D., Savin I.V., Temperature-Dependable Microwave Dielectric Model for an Arctic Soil, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, Vol. 48, No. 6, pp. 2544–2556.
10. Mironov V.L., Muzalevskiy K.V., Savin I.V., Retrieving Temperature Gradient in Frozen Active Layer of Arctic Tundra Soils From Radiothermal Observations in L-Band-Theoretical Modeling, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2013, Vol. 6, No. 3, pp. 1781–1785.
11. Mironov V.L., Molostov I.P., Scherbinin V.V. Dielectric model of a mineral arctic soil thawed and frozen at 0.05–15 GHz, *Proceedings of International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, 2015a, pp. 1–7.
12. Mironov V.L., Savin I.V., Muzalevskiy K.V., A Temperature-Dependent Multi-Relaxation Spectroscopic Dielectric Model for Thawed and Frozen Organic Soil at 0.05–15 GHz, *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2015b, Vol. 83–84, pp. 2031–2034.
13. Mironov V., Savin I., A Temperature-Dependent Multi-Relaxation Spectroscopic Dielectric Model for Thawed and Frozen Organic Soil at 0.05–15 GHz, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2015c, pp. 57–64.
14. NOAA's National Centers for Environmental Information. (2015). [Online]. WMO Weather Station Database. Available: <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/g sod/>
15. Pavlov A.V., Active layer monitoring in northern West Siberia, *Proceedings of the Permafrost Seventh International Conference*, 1998, pp. 101–110.
16. Permafrost Laboratory University of Alaska. (2015). [Online]. Marresale database. Available: [http://permafrost.gi.alaska.edu/site/ms1 \(/ms2, /ms3, /ms5\)](http://permafrost.gi.alaska.edu/site/ms1 (/ms2, /ms3, /ms5)).
17. Toolik-Arctic Geobotanical Atlas. (2016). [Online]. Geobotanical Atlas. Available: <http://www.arcticatlas.org/maps/catalog/>
18. Wigneron J.P., Kerr Y.H., Waldteufel P., Saleh K., Escorihuela M.-J., Richaume P., Ferrazzoli P., de Rosnay P., Gurney R., Calvet J.C., Grant J.P., Guglielmetti M., Hornbuckle B., Matzler C., Pellarin T., Schwank M., L-band microwave emission of the biosphere (L-MEB) model: Description and calibration against experimental data sets over crop fields, *Remote Sensing of Environment*, 2007, Vol. 107, pp. 639–655.
19. Wigneron J., Chanzy A., Kerr Y.H., Lawrence H., Jiancheng Shi, Escorihuela M.J., Mironov V., Mialon A., Demontoux F., de Rosnay P., Saleh-Contell K., Evaluating an Improved Parameterization of the Soil Emission in L-MEB, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, Vol. 49, No. 4, pp. 1177–1189.
20. Wigneron J.P., Chanzy A., Kerr Y.H., Lawrence H., Jiancheng Shi, Escorihuela M.J., Mironov V., Mialon A., Demontoux F., de Rosnay P., Saleh-Contell K., Correction to “Evaluating an improved parameterization of the soil emission in L-MEB [Apr 11 1177-1189]”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, Vol. 51, No. 5, pp. 3200–3200.
21. Ye N., Walker J.P., Guerschman J., Ryu D., Gurney R.J., Standing water effect on soil moisture retrieval from L-band passive microwave observations, *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 169, pp. 232–242.
22. Zhao S., Zhang L., Zhang T., Hao Z., Chai L., Zhang Z., An empirical model to estimate the microwave penetration depth of frozen soil, *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2012, pp. 4493–4496.