

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛОВЫХ
И ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ РАДИОТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА В ХОДЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ ЦИКЛОВ ПРОМЕРЗАНИЯ
И ОТТАИВАНИЯ НА ЧАСТОТЕ 1,4 ГГц**

К. В. Музалевский^{1,2*}, А. С. Яценко³, П. П. Бобров³

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

²Институт физики имени Л. В. Киренского СОРАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/38

³Омский государственный педагогический университет
Российская Федерация, 644099, г. Омск, наб. Тухачевского, 14

*E-mail: rsdkm@ksc.krasn.ru

Проведено экспериментальное тестирование возможности восстановления температуры почвенного покрова, находящегося в процессе замерзания и оттаивания, из угловых поляриметрических наблюдений радиояркостной температуры на частоте 1,4 ГГц. Экспериментально исследована чувствительность многоугловых поляриметрических значений радиояркостной температуры относительно глубины промерзания поверхностного слоя почвы. Экспериментально показана возможность идентификации талого и мерзлого состояния почвенного покрова на основе наблюдений радиояркостной температуры. Период исследования охватывает 62 ч с 27 по 30 октября 2016 г. Измерения радиояркостной температуры производились недалеко от г. Омска на сельскохозяйственном поле. Измерения радиояркостной температуры осуществлялось на вертикальной и горизонтальной поляризации на угле наблюдения 10°, 25° и 40°. Калибровка радиометра выполнялась по стандартному методу над водным бассейном и металлическими листами. Синхронно с радиометрическими измерениями проводились измерения влажности, температуры и глубины промерзания почвы. Кроме того, в полевых условиях с использованием портативного анализатора цепей измерялась, синхронно с радиометрическими измерениями, диэлектрическая проницаемость поверхностного слоя почвы на тестовом участке. Для моделирования радиояркостной температуры использовалась простая модель радиотеплового излучения почвенного покрова, не покрытого растительностью. В качестве диэлектрической модели использовалась модель комплексной диэлектрической проницаемости минеральной почвы с высоким содержанием глинистой фракции. Метод восстановления температуры и влажности почвы основан на минимизации нормы невязки между измеренными и рассчитанными значениями радиояркостной температуры. В результате решения обратной задачи получены временные ряды восстановленных значений температуры, влажности и шероховатости поверхности почвенного покрова. Среднеквадратическое отклонение и квадрат коэффициента корреляции между восстановленным и измеренными значениями температуры полностью промерзшей почвы составили 0,6 К и 0,63 соответственно. Восстановленные значения влажности почвы находятся в интервале влажностей почвы от 0,19 до 0,37 см³/см³, измеренных на тестовом участке. Предлагаемая методика восстановления температуры в случае полностью промерзшего излучающего слоя почвы обладает потенциалом для увеличения точности в ходе усложнения используемой модели.

Ключевые слова: радиометрия, талые и мерзлые почвы, влажность, температура, диэлектрическая проницаемость.

Sibirskii Gosudarstvennyi Aerokosmicheskii Universitet
imeni Akademika M. F. Reshetneva. Vestnik
Vol. 18, No. 1, P. 62–68

**EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDY OF MULTI-ANGULAR,
POLARIMETRIC BRIGHTNESS TEMPERATURE OBSERVATION DURING THAW
AND FROZEN SOIL CONDITION AT FREQUENCY OF 1.4 GHz**

K. V. Muzalevskiy^{1,2*}, A. S. Yashenko³, P. P. Bobrov³

¹Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

²Kirensky Institute of Physics SB RAS
50/38, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

³Omsk State Pedagogical University
14, Tukhochevsky, Omsk, 644099, Russian Federation
*E-mail: rsdkm@ksc.krasn.ru

In this study, an experimental testing of the possibility of retrieving of soil temperature, which is in the process of freezing and thawing, from the multi-angular, polarimetric observations of brightness temperature on 1,4 GHz are presented. The sensitivity of multi-angular, polarimetric brightness temperature observations with respect to the depth of freezing of the surface soil layer was experimentally investigated. The possibility of identification of thawed and frozen states of soil on the basis of brightness temperature observations was experimentally demonstrated. The study period covers the 62 hours from October 27 to 30, 2016. Brightness temperature measurements were performed near the city of Omsk in the agricultural field. Brightness temperature measurements were carried out on the vertical and horizontal polarization at an observation angle of 10, 25 and 40 degrees. The calibration of the radiometer was performed by the standard method over the water basin and metal sheets. Synchronously with the radiometric measurements, the measurements of soil moisture, soil temperature and the depth of soil freezing were carried out. Furthermore, in the field using a portable network analyzer, synchronously with radiometric measurements, the permittivity of the soil surface at the test site was measured. To simulate the brightness temperature used simple model of radio emission of soil uncovered vegetation. As the dielectric pattern of the complex permittivity of mineral soils with a high content of clay fraction the permittivity model was used. The temperature recovery method and soil moisture is based on the minimization of the residual norm between measured and calculated values of brightness temperature. As a result of the inverse problem reduces to obtain time series of reconstructed values of temperature, humidity and the roughness of the surface of the soil. The standard deviation and the square of the correlation coefficient between the recovered and measured values of the temperature of the soil in frozen condition appeared to be 0.6 K and 0.63, respectively.

Keywords: radiometry, thawed and frozen soil, humidity, temperature, permittivity.

Введение. Температура и влажность почв играет решающую роль в энергетическом балансе между почвенным покровом и атмосферой, определяя интенсивность процессов тепло- и влагообмена, а также динамику свойств деятельного слоя почвы. Температура и влажность почвы рекомендованы Всемирной метеорологической организацией для наблюдения из космоса и входят в пятьдесят основных климатических переменных [1]. В настоящее время малое количество метеостанций в северных широтах не обеспечивает достаточную полноту данных о температуре и влажности почвы в климатических моделях как глобального, так и регионального масштаба. Недавние исследования [2; 3] показали, что методы спутникового дистанционного зондирования температуры и влажности почвы являются перспективными информационными технологиями для получения дополнительных данных о температуре и влажности почвы.

В работе [2] 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 по 2008 гг. на севере США и Канады. Среднеквадратичное отклонение (СКО) между восстановленными и измеренными значениями температуры почвы варьировалось от 4,4 до 14,7 °С, а коэффициент детерминации (КД) изменялся от 0,49 до 0,92. Одним из основных факторов, ограничивающих использование ИК-радиометров для измерения ТПП, являются неблагоприятные погодные условия (облачность, дождь и т. д.). Так, в соответствии с [1] в 40 % случаев наблюдений MODIS восстановление температуры было невозможно из-за облачности. Кроме того, показано [1], 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 [4] была восстановлена ТПП с использованием усовершенствованного микроволнового сканирующего радиометра (AMSR-E), который работает в диапазоне частот от 6,9 до 89 ГГц, для семи тестовых участков, расположенных на севере США и Канады, за период с 2002 по 2004 гг. 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 до 10,5 °С, КД изменялся от 0,24 до 0,77. При этом, как показывают оценки, выполненные в [5] и [4], толщина эффективно излучающего слоя в случае талой почвы оказывается не более 3 см, а в случае мерзлой почвы не превышает 6 см. Поскольку в диапазоне частот от 6,9 до 89 ГГц снежный покров оказывает значительное влияние на радиотепловое излучение почвы [4; 6], применение частоты 1,4 ГГц, используемой в космическом аппарате SMOS, может существенно уменьшить влияние снежного покрова и увеличить глубину зондируемого слоя почвы.

Спутниковый информационный продукт «Температура почвы», полученный на основе наблюдений микроволновых радиометров, в настоящее время официально не предоставляется ведущими космическими агентствами [7]. По-видимому, как показывают многочисленные исследования, это связано с высокой погрешностью определения температуры почвы, особенно в арктической зоне планеты [4; 7; 8].

Японским и Европейским космическими агентствами, а также NASA созданы информационные

продукты «Влажность почвы» на основе радиометрических измерений спутников GCOM-W1 (многочастотный, 10,7 ГГц, 36,5 ГГц, поляриметрический радиометр AMSR2), SMOS (одночастотный, 1,4 ГГц, многоугловой поляриметрический радиометр MIRAS) и SMAP (одночастотный, 1,4 ГГц, поляриметрический радиометр SMAP) соответственно. Однако, как было показано в самых последних исследованиях [3; 9; 10], для большей части территории России, северной части США и Канады наблюдаются особенно большие погрешности этих спутниковых информационных продуктов. Авторы данных работ связывают высокую погрешность этих информационных продуктов с необходимостью совершенствования моделей радиотеплового излучения с привязкой к физико-географическим условиям, характерным для конкретной зондируемой территории, с использованием физических моделей диэлектрической проницаемости доминирующего типа почвенного покрова.

Ввиду высоких погрешностей существующих радиометрических методов дистанционного зондирования температуры и влажности почвы актуальным является проведение исследований особенностей микроволнового излучения почвенного покрова в процессе увлажнения и высыхания почвы, а также оттаивания и замерзания. В настоящей работе исследуются угловые особенности микроволнового излучения почв на частоте 1,4 ГГц на вертикальной и горизонтальной поляризации в период оттаивания и замерзания почвы с целью повышения точности измерения температуры и влажности почвы.

Тестовый участок и экспериментальные данные.

Для экспериментальных исследований радиояркостной температуры почвенного покрова, находящегося в процессе замерзания и оттаивания, выбран радиометрический полигон ОмГПУ, расположенный в с. Гвоздевка (54° 34' 55" с. ш., 71° 52' 55" в. д.) недалеко от г. Омска. Радиометрический комплекс позволяет проводить измерения угловых зависимостей радиояркостной температуры на частоте 1,4 ГГц в диапазоне углов наблюдения от 10° до 40° (углы отсчитываются от нормали к поверхности почвы) на вертикальной и горизонтальной поляризации с точностью не менее 5 К (после калибровки). Калибровка проводилась по стандартной методике с использованием водного бассейна и металлических листов (рис. 1). Тестовый участок представлял собой мелко бороненный участок сельскохозяйственного поля, со среднеквадратическим отклонением неровностей поверхности почвы менее 1,5 см. Почвенный покров тестового участка имеет следующие геофизические характеристики. Максимальная молекулярная влагоемкость 0,19 см³/см³, наименьший предел пластичности 0,27 см³/см³, гигроскопичность 0,03 см³/см³, содержание глинистой фракции 0,614 г/г, содержание гумуса 8 %, плотность сухого сложения почвы 1,3 г/см³. Максимальное количество связанной воды 0,18 см³/см³.

С целью калибровки диэлектрических свойств почвенного покрова с тестового участка был отобран почвенный образец и проведены измерения комплексной диэлектрической проницаемости с использованием векторного анализатора цепей коаксиально-

волноводным методом. На рис. 2 приведены измеренные значения показателя преломления и поглощения почвенного образца для различных влажностей при температуре 20 °С на частоте 1,4 ГГц. Измеренные значения показателя преломления со среднеквадратическим отклонением 1,02 и квадратом коэффициента корреляции 0,96 описываются моделью [11]. Измеренные значения показателя поглощения со среднеквадратическим отклонением 0,07 и квадратом коэффициента корреляции 0,86 описываются моделью [11]. Для контроля измерений, выполненных в лабораторных условиях, в полевых условиях в течение эксперимента производились измерения КДП почвенного образца, коаксиально-волноводным методом с использованием полевого портативного анализатора цепей FieldFox (N9935A, Agilent). Почвенный образец был отобран с верхнего слоя 0–2 см почвы тестового участка, помещен в коаксиальную ячейку, которая находилась на поверхности почвы в течение всего эксперимента. Методика измерений с использованием коаксиальных ячеек изложена в работе [12]. Влажность почвенного образца составляла 0,22 см³/см³. Измерения проводились синхронно с радиометрическими измерениями. В качестве примера на рис. 3 представлены температурные зависимости рассчитанных (линии) и измеренных (квадратики–ячейки) в полевых условиях значений показателя преломления.

Измеренное значение показателя преломления при температуре –18 °С было получено после проведения эксперимента при охлаждении в морозильной камере. На рис. 3 видно, что модель [11] достаточно хорошо описывает температурный ход абсолютных значений показателя преломления в области как отрицательных, так и положительных температур. Далее при моделировании радиояркостных температур мы будем использовать диэлектрическую модель [11]. Круглосуточные экспериментальные исследования охватывают период с 17 ч 20 мин 27 октября по 13 ч 25 мин 30 октября 2016 г. Общая длительность записей составила около 62 ч. Наблюдения радиояркостной температуры на вертикальной и горизонтальной поляризациях проводились на частоте 1,4 ГГц и на углах 10°, 25°, 40°. Временной интервал между измерениями варьировался от 40 мин до 3 ч в зависимости от скорости изменения радиояркостной температуры. Временные ряды измеренных значений радиояркостных температур представлены на рис. 4. Угловые зависимости измеренных значений радиояркостных температур имеют типичный характер, который соответствует увеличению и уменьшению радиояркостной температуры при увеличении угла наблюдения соответственно для вертикальной и горизонтальной поляризации.

Синхронно с измерениями радиояркостных температур выполнялись измерения температуры почвы на глубинах 0,5, 1,5, 3,0, 5,0, 9,0, 15,0 см (рис. 5) с использованием цифровых термометров. Резкое увеличение радиояркостных температур от –8 ч до 8 ч и от 12 ч до 30 ч сопровождается промерзанием почвенного покрова (сравните рис. 4 и 5). Около –8 ч и 12 ч почва находилась в талом состоянии. Подобные резкие изменения радиояркостной температуры могут служить признаком начала процессов промерзания почвы

и начала процессов оттаивания поверхностного слоя почвы. Также проводились измерения глубины промерзания поверхностной части деятельного слоя почвы. Зависимости радиоярких температур от глубины промерзания почвы изображены на рис. 6.

Экспериментально установлена, что глубина около 2 см является предельной глубиной зондирования

промерзающего почвенного покрова тестового участка, при глубине поверхностно промерзшего слоя больше 2 см радиояркость температуры независимо от поляризации излучения и угла наблюдения приходит в насыщение.

Далее изложена простая модель радиотеплового излучения почвенного покрова тестового участка.



Рис. 1. Процесс калибровки радиометра над водой и металлическим экраном

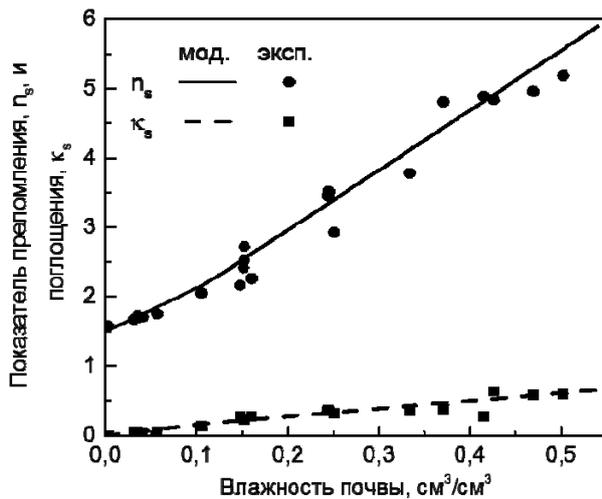


Рис. 2. Экспериментальные и рассчитанные значения показателя преломления и поглощения почвенного образца, отобранного с тестового участка, в зависимости от объемной влажности m_v почвы. Линейные регрессионные зависимости:

$$n_s = 1,339 + 7,984m_v, \quad k_s = 0,03 + 1,113m_v$$

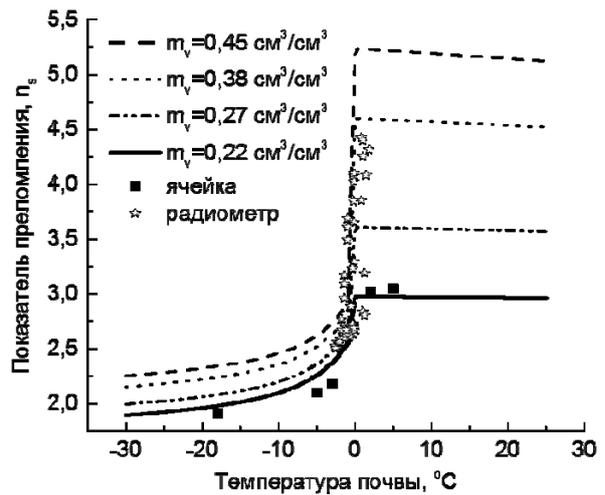


Рис. 3. Температурные зависимости показателя преломления: символы – эксперимент; линии – модель, звездочками отмечены восстановленные из радиометрических измерений значения показателя преломления поверхности почвы в ходе эксперимента

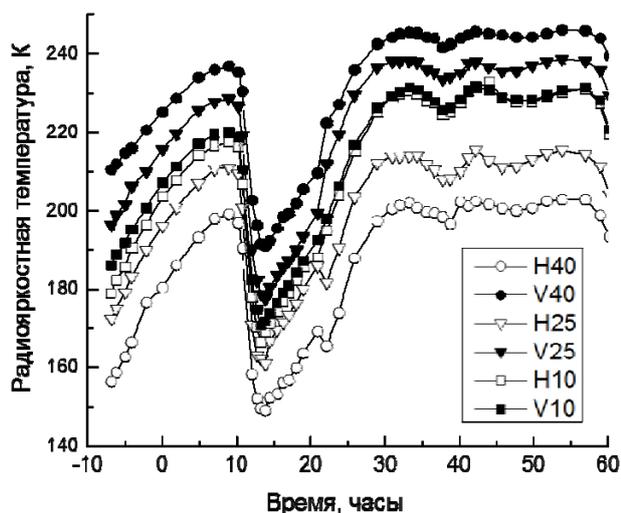


Рис. 4. Временные ряды радиоярких температур, измеренных в ходе круглосуточного эксперимента: символами Н и V отмечены горизонтальная и вертикальная поляризации соответственно; цифрами – угол наблюдения радиояркой температуры. Начало отсчета времени осуществляется от 0 ч 15 мин 27 октября 2016 г.

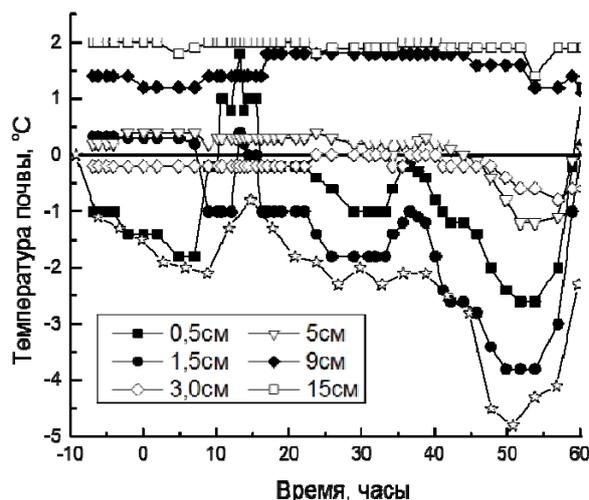


Рис. 5. Временные ряды температуры почвы, измеренные в ходе круглосуточного эксперимента: выколотыми звездочками отмечены значения температуры воздуха по данным метеостанции в с. Гвоздевка. Начало отсчета времени осуществляется от 0 ч 15 мин 27 октября 2016 г.

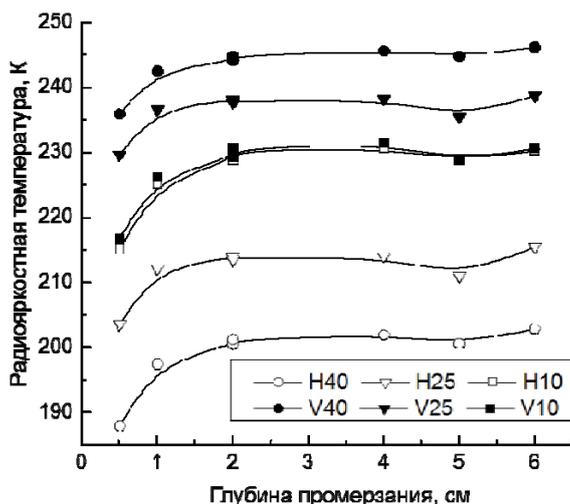


Рис. 6. Зависимость радиояркой температуры от глубины промерзания почвы. Погрешность измерения глубины промерзания ± 1 см

Модель радиотеплового излучения почвенного покрова и методика восстановления влажности и температуры почвы. В силу того, что на тестовом участке в период эксперимента вариации температуры в поверхностном слое почвы (рис. 5) находились в пределах погрешности измерений радиояркой температуры радиометром (около 5 К), будем считать почву однородной по температуре с глубиной. В этом случае будем представлять почвенный покров в виде однородного диэлектрического полупространства. Тогда радиояркая температура $Tb_p^{th}(\theta)$, наблюдаемая под углом θ на горизонтальной ($p = H$) и вертикальной ($p = V$) поляризациях, запишется в виде [13–16]

$$Tb_p^{th}(\theta) = \left(1 - |R_p(\theta, \epsilon_s)|^2 e^{-H_r \cos^2 \theta}\right) \cdot T_s, \quad (1)$$

где T_s – эффективная температура поверхности почвы; $R_p(\theta, \epsilon_s)$ – коэффициент отражения Френеля; H_r – параметр шероховатости поверхности почвы; ϵ_s – комплексная диэлектрическая проницаемость (КДП) почвы. При расчете радиояркой температуры в модели (1) была использована модель диэлектрической проницаемости [11] для минеральной почвы, образец для создания которой был отобран на тестовом участке (см. рис. 2 и 3).

Как видно из рис. 3, показатель преломления талой почвы в большей степени зависит от влажности почвы, чем от температуры. В случае мерзлой почвы,

если содержание влаги в почве больше чем $0,22 \text{ см}^3/\text{см}^3$ (больше количества связанной воды), то показатель преломления почвы 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. В соответствии с уравнением (1) и моделью [11] радиояркая температура почвы $Tb_p^{\text{th}}(\theta)$ может быть представлена как функция следующих переменных: $Tb_p^{\text{th}}(\theta) = Tb_p^{\text{th}}(\theta, m_v/\epsilon_s, T_s, H_r)$. Метод восстановления температуры почвы основан на решении обратной задачи путем минимизации нормы невязки между измеренной радиояркой температурой $Tb_p^m(\theta_i)$ и рассчитанной $Tb_p^{\text{th}}(\theta_i)$ на основе модели (1):

$$F = \sum_{p=H,V} \sum_{i=1}^{N=3} |Tb_p^m(\theta_i) - Tb_p^{\text{th}}(\theta_i)|^2, \quad (2)$$

где N – общее число углов наблюдения радиояркой температуры; $\theta_i = \{10^\circ, 25^\circ, 40^\circ\}$. В результате, при решении обратной задачи восстанавливались следующие параметры задачи: $m_v(\epsilon_s), T_s, H_r$.

Результаты и обсуждение. На первом этапе восстанавливались следующие параметры задачи: показатель преломления почвы $n_s = \sqrt{\epsilon_s}$, эффективная температура почвы T_s и параметр шероховатости поверхности почвы H_r . При этом параметр шероховатости поверхности почвы восстанавливался один для всего временного ряда наблюдений. Восстановленное значение параметра H_r оказалось в среднем равно 0,3.

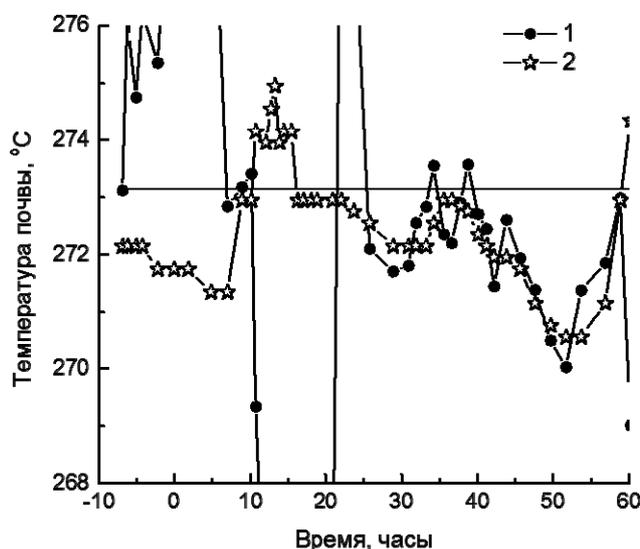


Рис. 7. Временные ряды значений температуры почвы, восстановленных из радиометрических наблюдений (1) и измеренных датчиком (2) на глубине 0,5 см

Восстановленные значения температуры поверхности почвы и показателя преломления показаны на рис. 7 и рис. 8 соответственно.

Как и предполагалось, значения температуры почвы удовлетворительно восстановились в области отрицательных значений, когда поверхностный слой почвы промерз более чем на 1 см и его можно считать однородным. В остальных случаях алгоритм разошелся (рис. 7). Среднеквадратическое отклонение и квадрат коэффициента корреляции между восстановленным и измеренными значениями температуры почвы в интервале от 25 до 60 ч составили 0,6 К и 0,63 К соответственно.

Временной ряд восстановленных значений показателя преломления хорошо коррелирует с ходом температуры почвы. Так, в диапазоне от 10 до 20 ч почва находилась в талом состоянии (рис. 7), в этом интервале на рис. 8 наблюдаются максимальные значения показателя преломления, соответствующие талой почве. Для дальнейшего анализа восстановленные значения показателей преломления почвенного покрова в зависимости от восстановленной температуры почвы изображены на рис. 3, где видно, что относительно диэлектрической модели разброс восстановленных значений показателей преломления почвы соответствует вариациям влажности почвы от $0,22$ до $0,38 \text{ см}^3/\text{см}^3$. В таблице приведены значения влажности почвы, измеренные на тестовом участке на разных глубинах с использованием термостатно-весового метода.

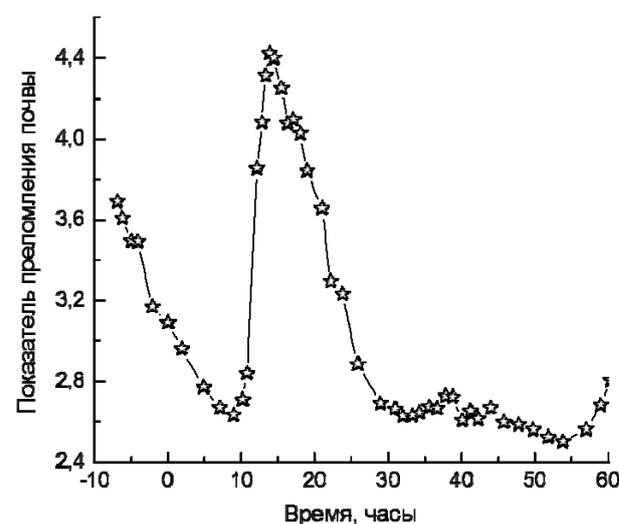


Рис. 8. Восстановленные значения показателя преломления почвенного покрова

Объемная влажности почвы, измеренная на тестовом участке*

| Почвенный слой, см | Время отбора –7 ч | Время отбора 15 ч | Время отбора 38 ч |
|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 0–1 | 0,33 | 0,42 | 0,19 |
| 1–2 | 0,46 | 0,34 | 0,37 |
| 2–3 | 0,49 | 0,45 | 0,51 |
| 3–6 | 0,29 | 0,22 | 0,22 |

*Объемная влажность почвы – $\text{см}^3/\text{см}^3$.

Как видно из рис. 8, 3 и таблицы, восстановленные значения влажности почвы находятся в интервале влажностей почвы от 0,19 до 0,37 см³/см³, измеренных на тестовом участке.

Заключение. Основная цель данной работы заключалась в проведении экспериментального тестирования возможностей одновременного восстановления температуры и влажности почвенного покрова, находящегося в процессе замерзания и оттаивания, из угловых поляриметрических наблюдений радиояростной температуры на частоте 1,4 ГГц. Полученная в данной работе погрешность измерения температуры почвы 0,6 °С 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 0,6 °С.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности в рамках научного проекта № 16-45-242162 и проекта РФФИ № 16-35-50184.

Acknowledgments. The work was funded by the Russian Foundation for Basic Research, Government of Krasnoyarsk Territory, Krasnoyarsk Region Science and Technology Support Fund to the research project № 16-45-242162 and RFBR № 16-35-50184.

References

1. Status of the Global Observing System for Climate. World Meteorological Organization. Chairperson. Publications Board. October. 2015, P. 373.
2. 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.
3. Muskett R. R., Romanovsky V. E., Cable W. L., Kholodov A. L. Active-Layer Soil Moisture Content Regional Variations in Alaska and Russia by Ground-Based and Satellite-Based Methods, 2002 through 2014. *International Journal of Geosciences*. 2015, Vol. 6, P. 12–41.
4. 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.
5. 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.
6. Schwank M., Mätzler C., Wiesmann A., Wegmüller U., Pulliainen J., Lemmetyinen J., Rautiainen K., Derksen K., Toose P., Drusch M. Snow Density and Ground Permittivity Retrieved from L-Band Radiometry: A Synthetic Analysis. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2015, Vol. 8, No. 8, P. 3833–3845.
7. OSCAR. Observing Systems Capability Analysis and Review Tool. [Online]. Gap analyses by variable or by type of mission. Available: <https://www.wmo-sat.info/oscar/gapanalyses?variable=96>.
8. Zhou J., Dai F., Zhang X., Zhao S., Li M. Developing a temporally land cover-based look-up table (TL-LUT) method for estimating land surface temperature based on AMSR-E data over the Chinese landmass. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2015, Vol. 34, P. 35–50.
9. Kerr Y. H., Al-Yaari A., Rodriguez-Fernandez N., Parrens M., Molero B., Leroux D., Bircher S., Mahmoodi A., Mialon A., Richaume P. Overview of SMOS performance in terms of global soil moisture monitoring after six years in operation. *Remote Sens. Environ.* 2016, Vol. 180, P. 40–63.
10. Al-Yaari A., Wigneron J. P., Ducharme A., Kerr Y., de Rosnay P., de Jeu R., Govind A., Al Bitar A., Albergel C., Munoz-Sabater J. Global-scale evaluation of two satellite-based passive microwave soil moisture datasets (SMOS and AMSR-E) with respect to Land Data Assimilation System estimates. *Remote Sens. Environ.* 2014, Vol. 149, P. 181–195.
11. Muzalevskiy K. V., Yury L. Effects of organo-mineral structure of arctic topsoil on the own thermal radiation in the L-band. 2015. *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. Omsk, 2015, P. 1–4.
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*. Available online 14 March 2015.
13. Wigneron J. P. 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.
14. Njoku E. G. AMSR Land Surface Parameters. Surface Soil Moisture, Land Surface Temperature, Vegetation Water Content. Algorithm theoretical basis document. Jet Propulsion Laboratory. California Institute of Technology. 1999, 47 p.
15. O'Neill P., Chan S., Njoku E., Jackson T., Bindlish R. Soil moisture active passive (SMAP) algorithm theoretical basis document Level 2 & 3 soil moisture (passive) data products. Jet Propulsion Laboratory. California Institute of Technology. 2014, 77 p.
16. Koike T. Description of the GCOM-W1 AMSR2. Soil Moisture Algorithm Descriptions of GCOM-W1 AMSR2 Level 1R and Level 2 Algorithms, Japan Aerospace Exploration Agency. Earth Observation Research Center. 2013, 119 p.