

## Излучательные характеристики трехслойных сред с тонким промежуточным слоем в СВЧ-диапазоне

А.А. Гурулев, А.О. Орлов, С.В. Цыренжапов

*Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН  
672090 г. Чита, ул. Бутина, д.26  
Тел.: (3022)35-40-63; E-mail: lgc255@mail.ru*

В работе исследовано поведение радиояркостной температуры в СВЧ-диапазоне трехслойных сред с тонким промежуточным слоем с резко отличающимся значением диэлектрических свойств тонкого слоя. Выполнены как натурные измерения таких сред (почвы и ледяного покрова), так и расчеты при различных углах наблюдения для двух линейных поляризаций (горизонтальной и вертикальной). Установлено, что наблюдаются интерференция радиотеплового излучения в зависимости от толщины промежуточного слоя. Кроме того, определены условия при которых значение мощности теплового излучения на горизонтальной поляризации превосходит значения на вертикальной.

**Ключевые слова:** радиояркостная температура, слоистые среды, поляризация.

### Введение

Исследование радиотеплового излучения трехслойных сред с тонким промежуточным слоем, сравнимым с длиной волны в СВЧ-диапазоне, представляет значительный интерес в виду того, что такие среды широко распространены в природе. Примерами являются: грунт при начальной стадии его замерзания (из-за вымораживания верхнего слоя среды), плоские земные покровы при высушивании верхнего слоя грунта, снег на поверхности грунта, ледяной покров на поверхности воды и т.д.

Интересно отметить, что при измерениях теплового излучения на двух линейных поляризациях (горизонтальной и вертикальной) наблюдаются особенности. Так при формировании ледяного покрова, обнаружены некоторые особенности поведения радиояркостной температуры на ортогональных поляризациях (Liu et al., 1998; Бордонский и др., 2005). Авторами установлено, что при некоторых толщинах льда значение радиояркостной температуры на горизонтальной поляризации превосходит значения на вертикальной поляризации.

Кроме того, некоторые исследователи наблюдали аномальные свойства радиотеплового излучения и других слоистых сред. Так в работе (Яценко, 2009) обнаружено, что при замерзании грунта радиояркостная температура на горизонтальной поляризации, в некоторый момент времени, имела большее значение, чем на вертикальной поляризации на длинах волн 5 см и 21 см. Автором работы объяснение данного эффекта не дано.

Для исследования природных объектов с использованием ИСЗ используется угол наблюдения (который отсчитывается от вертикали) меньше  $60^\circ$ . Однако при увеличении интервала углов наблюдения возможно получение дополнительной информации.

Таким образом, в радиометрии можно выделить задачи об излучении трехслойной среды с тонким промежуточным слоем и плоскими границами в широком интервале углов наблюдения. В настоящей работе изучено излучение слоистых сред на примере ледяного покрова, сухого грунта, расположенного на влажном полубесконечном грунте, и промер-

зающего грунта при различных углах наблюдения, в том числе, больших, чем угол Брюстера для границы воздух – тонкий промежуточный слой на горизонтальной и вертикальной поляризациях.

## Расчеты

При расчете мощности теплового излучения исследуемых сред применялась методика расчета радиояркой температуры ( $T_{я}$ ) слоистой неизотермической среды (Клепиков, Шарков, 1992) для двух ортогональных поляризаций вертикальной ( $ВП$ ) и горизонтальной ( $ГП$ ).

Расчеты выполнены для пресного ледяного покрова, лежащего на водной поверхности, представляющей из себя полубесконечную среду (для длин волн 0,88 см и 2,3 см) и для сухого грунта, лежащего на более влажном слое (для длины волны 20 см). При выполнении вычислений необходимо знание мнимой ( $\varepsilon''$ ) и действительной ( $\varepsilon'$ ) части комплексной диэлектрической проницаемости сред.

Так, для пресной воды, они определялись по теории Дебая с использованием аппроксимационного выражения для статической диэлектрической проницаемости (Klein, Swift, 1977) и времени релаксации (Ray, 1972). Значения этих величин были рассчитаны как функции длины волны и температуры пресной воды (Митник, 1978).

Для пресного льда действительную часть комплексной диэлектрической проницаемости льда принимаем равной  $\varepsilon' = 3,15$  (Matzler, Wegmuller, 1987). Мнимую часть комплексной диэлектрической проницаемости для льда, содержащего небольшие концентрации солей, определим по формуле (Matzler, Wegmuller, 1987)

$$\varepsilon'' = \varepsilon''_0 + D(T, f) \cdot S, \quad (1)$$

где  $\varepsilon''_0$  – мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости льда, не содержащего включений;  $D(T, f)$  – коэффициент, зависящий от температуры льда ( $T$ ) и частоты ( $f$ );  $S$  – концентрация солей во льду в мг/кг.  $\varepsilon''_0$  и  $D(T, f)$  для льда с преобладанием в них  $NaCl$  представлены в (Бордонский, Гурулев, 2008).

При расчетах радиояркой температуры почвогрунтов значения действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости сухого грунта принимались соответственно,  $\varepsilon' = 3,5$  и  $\varepsilon'' = 0,014$  (Шутко, 1986). Для увлажненных грунтов применялась «рефракционная» модель для смеси (модель Брауна). Диэлектрическая проницаемость увлажненного грунта:

$$\sqrt{\varepsilon_i} = \rho_w \sqrt{\varepsilon_w} + (1 - \rho_w) \sqrt{\varepsilon_c}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_i$ ,  $\varepsilon_w$ ,  $\varepsilon_c$  – диэлектрическая проницаемость смеси, воды и сухого грунта;  $\rho_w$  – относительная объемная концентрация воды. При расчетах для промежуточного слоя грунта относительная объемная концентрацией воды принималась равной 2%, а для нижнего полубесконечного слоя грунта брали значение влажности 40%. Ширину диаграммы направленности антенны для данного случая брали равной 10°, а ширина полосы пропускания радиометра принималась 10% от центральной частоты.

При вычислении радиояркой температуры были получены следующие результаты. На рис. 1 приведены графики зависимостей  $T_{я}$  от толщины ледяного покрова на длине волны 0,88 см при трех значениях угла наблюдения. Полосы частот выбирались равными

8% от центральной частоты. Соленость ледяного покрова принималась равной  $S=5$  мг/кг. Результаты расчетов для грунтов для углов наблюдений  $40^\circ$ ,  $60^\circ$  и  $80^\circ$  приведены на рис. 2.

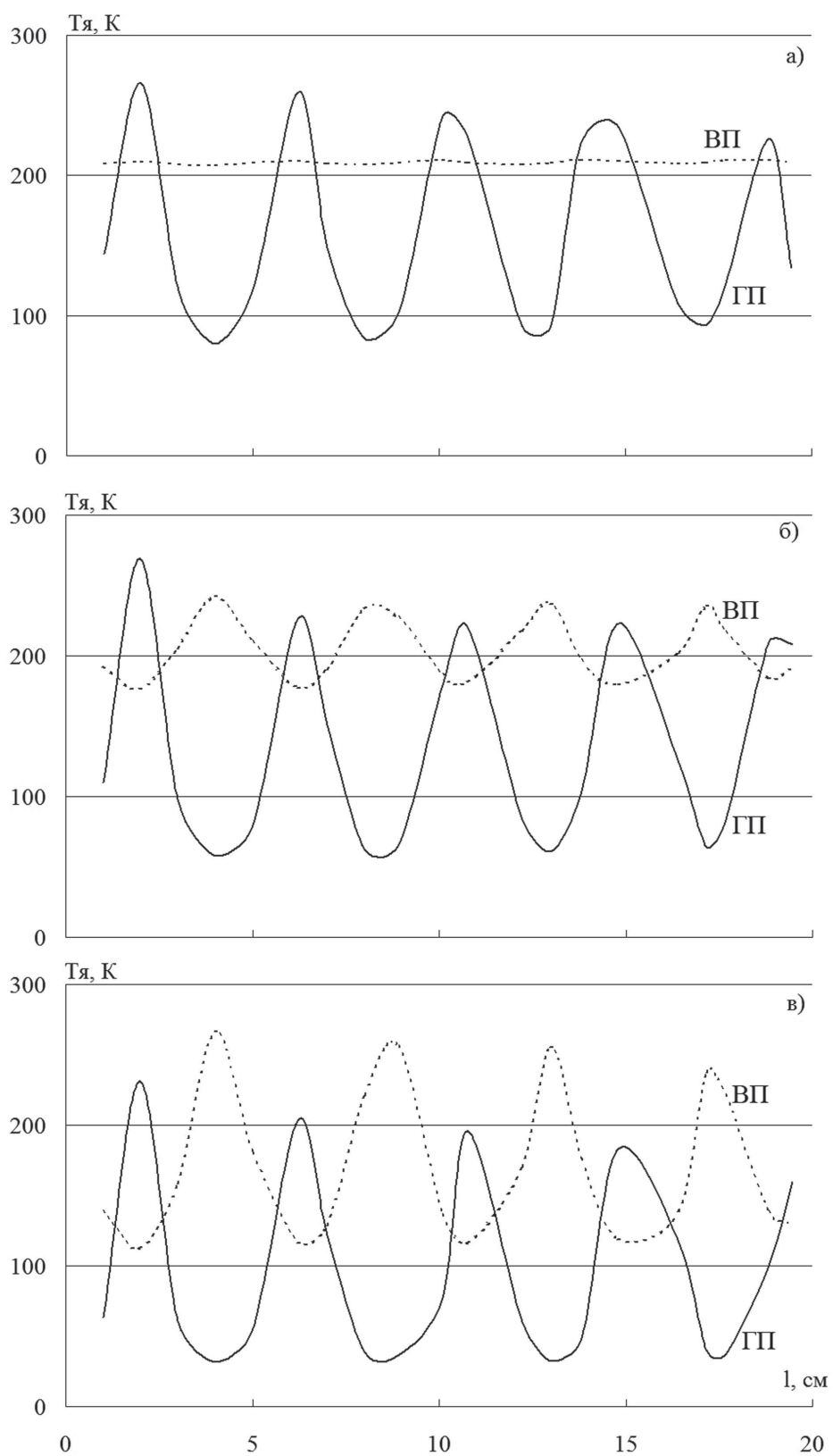


Рис. 1. Зависимость радиояркостной температуры на вертикальной (пунктирная линия) и горизонтальной (сплошная линия) поляризациях для ледяного покрова от его толщины на длине волны 0,88 см при углах наблюдений а)  $60^\circ$ , б)  $70^\circ$ , в)  $80^\circ$

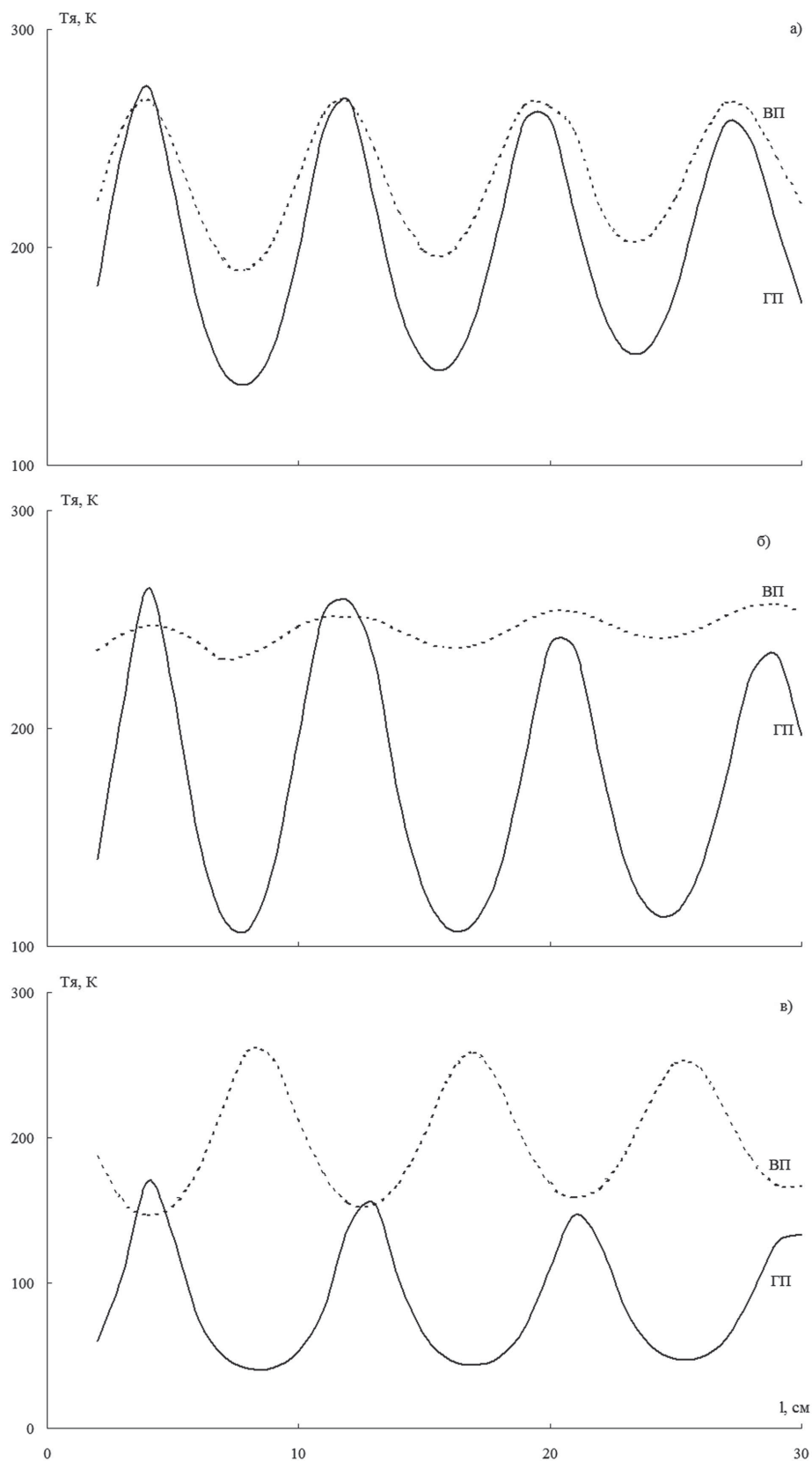


Рис. 2. Зависимость радиояркостной температуры для вертикальной (пунктирная линия) и горизонтальной (сплошная линия) поляризациях сухого (с объемной концентрацией влаги ( $W$ ) 2%) грунта, лежащего на более влажном ( $W = 40\%$ ) грунте от его толщины на длине волны 20 см при углах наблюдений а)  $40^\circ$ , б)  $60^\circ$ , в)  $80^\circ$

Как видно из графиков, до угла Брюстера для промежуточного слоя (ледяной покров или сухой слой грунта)  $T_{\text{г}}$  для *ГП* и *ВП* колеблются в фазе, при угле близкому к данному углу осцилляции на *ВП* прекращаются, а при углах больших этого угла они становятся противофазными. Также наблюдается тот факт, что значение радиояростной температуры на *ГП*, при некоторых толщинах, становится больше, чем на *ВП*. Этот эффект наблюдается как в миллиметровой области спектра, так и в сантиметровой.

В общем случае изучение трехслойной структуры с тонким промежуточным слоем и  $\epsilon'$ , удовлетворяющим неравенству  $\epsilon'_1 < \epsilon'_2 < \epsilon'_3$ , где индексы 1, 2, 3 соответствует трем слоям (1 – верхний полубесконечный, 2 – промежуточный, 3 – нижний полубесконечный) будет иметь аналогичные особенности. Например, те же особенности будут проявляться и для замерзающего грунта с плоскими границами, в случае масла на воде и т.д.

Для подтверждения обнаруженных эффектов были проведены натурные измерения для ледяного покрова и слоистого грунта.

### Методика эксперимента

Измерения радиояростной температуры на длинах волн 0,88 см и 2,3 см растущего ледяного покрова выполнены на оз. Арахлей Забайкальского края. Исходная минерализация озера составляет 100 мг/л. На берегу водоема на высоте десяти метров от поверхности воды располагались радиометрические приемники на длины волн 2,3 см и 0,88 см.

Чувствительности радиометров составляли значение около 0,1 К при постоянной времени 1 с. Полосы пропускания радиометров: 1,2 ГГц (для сантиметрового диапазона) и 2,5 ГГц (для миллиметрового диапазона). Оси антенн составляли угол  $73^\circ$  от нормали к поверхности воды. Для СВЧ-радиометра на длину волны 2,3 см ширина диаграммы направленности параболической антенны на уровне 0,5 дБ равнялась  $3^\circ$ , а для СВЧ радиометра на длину волны 0,88 см –  $8^\circ$ . Измерения велись непрерывно в течении нескольких недель с начала ноября 2008 года. В автоматическом режиме фиксировались сигналы на четырех линейных поляризациях – это *ГП*, *ВП* и на двух поляризациях повернутых на угол  $\pm 45^\circ$  к *ГП*. Калибровка приборов осуществлялась по излучению атмосферы и открытой водной поверхности. Запись сигнала осуществлялась с помощью системы сбора информации «Agilent» в компьютер. При измерениях в течение становления ледяного покрова осадков (снега) не наблюдалось.

Кроме того, были выполнены натурные измерения на проруби того же водоема с использованием установки, схема которой показана на рис. 3. В ледяном покрове озера изготавливали прорубь шириной 1 метр и длиной 3 метра. Измерения выполнялись с помощью радиометрических приемников, которые описаны выше. Для СВЧ-радиометра на длину волны 2,3 см была использована рупорная антенна с шириной диаграммы направленности  $15^\circ$ . Расстояние от исследуемой поверхности до антенн составляло 1,5 метра. Используемая установка позволяла изменять угол наблюдения. Температура окружающего воздуха находилась в интервале  $-32^\circ\text{C} \div -20^\circ\text{C}$ . По мере роста ледяного покрова регистрировались его толщина и радиояростная температура.

Калибровка СВЧ-радиометров осуществлялась по двум точкам: отраженное от листа металла тепловое излучение неба и собственное излучение пресной воды в проруби. Лист металла имел те же геометрические размеры, что и прорубь.



Рис. 3. Фотография установки для измерения мощности теплового излучения льда на проруби на длины волн 0,88 см и 2,3 см

Были выполнены измерения радиояркой температуры растущего льда под углом  $60^\circ$  и под углом  $72^\circ$ . Для второго измерения прорубь освобождалась от свежееобразованного льда. Средняя соленость измеряемого льда составляла 6 мг/кг.

Для измерения теплового излучения грунта использовалась металлическая кювета размером  $80 \times 80 \text{ см}^2$ , в которую помещался песок мелкой фракции с объемной влажностью 25%. Влажный песок накрывали микронной толщины полиэтиленом, сверху которого помещался высушенный песок с объемной влажностью менее 2%. Меняя толщину сухого слоя песка выполняли измерения  $T_{я}$  на двух линейных поляризациях на длине волны 2,3 см. Калибровку радиометра осуществляли по двум точкам –  $T_{я}$  пресной воды и  $T_{я}$  безоблачной атмосферы.

### Полученные результаты

В момент становления ледяного покрова озера, происходило изменение радиометрического сигнала на длине волны 2,3 см на двух линейных поляризациях *ГП* и *ВП*. Осцилляции  $T_{я}$  на двух поляризациях происходят в противофазе. Кроме того, значение радиояркой температуры на *ГП* больше, чем на *ВП* при некоторых толщинах, что подтверждают расчеты. Однако на длине волны 0,88 см значительные противофазные осцилляции не наблюдались. Это можно объяснить исчезновением интерференции в результате интегрирования радиометрического сигнала с исследуемой поверхностью, а также из-за рассеяния на неоднородностях поверхности. Тем не менее, и на длине волны 0,88 см наблюдались осцилляции  $T_{я}$ .

Результаты измерений, выполненных на проруби, приведены на рис. 4. Как видно из графиков, при угле наблюдения  $62^\circ$  излучение на *ВП* практически не меняется, а на *ГП* наблюдаются осцилляции радиояркой температуры вследствие интерференции теплового излучения слоистой структуры в двух исследуемых диапазонах. На угле  $72^\circ$  как и при расчетах, наблюдаются осцилляции мощности теплового излучения на двух ортогональных поляризациях, причем данные вариации температуры являются противофазными. Также экспериментально наблюдается установленный при расчетах эффект, а, именно, мощность теплового излучения на вертикальной поляризации при некоторых толщинах имеет меньшее значение, чем на горизонтальной поляризации. Этот эффект наблюдался на двух исследуемых частотах.

Что же касается измерения теплового излучения сухого грунта, лежащего на более влажном слое, то также наблюдаются осцилляции  $T_{я}$  на горизонтальной и вертикальной поляризациях. Пример зависимости  $T_{я}$  на угле наблюдения  $70$  градусов от толщины сухого слоя приведен на рис. 5.

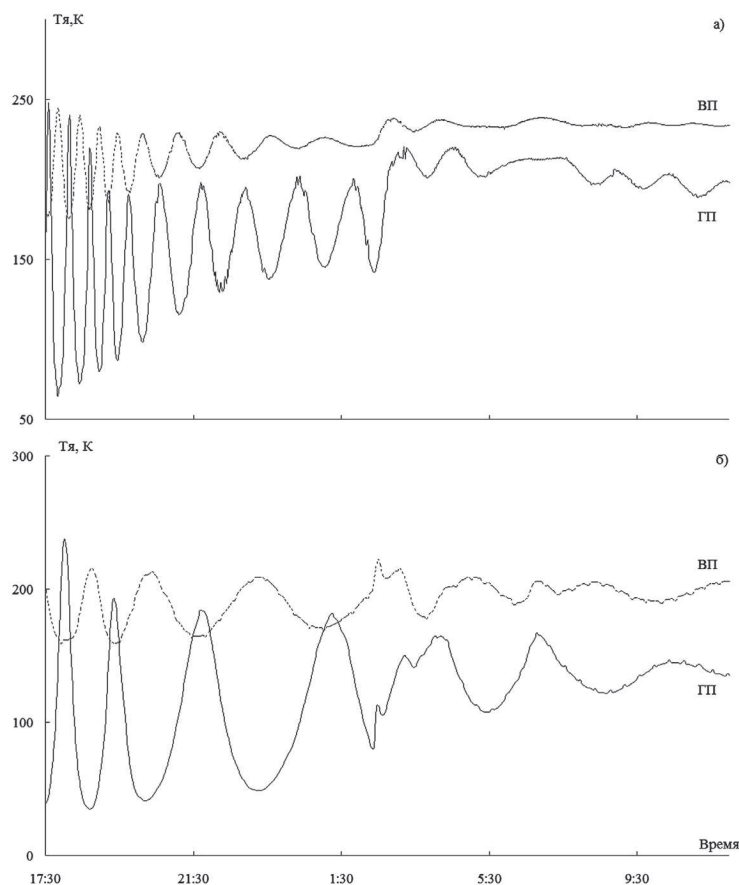


Рис. 4. Радиояркостная температура на ВП и ГП растущего ледяного покрова в проруби на длинах волн под углом  $73^\circ$  а) 0,88 см и б) 2,3 см

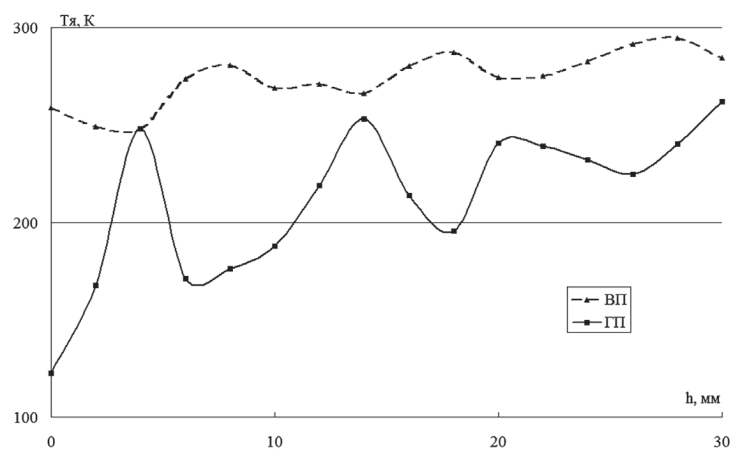


Рис. 5. Зависимость радиояркостной температуры для слоистого грунта на длине волны 2,3 см. Угол наблюдения  $70^\circ$

## Выводы

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Наблюдаются осцилляции радиояркостных температур в сантиметровом диапазоне, которые носят особый характер, на горизонтальной и вертикальной поляризациях по мере увеличения толщины промежуточного слоя.

2. При углах наблюдений меньших, чем угол Брюстера для полубесконечных среды (нижней среды) осцилляции радиоярких температур для *ВП* и *ГП* наблюдаются в фазе, а при углах наблюдений больших, чем данный угол, осцилляции находятся в противофазе.

3. Теоретически и экспериментально показано, что возможны случаи, когда значение радиояркой температуры трехслойных сред на *ВП* меньше, чем значение на *ГП*, что может наблюдаться при высушивании верхнего слоя грунта или при его промерзании.

## Литература

1. Klein L.A., Swift G.T. An improved model for the dielectric constant of sea water at microwave frequencies // *IEEE Trans. Antennas Propagat.* 1977. V. 25. No 1. P. 104-111.
2. Liu Q., Augstein E., and Darovskikh A. Polarization Anomaly of the Microwave Brightness Temperature from Ice // *Appl. Opt.* 1998. V. 37. No 12. P. 2228-2230.
3. Matzler C., Wegmuller U. Dielectric properties of fresh-water ice at microwave frequencies // *J. Phys. D.: Appl. Phys. (UK)*. 1987. P. 1623-1630.
4. Ray P.S. Broadband complex refractive indices of ice and water // *Appl. Opt.* 1972. V. 11. No 8. P. 1836-1844.
5. Бордонский Г.С., Гурулев А.А. Особенности радиотеплового излучения ледяных покровов водоемов с различной степенью минерализации // *Водные ресурсы*. 2008. Т. 35. №2. С. 210-215.
6. Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Цыренжапов С.В., Крылов С.Д. Радиотепловое излучение озерного льда в весенний период // *Исслед. Земли из космоса*. №2. 2005. С. 76 – 81.
7. Бордонский Г.С., Крылов С.Д., Гурулев А.А. Оценка минерализации пресных водоемов по радиотепловому излучению ледяного покрова // *Исслед. Земли из космоса*. 2002. №4. С.91-96.
8. Клепиков И.Н., Шарков Е.А. Теоретические исследования собственного излучения резконеоднородных неизотермических сред // *Исслед. Земли из космоса*. 1992. № 6. С. 3-15.
9. Митник Л.М. Излучательные характеристики водной поверхности. Серия Океанология. Обнинск. 1978. 66 с.
10. Шутко А.М. СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. М.: Наука, 1986. 188 с.
11. Яценко А.С. Суточная динамика радиояркой температуры почв в процессах испарения и инфильтрации, замерзания и оттаивания. Дисс. канд. физ.-мат. наук. Омск. 2009. 140 с.

## Radiative characteristics of three-layer medium with a thin intermediate layer in the microwave range

A.A. Gurulev, A.O. Orlov, S.V. Tsyrenzhapov

*Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS*

*672090 Chita, Butin st, 26*

*Tel.: (3022) 35-40-63; E-mail: lgc255@mail.ru*

The behavior of the radio brightness temperature in the microwave range of three-layer medium with a thin intermediate layer with very different value of the dielectric properties of a thin layer was studied. The measurements of such media (soil and ice), and calculations for various angles of observation for the two linear polarizations (horizontal and vertical) were carried out. The studies found that the observed interference of the radio thermal radiation depending on thickness. In addition, the conditions in which the value of the power of thermal radiation on the horizontal polarization exceed the value on the vertical polarization were founded.

**Key words:** radiobrightness temperature, layered medium, polarization.