

# Влияние гидрофизических характеристик почв на изменение радиояркостной температуры при промерзании или оттаивании поверхностного слоя

П.П. Бобров<sup>1</sup>, П.В. Жиров<sup>2</sup>, С.В. Кривальцевич<sup>3</sup>, А.С. Яценко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН,  
660036, Красноярск, Академгородок  
E-mail: [rsd@ksc.krasn.ru](mailto:rsd@ksc.krasn.ru)*

<sup>2</sup>*Омский государственный педагогический университет,  
644099, Омск, наб. Тухачевского, 14  
E-mail: [x\\_rays1@mail.ru](mailto:x_rays1@mail.ru)*

<sup>3</sup>*Омский государственный университет,  
644077, Омск, ул. Мира, 55а  
E-mail: [kriser2002@mail.ru](mailto:kriser2002@mail.ru)*

Приведены результаты исследования динамики радиояркостной температуры на длинах волн от 3,6 до 50 см в процессах замерзания и оттаивания почвенной влаги. В этих процессах на временных диаграммах радиояркостной температуры вблизи точки замерзания свободной воды часто наблюдаются интерференционные максимумы и минимумы, обусловленные наличием тонких слоев промерзшей или оттаявшей почвы. Обнаружено, что величина осцилляций зависит от количества связанной воды в почве и определяется содержанием глины и почвенного гумуса. Тяжелые глинистые почвы с высоким содержанием гумуса имеют из-за высокой пористости низкую теплопроводность, в этих почвах из-за высокой удельной поверхности значительная доля почвенной влаги находится в связанном состоянии. Благодаря этому процесс изменения диэлектрической проницаемости растягивается во времени, поскольку связанная вода замерзает при более низкой температуре, чем свободная вода.

Информация о сезонных циклах промерзания и оттаивания почв представляет интерес для моделирования климата, для изучения потоков тепла и влаги между подстилающей поверхностью и атмосферой. Процессы таяния и замерзания в арктических районах определяют более половины теплового баланса. Время схода снега и оттаивания почв в одном и том же регионе меняется год от года, причем эти временные вариации могут составлять от недели до месяца. А от времени оттаивания почв зависит также интенсивность прироста растительности в начальный период вегетации.

Дистанционные микроволновые методы обладают значительным потенциалом для получения такой информации. При микроволновом зондировании почв измеряемые величины (радиояркостная температура в пассивном методе, коэффициент обратного рассеяния – в активном) зависят в значительной степени от диэлектрической проницаемости почв и шероховатости поверхности. Диэлектрическая проницаемость (ДП) влажных почв может варьироваться у разных типов почв при одном и том же влагосодержании как за счет изменения ДП твердой фазы, так и, в большей степени, за счет ДП связанной воды и ее максимально возможного количества. Промерзание грунта влечет резкое уменьшение его диэлектрической проницаемости за счет замерзания свободной воды, так как ДП льда меньше, чем ДП воды. При этом коэффициент обратного рассеяния изменяется на 3-4 дБ, а радиояркостная температура более чем на 50 К [1] (при большой влажности почвы).

Радиометрические [2] радиолокационные [3] космические изображения низкого разрешения уже используются для картирования промерзания почв в континентальных масштабах.

При повышении пространственного разрешения выявляется очаговость промерзания, имеющая место вследствие локальных вариаций высоты участков, значений влажности, гидрофизических характеристик почв, шероховатости поверхности и других причин. Почвенные участки, имевшие в талом состоянии близкие значения радиояркостной температуры, в период промерзания до глубин, не превышающих глубину

зондирования на соответствующих длинах волн, могут иметь существенно различающиеся значения радиояркости.

Промерзание верхнего слоя приводит также к увеличению глубины зондирования - толщины эффективно излучающего слоя. Диэлектрическая проницаемость этого слоя существенно ниже, он становится более "прозрачным", так как его вклад в общее излучение заметно снижается.

С целью определения вклада слоя определенной толщины в общее излучение нами использовалась слоистая модель почвы и метод переноса излучения [4]. Найдено, что при средней увлажненности толщина непромерзшего зондируемого слоя на длине волны 50 см составляет около 14 см. При толщине промерзшего слоя такой почвы, равной 14 см, глубина зондируемого слоя увеличивается до 20 см. На длине волны 18 см промерзание слоя толщиной 14 см приводит к возрастанию глубины зондируемого слоя с 6 до 14 см. Анализ показал, что увеличение глубины зондирования является наибольшим, когда весь слой, вносящий основной вклад в излучение, является промерзшим. При этом глубина зондирования увеличивается в 1,5-2 раза (при различной начальной увлажненности), а крутизна радиационно-влажностной зависимости уменьшается в 1,5-2,5 раза.

Для экспериментальной проверки этих результатов нами обработаны данные эксперимента, проводимого в период 12-16 ноября 1987 г., с самолетным радиометрическим комплексом на длинах волн 50 и 15 см. Радиояростная температура полей (чистый пар), имеющих размеры  $3 \times 5 \text{ км}^2$ , измерялась при пролете вдоль середины поля в прямом и обратном направлении. Ввиду установившихся отрицательных температур воздуха промерзание верхнего слоя почвы было устойчивым, но не очень быстрым из-за наличия сухого снежного покрова толщиной 7-10 см. По данным прямых измерений толщина промерзшего слоя изменялась на протяжении указанного периода от 8-10 до 15-20 см со средней скоростью 2-2,5 см/сут. Температура поверхностного слоя почвы составляла  $-6 \div -10^\circ\text{C}$  и уменьшалась с глубиной до  $0^\circ\text{C}$  на нижней границе промерзшего слоя.

Изменение средней радиояростной температуры трех близко расположенных полей показано на рис. 1. На начальном этапе промерзания радиояростные температуры разных полей на одной и той же длине волны отличались не более чем на 5-6 К. Такое же различие наблюдалось и в конце периода наблюдения. Однако в середине периода различие составило 10-12 К. Это связано с разной глубиной промерзания на разных полях на момент начала измерений. В начальной стадии промерзания средняя радиояростная температура  $T_{\text{я}}$  в связи с уменьшением диэлектрической проницаемости увеличивается при увеличении толщины промерзшего слоя. После того как глубина промерзшего слоя превысит глубину зондирования радиояростная температура начинает уменьшаться из-за уменьшения термодинамической температуры почвы.

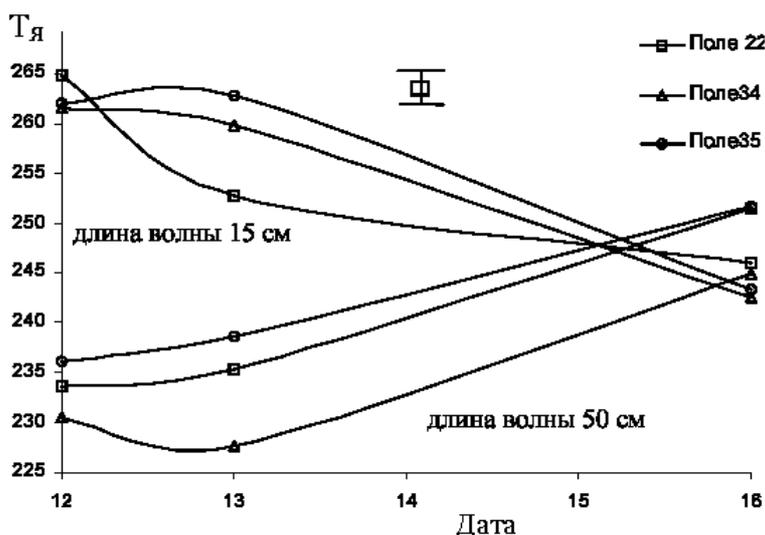


Рис. 1. Изменение радиояростной температуры полей на длинах волн 15 и 50 см в процессе промерзания верхнего слоя почвы (самолетный эксперимент 12-16 ноября 1987 г.)

Как следует из представленных результатов, к моменту начала измерений толщина промерзшего слоя на поле 22 превысила глубину зондирования на длине волны  $\lambda=15$  см, поскольку в процессе измерений радиояркая температура уменьшалась. На поле 35 вначале наблюдался некоторый рост радиояркой температуры, что свидетельствует о том, что в это время глубина зондирования была немного больше толщины промерзшего слоя. Это подтверждает сделанные оценки глубины зондирования промерзшей почвы (8-10 см на  $\lambda=15$  см).

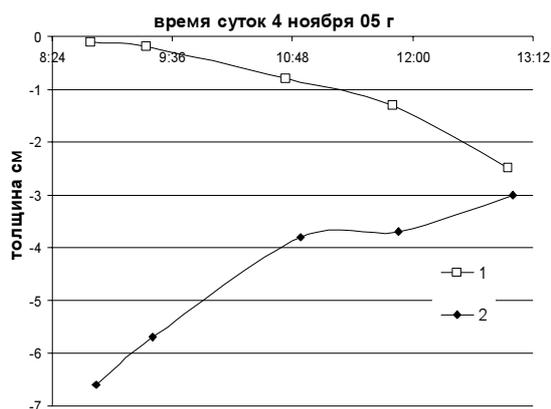
На длине волны 50 см наблюдалось возрастание средней радиояркой температуры полей, поскольку толщина промерзшего слоя была меньше глубины зондирования, составляющей для промерзшей почвы около 20 см.

Таким образом, подтверждается ожидаемое увеличение глубины зондирования при промерзании почв. Разброс значений радиояркой температуры в процессе промерзания объясняется как пространственными вариациями глубины промерзания, так и интерференцией излучения, вызванной появлением слоистой структуры с резким различием диэлектрической проницаемости в талых и промерзших слоях.

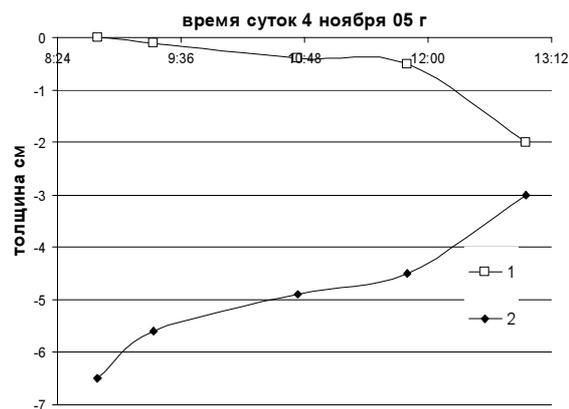
Явление интерференции наиболее отчетливо проявляется при повышении пространственного разрешения и проведении измерений через малые временные интервалы. Такие исследования проводились нами в весенние и осенние периоды 2002-2005 гг. Участки площадью примерно  $2,5 \text{ м}^2$  имели существенно различающиеся гидрофизические свойства, обусловленные различным гранулометрическим составом и различным содержанием гумуса (табл. 1). Участок №1 представлял собой слой песка толщиной не менее 15 см. Второй участок представлял собой слой почвообразующей породы (горизонт С) с низким содержанием гумуса. Третий участок представлял собой естественную почву. Радиояркая температура на длинах волн 3,6, 5 и 11 см на горизонтальной поляризации под углом  $\theta=10^\circ$  от надира измерялась с периодичностью около 15 мин. Описание экспериментальной установки приведено в [5].

Таблица 1. Характеристики исследованных почвенных участков

№ участка	Содержание физической глины, %	Содержание гумуса, %	Объемная влажность, (04.11.2005) $\text{см}^3/\text{см}^3$
1	5-10	нет	0,10
2	43,9	0,6	0,24
3	36,1	6,6	0,36



а)



б)

Рис. 2. Движение верхней (1) и нижней границ (2) промерзшего слоя на участках 2(а) и 3 (б)

Результаты эксперимента, проведенного 4 ноября 2005 г., приведены на рис. 2-4. В ночь перед проведением измерений почвенный покров промерз на глубину 7 см, и в течение дня 4 ноября происходило

уменьшение толщины промерзшего слоя как сверху, так и снизу (рис. 2). К моменту начала измерений на поверхности появился оттаявший слой толщиной около 1 мм. К 14 часам почва в промерзшем состоянии существовала на глубине от 3,5 до 4 см. К 15 часам процесс оттаивания был полностью завершен. Температура поверхностного слоя участков (0-1 см) до 11 часов была около 0 градусов, практически не изменяясь, после чего начала возрастать (рис. 3)

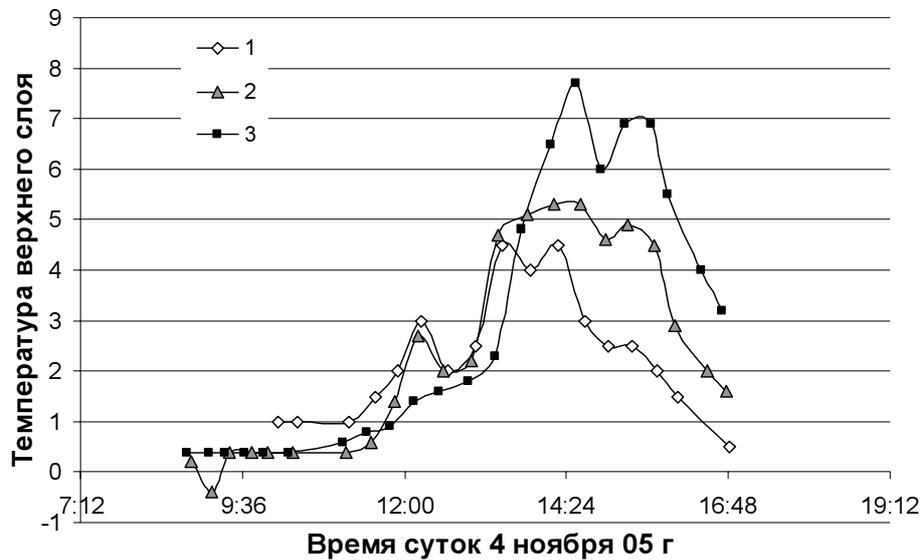


Рис. 3. Изменение термодинамической температуры верхнего слоя почв

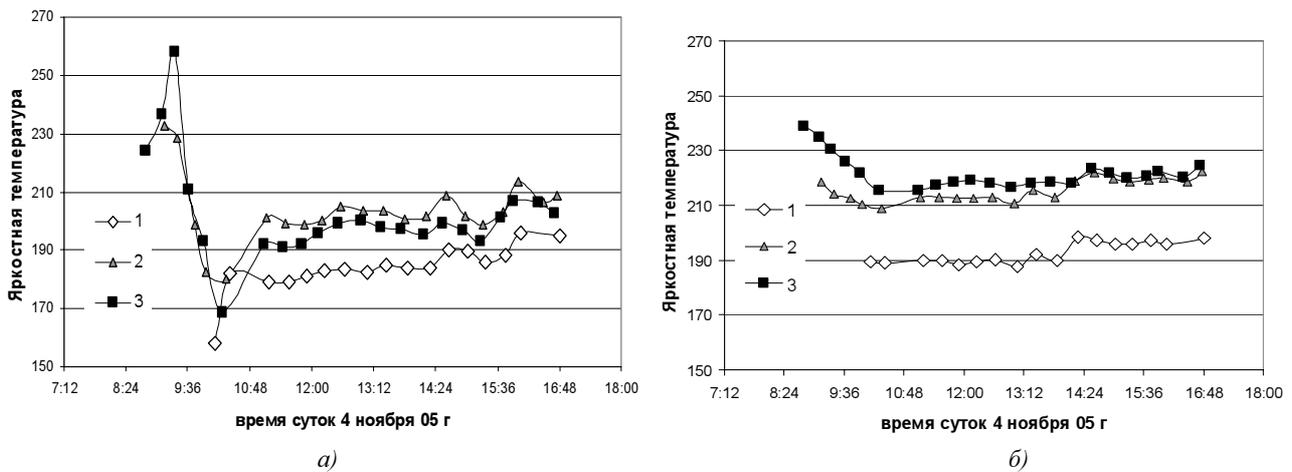


Рис. 4. Изменение радиояркостной температуры на длине волны 3,6 см (а) и 5 см (б) трех почвенных участков, параметры которых приведены в табл. 1

На рис. 4а приведена динамика радиояркостной температуры на длине волны 3,6 см. Уменьшение значений, связанное с возрастанием толщины оттаявшего слоя на поверхности, продолжалось до 10 часов, т.е. до тех пор, пока толщина оттаявшего слоя не превысила глубины зондирования (менее 1 см). Дальнейшие изменения радиояркостной температуры связаны с небольшим повышением температуры почвенных участков (рис.3).

Осцилляции радиояркостной температуры на длине волны 5 см (рис. 4б) в начальный период измерений обусловлены отражением от границы верхнего оттаявшего и промерзшего слоев, поскольку нижняя граница промерзшего слоя находится за пределами глубины зондирования (рис.3). С увеличением толщины верхнего оттаявшего слоя и опусканием его нижней границы ниже предельной глубины зондирования ос-

цилляции практически прекращаются. Таким образом, излучающую среду на этой длине волны можно считать двухслойной: верхний слой – талый, нижний слой – промерзший.

Термодинамические температуры талого и промерзшего слоев мало отличались от 0°C, поэтому среду можно считать изотермической. Радиояркостную температуру изотермической плоскостной среды с резкими границами можно рассчитать через коэффициент отражения плоской волны от такой среды:  $T'_я = (1 - R)T$ , где  $T$  – термодинамическая температура среды.

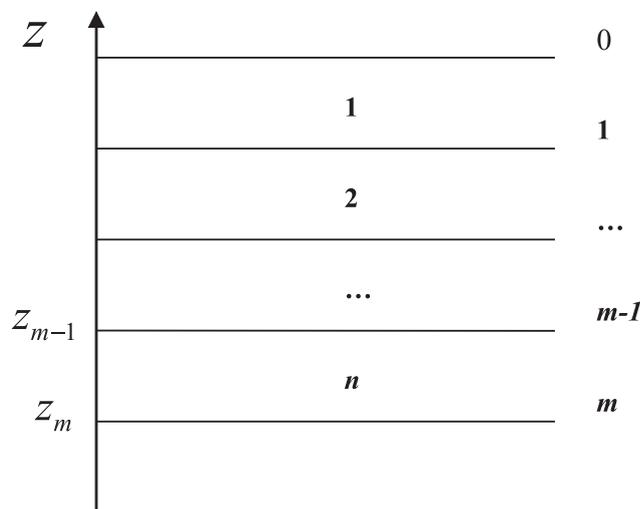


Рис. 5. Представление поверхностного слоя почвы в виде плоскостной среды

Среда разбивается на тонкие плоские слои (рис.5) и коэффициент отражения от такой структуры вычисляется путем многократного применения выражения для коэффициента отражения (по амплитуде) от двухслойной среды, имеющего в случае гладкой верхней границы вид:

$$r'_0 = \frac{r_0 + r'_1 \exp(2jk_{z1}\Delta Z_1)}{1 + r_0 r'_1 \exp(2jk_{z1}\Delta Z_1)},$$

где  $r'_0$  – комплексный коэффициент отражения многослойной среды на границе  $m=0$  (почва-воздух);  $r_0$  – комплексный френелевский коэффициент отражения на этой границе;  $r'_1$  – комплексный коэффициент отражения на границе  $m=1$  от многослойной среды, лежащей ниже пер-

вого слоя и определяемый по (2), но со сменой индексов 0 на 1 и 1 на 2;  $k_{zn} = k_0 \sqrt{\epsilon_n - \sin^2 \theta}$  – проекция комплексного волнового числа среды  $n$ -го слоя на ось  $z$ ;  $\epsilon_n$  – комплексная диэлектрическая проницаемость  $n$ -го слоя,  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$  – волновое число в вакууме,  $\Delta Z_n$  – толщина  $n$ -го слоя. Комплексные френелевские коэффициенты на границах раздела сред для горизонтальной поляризации определяются по формуле

$$r'_n = \frac{k_{zn} - k_{z(n-1)}}{k_{zn} + k_{z(n-1)}}.$$

Расчет радиояркостной температуры на длине волны 5 см в двухслойном приближении показал, что хорошее совпадение с результатами эксперимента получается, если диэлектрическую проницаемость промерзшей почвы принять равной 4,5 (рис.6). Это существенно выше, чем диэлектрическая проницаемость смеси сухой почвы со льдом (около 3), что свидетельствует о наличии в почве незамерзшей связанной воды. Если представлять промерзшую почву в виде смеси сухой почвы и связанной воды, то в соответствии с рефракционной моделью для получения диэлектрической проницаемости смеси, равной 4,5 диэлектрическая проницаемость связанной воды должна быть равна 10 при ее максимальном количестве в данной почве 0,22 см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup> и плотности почвы, равной 1,2 г/см<sup>3</sup> [6]. Расчетная кривая лежит ниже экспериментальной на 15-20 К. Это связано с тем, что в расчетах не учитывалась шероховатость поверхности, приводящая к возрастанию яркостной температуры. Таким образом, в радиометрическом эксперименте выявляется существенная роль связанной воды в промерзшей почве при температурах лишь не намного меньше 0°C.

На рис.7 приведены данные об изменении радиояркостной температуры в описываемом эксперименте на длине волны 11 см. Ввиду большей глубины зондирования на радиояркостную температуру влияет также отражение на нижней границе оттаявшего слоя, поэтому излучающая структура является трехслойной: верхний слой – талая почва, затем слой промерзшей почвы и далее полубесконечный слой талой почвы. Как следует из данных, приведенных на рис.3, скорость изменения толщины промерзшего слоя различна в

почвах с разным содержанием гумуса. В первую очередь это объясняется различной теплопроводностью. Высокогумусная почва обладает большей пористостью и вследствие этого меньшей теплопроводностью.

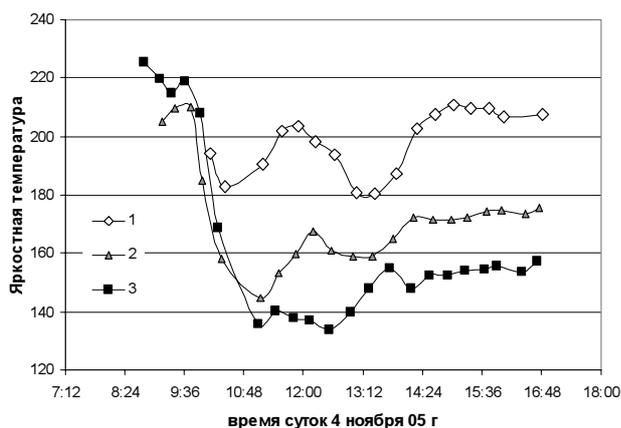


Рис. 6. Сопоставление экспериментальных данных (1) о динамике радиояростной температуры участка 2 и модельных расчетов в предположении о полном замерзании почвенной влаги (2) и в предположении о наличии незамерзшей связанной воды(3)

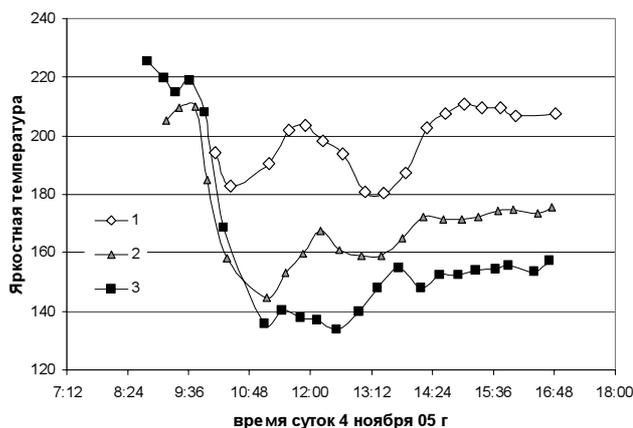
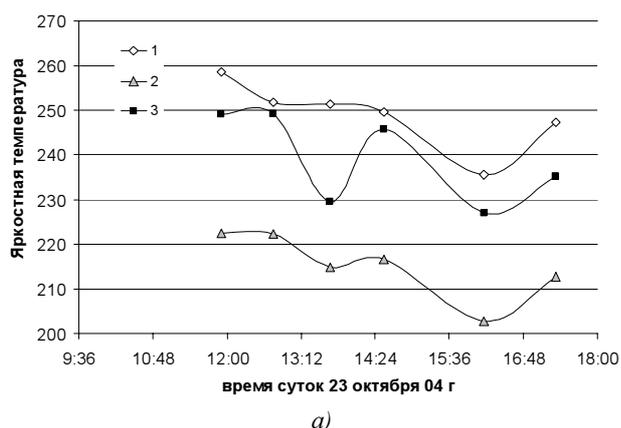
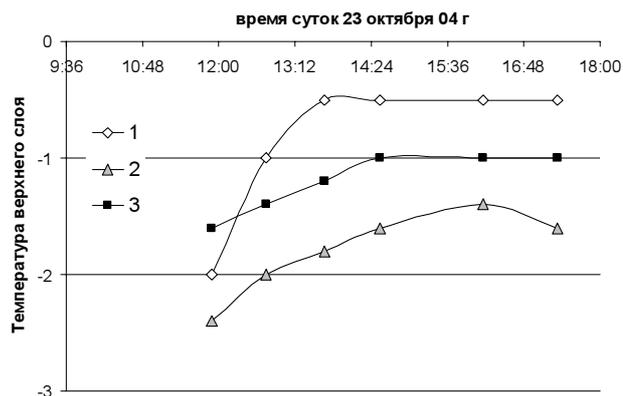


Рис. 7. Изменение радиояростной температуры на длине волны 11 см трех почвенных участков, параметры которых приведены в табл. 1



а)



б)

Рис. 8. Вариации радиояростной температуры на длине волны 11 см (а) при изменении термодинамической температуры в области отрицательных значений (б)

Поэтому в период времени между 10:48 и 12:00 толщина промерзшего слоя высокогумусного участка изменялась медленнее (рис. 2), что отражено в медленном изменении радиояростной температуры (рис.7). Наиболее высокой теплопроводностью обладал участок песчаного грунта, что отражается в частых осцилляциях. Кроме того, этот грунт почти не содержит связанной воды, поэтому диэлектрическая проницаемость в соседних слоях изменяется более резко, что и отражается в высокой амплитуде осцилляций.

Ввиду более сложной структуры излучающего слоя на длине волны 11 см моделирование радиояростной температуры не дало хорошего совпадения с экспериментом. Причиной этого является также неодинаковость толщины промерзшего и оттаивающего слоя в пределах участка, наблюдавшаяся в эксперименте.

Наличие связанной воды в большом количестве может приводить к осцилляциям радиояростной температуры при изменении термодинамической температуры в области отрицательных значений, то есть без оттаивания свободной воды. На рис. 8 приведены результаты измерений радиояростной температуры в эксперименте, когда термодинамическая температура почвы изменялась от -2,5 до -0,5°C. При температуре около -1°C (в 13:45) на поверхности высокогумусного участка появился четвертьволновый слой с повы-

шенной относительно остальной почвы диэлектрической проницаемостью, вследствие чего коэффициент отражения увеличился, а радиояркая температура упала.

На других участках такого слоя не появилось, так как в песчаной почве связанная вода практически отсутствует, а температура малогумусного участка была ниже той, при которой диэлектрическая проницаемость связанной воды резко возрастает. Таким образом, осцилляции на временных диаграммах радиояркой температуры при отрицательных значениях (в °С) термодинамической температуры свидетельствуют о наличии в почве связанной воды в достаточно большом количестве.

Измерения, проводимые нами в других экспериментах, показывают, что осцилляции радиояркой температуры при переходе почвы от талого состояния к промерзшему наиболее часто возникают в тяжелых суглинистых почвах с высоким содержанием гумуса, где связанная вода содержится в значительных количествах. Это объясняется тем, что диэлектрическая проницаемость связанной воды существенно выше, чем диэлектрическая проницаемость льда, и в естественных условиях могут на поверхности почвы появляться согласующие или отражающие слои, приводящие к возрастанию или уменьшению радиояркой температуры.

Время существования максимумов или минимумов определяется скоростью изменения толщины промерзающего или оттаивающего слоя, которая зависит от метеопараметров атмосферы и гидрофизических свойств почв: влажности, теплопроводности, пористости, структуры, степени черноты в видимом и ИК-диапазонах и др.

На динамику радиояркой температуры влияют также диэлектрическая проницаемость, количество связанной воды и степень шероховатости поверхности.

Работа выполнена по программе Роснауки "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники на 2002-2006 годы", госконтракт № 02.434.11.7018.

## Литература

1. Schwank M., Stahl M., Wydler H., Leuenberger J., Mätzler C., Flüher H. Microwave L-Band Emission of Freezing Soil// IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2004. V. 42. No 6. P. 1252-1260.
2. Мелентьев В.В., Йоханнесен О.М., Донченко О.Г. Спутниковый SMMR/SSM/I мониторинг многолетне- и сезонномерзлых грунтов Ямальского полуострова и северных районов Западной Сибири // Сборник докладов всероссийской научной конференции "Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы аэрокосмическими средствами" 20-22 июня 2001 г. Муром. 2001. С.167-171.
3. Wismann V. Monitoring of Seasonal Thawing in Siberia with ERS Scatterometer Data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000. Vol. 38, No. 4. P.1804-1809.
4. Burke W.J., Schmugge T.J., Paris Y.E. Comparison of 2,8 and 21 cm microwave radiometer observation over soil with emission model calculations. // J. Geophys. Res., 1979. No C1. P.278 - 294.
5. Бобров П.П., Ивченко О.А., Кривальцевич С.В. Исследование почвенной структуры методом двухчастотной микроволновой радиометрии // Исследование Земли из космоса, 2005. № 2. С. 82-88.
6. Беляева Т.А., Бобров А.П., Бобров П.П., Галеев О.В., Мандрыгина В.Н. Определение параметров моделей диэлектрической проницаемости почв с различной плотностью и различным содержанием гумуса по данным экспериментальных измерений в частотном диапазоне 0,1-20 ГГц // Исследование Земли из космоса, 2003. № 5. С. 28-34.