

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ТРЕХСЛОЙНОЙ СРЕДЫ
С ТОНКИМ ПРОМЕЖУТОЧНЫМ СЛОЕМ

© 2011 г. А. А. Гурулев*, А. О. Орлов, С. В. Цыренжапов

Учреждение Российской академии наук Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита

*E-mail: lgc255@mail.ru

Поступила в редакцию 11.03.2010 г.

В работе рассмотрен вопрос о тепловом излучении трехслойной среды с тонким промежуточным слоем в микроволновом диапазоне. Выполнены расчеты и проведены эксперименты для случая тонкого ледяного покрова и промерзающего слоя грунта. Показано, что существует особый характер осцилляции радиояркостной температуры на двух линейных поляризациях (горизонтальной и вертикальной) при изменении толщины промежуточного слоя. При некоторых толщинах промежуточного слоя радиояркостная температура на горизонтальной поляризации выше, чем на вертикальной поляризации. При углах визирования больших, чем угол Брюстера для промежуточной среды, по мере роста ее толщины наблюдаются противofазные осцилляции мощности радиотеплового излучения на двух ортогональных поляризациях.

Ключевые слова: радиояркостная температура, тонкие слои, ледяной покров, мерзлый грунт

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос об исследовании теплового излучения тонких слоистых сред, сравнимых с длиной волны, представляет значительный интерес, так как такие среды в природе встречаются часто. Простейшими случаями трехслойной среды с тонким переходным слоем могут служить следующие среды: грунт при начальной стадии его замерзания (из-за вымораживания верхнего слоя среды), плоские земные покровы при высушивании верхнего слоя грунта, появлении снега на поверхности, при образовании ледяного покрова на поверхности воды и т.д.

В зимнее время многие водоемы, в том числе и моря, покрыты ледяным покровом. В работах (Бордонский, Гурулев, 2008; Бордонский и др., 2002) приведены примеры того, как с помощью СВЧ-радиометрии можно определять некоторые параметры пресного водоема по собственному излучению льда. Однако изучению радиотеплового излучения ледяного покрова пресных водоемов в начальной стадии формирования посвящено мало работ. Тем не менее, лед многих озер имеет небольшую толщину в течение длительного периода времени, например, на Ладожском оз. и оз. Байкал.

В работах (Liu et al., 1998; Бордонский и др., 2005) обнаружены некоторые особенности поведения радиояркостной температуры, на ортогональных поляризациях, в начальной стадии формирования ледяного покрова. Авторами замечено, что при некоторых толщинах льда значение радиояркостной температуры на горизонтальной поляризации превосходит значения на вертикальной поляриза-

ции. Объясняется это различием диэлектрических свойств воздуха, льда и воды, однако при толщине льда больше нескольких длин волн эффект исчезает.

Этот вопрос представляет общий интерес в связи с тем, что 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 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° . По этой причине большие углы наблюдения для изучения теплового излучения различных природных объектов обычно не используются. 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 ледяного покрова небольшой толщины, соизмеримой с длиной волны излучения, при различных углах наблюдения, в том числе больших, чем угол Брюстера для границы воздух–лед, а также радиотепловое излучение промерзающего грунта и слоя сухого грунта, расположенного на влажном слое.

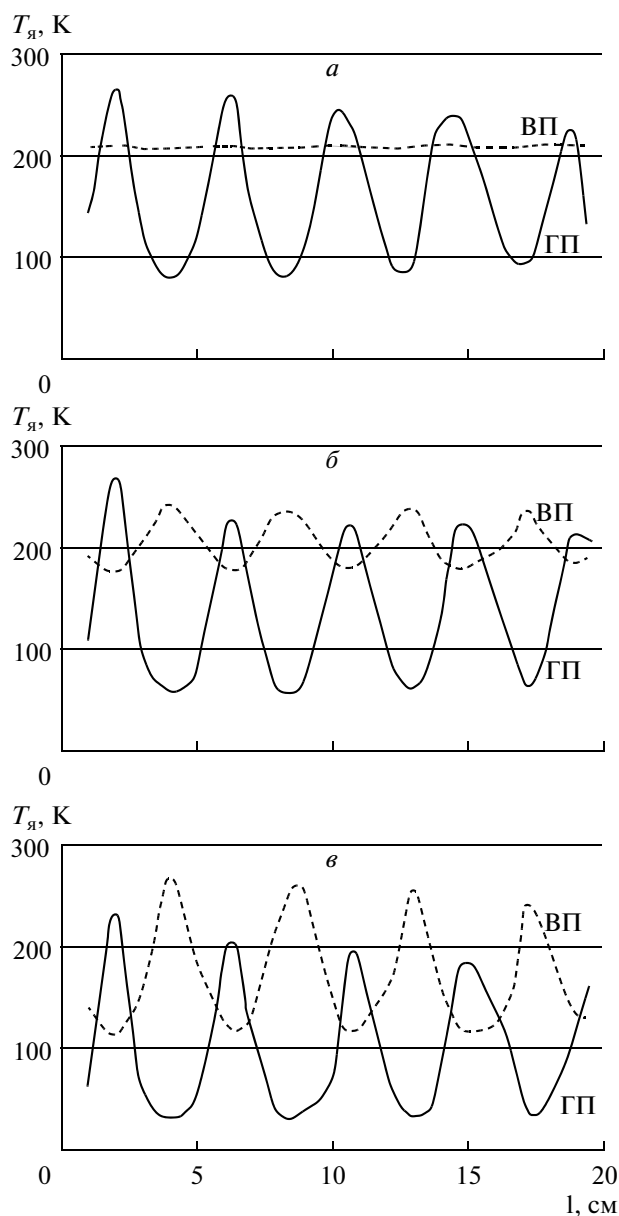


Рис. 1. Зависимость радиояростной температуры на вертикальной (ВП) (пунктирная линия) и горизонтальной (ГП) (сплошная линия) поляризациях для ледяного покрова от его толщины на длине волны 0.88 см при углах наблюдений: *a* – 60°, *б* – 70°, *в* – 80°.

РАСЧЕТЫ

Для изучения особенностей поведения мощности теплового излучения в зависимости от толщины ледяного покрова были выполнены расчеты радиояростной температуры ($T_{я}$) с использованием методики расчета радиояростной температуры слоистой неизоотермической среды (Клепиков, Шарков, 1992) для двух ортогональных поляризаций вертикальной (ВП) и горизонтальной (ГП).

Для расчетов необходимо знание мнимой (ϵ'') и действительной (ϵ') части комплексной диэлектри-

ческой проницаемости сред. Для пресной воды их можно определить, используя теорию Дебая и аппроксимационные 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 $\epsilon' = 3.15$ (Matzler, Wegmuller, 1987). Мнимую часть комплексной диэлектрической проницаемости для льда, содержащего небольшие концентрации солей, определим по формуле (Matzler, Wegmuller, 1987)

$$\epsilon'' = \epsilon_0'' + D(T, f)S, \quad (1)$$

где ϵ_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; ϵ_0'' и $D(T, f)$ для льда с преобладанием в них NaCl представлены в (Бордонский, Гурулев, 2008).

При расчетах зависимости радиояростной температуры от угла наблюдения для пресного льда бесконечной толщины и для бесконечного слоя воды в СВЧ-диапазоне угол Брюстера для плоской границы воздух–лед составляет около 60.6°, а для плоской границы воздух–вода 80° в см-диапазоне. Данный угол зависит от частоты излучения, но как показывают расчеты, существенных отклонений от указанных выше значений нет. Из-за различия углов Брюстера, для двух границ трехслойной среды, можно ожидать изменение коэффициента излучения при переходе угла наблюдения через значение данного угла. По этой причине были выполнены расчеты радиояростной температуры ($T_{я}$) при углах наблюдения 60°, 70° и 80°.

На рис. 1 приведены полученные графики зависимости $T_{я}$ 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. На рис. 2 приведены результаты расчетов для пресного льда при угле наблюдения меньше угла Брюстера (45°) на длинах волн 2.3 и 5.6 см. Причем, до угла Брюстера для ледяной среды $T_{я}$ для ГП и ВП колеблются в фазе, при угле, близком к данному углу, осцилляции на ВП прекращаются, а при углах, больших этого угла, для двух поляризаций они становятся противофазными. Как видно из приведенных графиков, значение радиояростной температуры на ГП при некоторых толщинах становится больше, чем на ВП. Этот эффект наблюдается не только в миллиметровой области спектра, но и в сантиметровой.

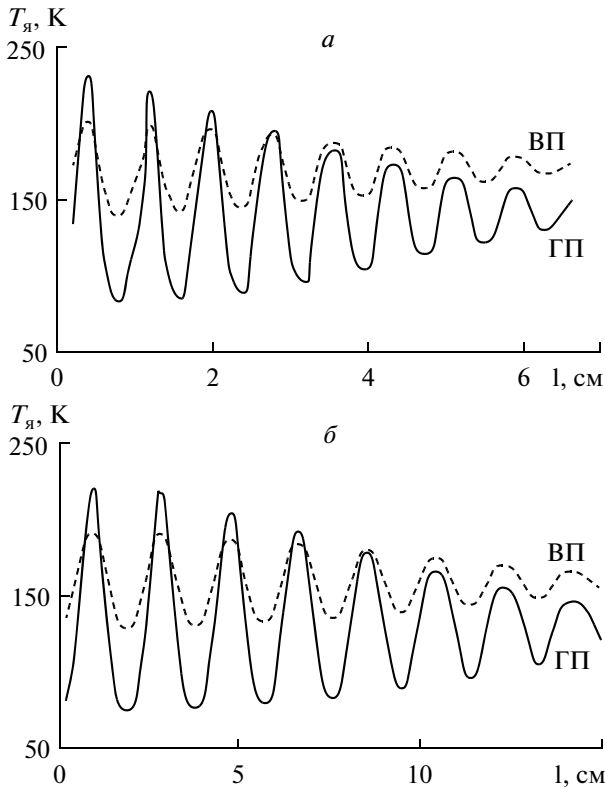


Рис. 2. Зависимость радиояркой температуры ледяного покрова от его толщины для ВП (пунктирная линия) и ГП (сплошная линия) на длинах волн: a – 2.3 см, b – 5.6 см при угле наблюдений 45° .

При расчетах радиояркой температуры почвогрунтов значения действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости сухого грунта принимались соответственно $\epsilon' = 3.5$ и $\epsilon'' = 0.014$ (Шутко, 1986). Для увлажненных грунтов применялась “рефракционная” модель для смеси (модель Брауна). Диэлектрическая проницаемость увлажненного грунта

$$\sqrt{\epsilon_\gamma} = \rho_w \sqrt{\epsilon_w} + (1 - \rho_w) \sqrt{\epsilon_c}, \quad (2)$$

где ϵ_γ , ϵ_w , ϵ_c – диэлектрическая проницаемость смеси, воды и сухого грунта; ρ_w – относительная объемная концентрация воды.

При расчетах для промежуточного слоя грунта относительная объемная концентрация воды принималась равной 2%, а для нижнего полубесконечного слоя грунта брали значение влажности 40%. Расчеты выполнялись для длины волны 20 см. Ширину диаграммы направленности антенны брали равной 10° , а ширину полосы пропускания радиометра принимали 10%-ной от центральной частоты.

Результаты расчетов для углов 40° , 60° и 80° приведены на рис. 3. Как видно из графиков, так же наблюдаются осцилляции мощности излучения, причем при меньших углах они в фазе, а при больших

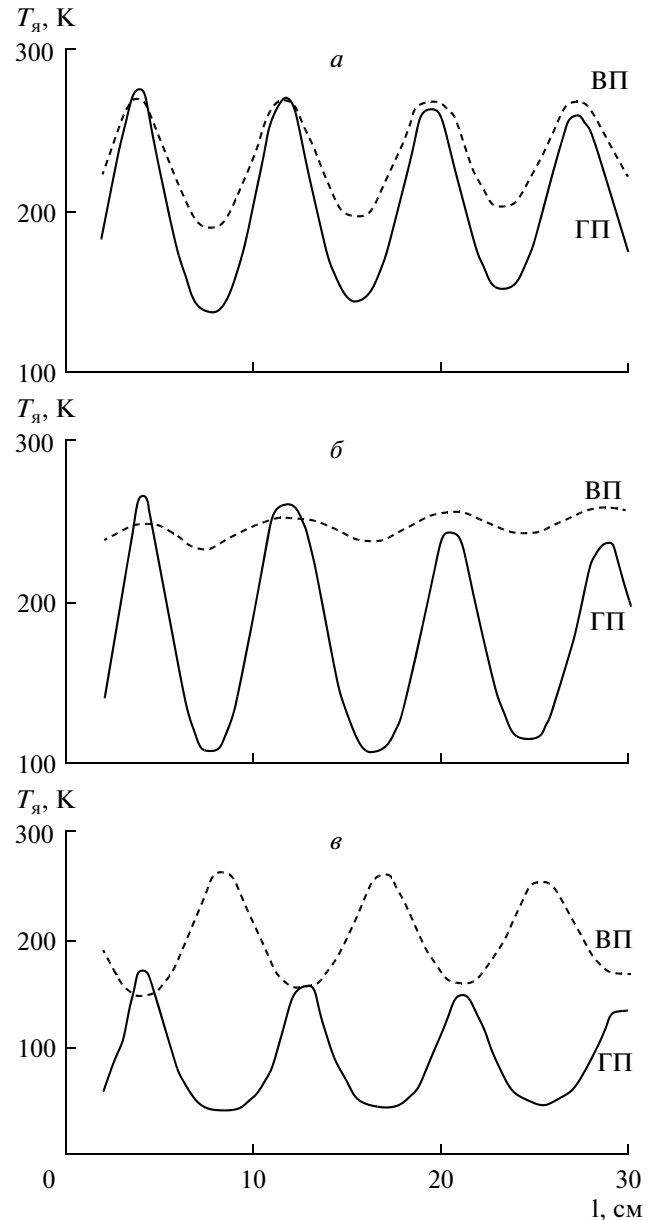


Рис. 3. Зависимость радиояркой температуры для ВП (пунктирная линия) и ГП (сплошная линия) сухого (с объемной концентрацией влаги (W) 2%) грунта, лежащего на более влажном ($W = 40\%$) грунте, от его толщины на длине волны 20 см при углах наблюдений: a – 40° , b – 60° , c – 80° .

углах в противофазе. То есть этот эффект имеет место не только для ледяного покрова, но и для сухого слоя почвы, лежащего на влажном грунте. В этом случае также радиояркая температура на ГП при некоторых толщинах может превышать ее значение на ВП.

В общем случае изучение трехслойной структуры с тонким промежуточным слоем и ϵ' , удовлетворяющим неравенству $\epsilon'_1 < \epsilon'_2 < \epsilon'_3$, где индексы 1, 2, 3 соот-

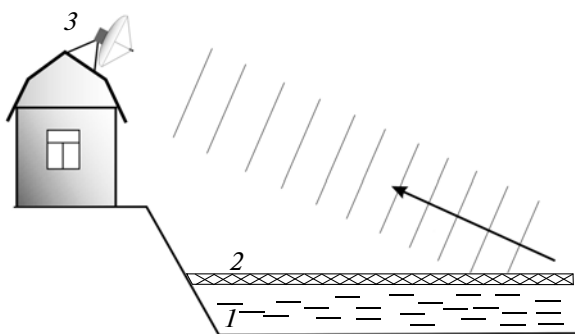


Рис. 4. Схема измерений радиояркостной температуры растущего ледяного покрова оз. Арахлей; 1 – водная среда, 2 – ледяной покров, 3 – микроволновый радиометр.

ветствуют трем слоям (1 – верхний полубесконечный, 2 – промежуточный, 3 – нижний полубесконечный), будет иметь аналогичные особенности. Например, те же особенности будут проявляться и для промерзающего грунта с плоскими границами – в случае масла на воде и т.д.

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

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Измерения радиояркостной температуры на длинах волн 0.88 и 2.3 см растущего ледяного по-

крова выполнены на оз. Арахлей Забайкальского края. Исходная минерализация озера составляет 100 мг/л. На берегу водоема на высоте 10 м от поверхности воды располагались радиометрические приемники на длины волн 2.3 и 0.88 см.

Чувствительности радиометров составляли значение около 0.1 К при постоянной времени 1 с. Полосы пропускания радиометров: 1.2 ГГц (для см-диапазона) и 2.5 ГГц (для мл-диапазона). Оси антенн составляли угол 73° 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° , а для СВЧ-радиометра на длину волны 0.88 см – 8° . Измерения велись непрерывно в течение нескольких недель с начала ноября 2008 г. Схема установки приведена на рис.4. 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, а также по внутренним эталонам. Запись сигнала осуществлялась с помощью системы сбора информации “Agilent” в компьютер. Особенностью измерений является то, что 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. 5. В ледяном покрове озера проделывалась прорубь шириной 1 м и длиной 3 м. Измерения выполня-



Рис. 5. Фотография установки для измерения мощности теплового излучения льда на проруби на длины волн 0.88 см и 2.3 см.

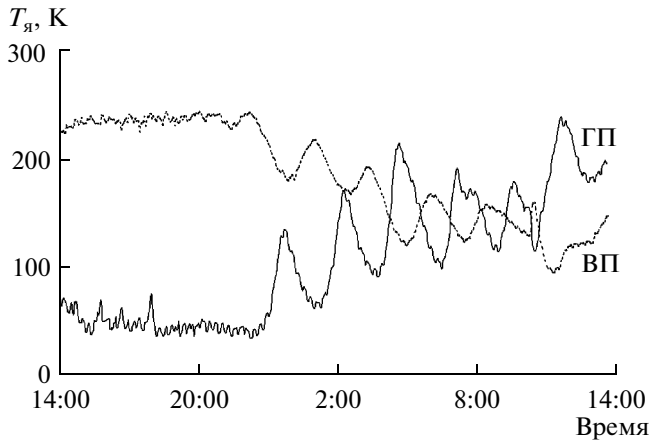


Рис. 6. Радиояростная температура на ВП и ГП во время становления ледяного покрова на оз. Арахлей. Начало ноября 2008 г. Длина волны 2.3 см.

лись 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° . Расстояние от исследуемой поверхности до антенн составляло 1.5 м. Используемая установка позволяла изменять угол наблюдения. Температура окружающего воздуха находилась в интервале $-32^\circ\text{C} \dots -20^\circ\text{C}$. 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.

Были выполнены измерения $T_{\text{я}}$ растущего льда под углами 60° и 72° . Для второго измерения прорубь освобождалась от свежесформированного льда. Средняя соленость измеряемого льда составляла 6 мг/кг.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В момент становления ледяного покрова озера происходило изменение радиометрического сигнала на длине волны 2.3 см, что показано на рис. 6 на двух линейных поляризациях ГП и ВП. Как видно из графика, осцилляции радиояростной температуры на двух поляризациях происходят в противофазе. Кроме того, значение радиояростной температуры на ГП больше, чем на ВП при некоторых толщинах, что подтверждает теоретические расчеты. Однако на длине волны 0.88 см заметные противофазные осцилляции не наблюдались, это можно объяснить ис-

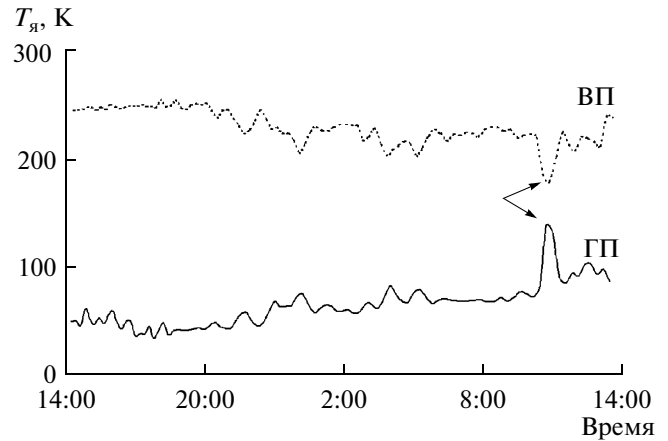


Рис. 7. Радиояростная температура на ВП и ГП во время становления ледяного покрова на оз. Арахлей. Начало ноября 2008 г. Длина волны 0.88 см. Стрелками отмечены характерные противофазные приращения сигнала на двух поляризациях.

чезновением интерференции в результате интегрирования радиометрического сигнала с исследуемой поверхности, а также из-за рассеяния на неоднородностях поверхности. Тем не менее, в некоторый момент времени и на длине волны 0.88 см наблюдались осцилляции $T_{\text{я}}$, что видно из рис. 7. На данном графике стрелками указаны заметные вариации мощности теплового излучения.

В результате ветровых воздействий и температурных перепадов тонкий слой льда оз. Арахлей подвергался разрушениям. Тем не менее, в радиотепловом излучении поверхности водоема после повторного его замерзания наблюдались те же противофазные осцилляции радиояростной температуры на длине волны 2.3 см. На графике рис. 6 наблюдали некоторые вариации интерференционных максимумов, что, возможно, связано с температурными и ветровыми деформациями ледяного покрова.

Результаты измерений, выполненных на проруби, приведены на рис. 8 и 9. Как видно из графиков, при угле наблюдения 62° излучение на ВП практически не меняется, а на ГП наблюдаются осцилляции радиояростной температуры вследствие интерференции теплового излучения слоистой структуры в двух исследуемых диапазонах. На угле 72° так же, как и при расчетах, наблюдаются осцилляции мощности теплового излучения на двух ортогональных поляризациях, причем данные вариации температуры являются противофазными. Также экспериментально наблюдается обнаруженный при расчетах эффект, а именно, мощность теплового излучения на вертикальной поляризации при некоторых толщинах имеет меньшее значение, чем на горизонтальной поля-

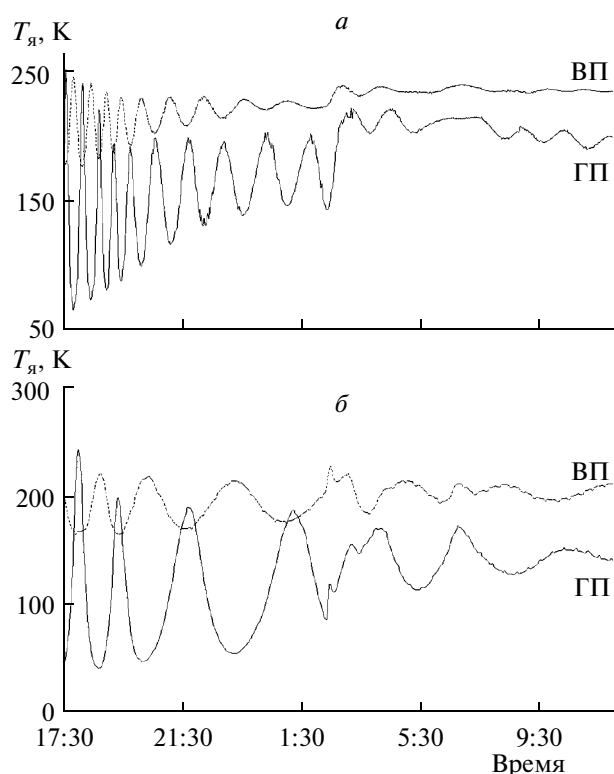


Рис. 8. Радиояркая температура на ВП и ГП растущего ледяного покрова в проруби на длинах волн под углом 73° : $a - 0.88$ см и $b - 2.3$ см.

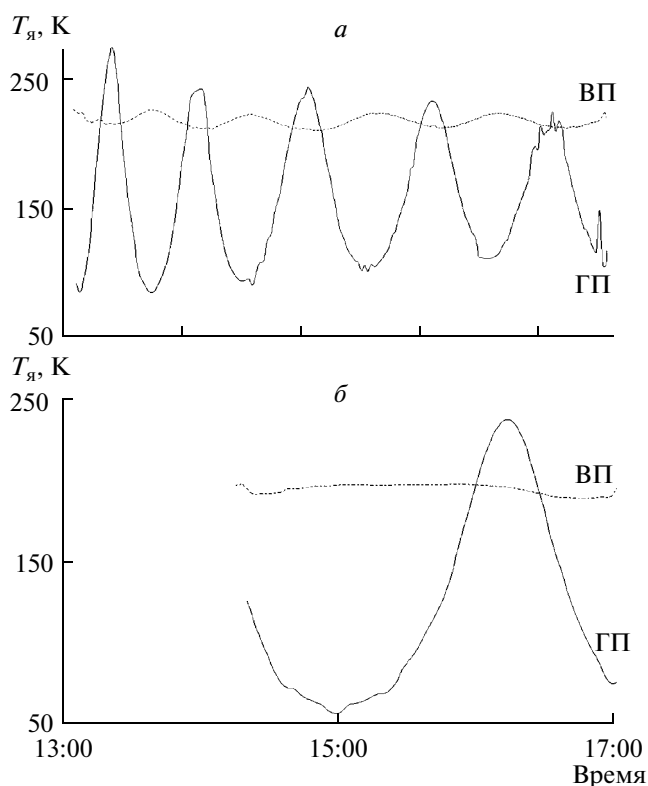


Рис. 9. Радиояркая температура на ВП и ГП растущего ледяного покрова в проруби на длинах волн под углом 62° : $a - 0.88$ см и $b - 2.3$ см.

ризации. Этот эффект наблюдался на двух исследуемых частотах.

Замерзание грунта и тепловое излучение тонкого промерзающего слоя экспериментально не исследовалось, однако данные работы (Ященко, 2009), о превышении радиояркой температуры на ГП, соответствуют расчетам (рис. 3).

ВЫВОДЫ

1. Радиояркая температура трехслойной плоскостойкой среды с тонким промежуточным слоем и двумя полубесконечными средами, из которых верхняя среда прозрачна, может иметь при некоторых толщинах большее значение на горизонтальной поляризации, чем на вертикальной. Этот эффект справедлив как для тонкого ледяного покрова с толщинами порядка единиц длин волн, лежащего на водной поверхности, так и для сухого, или вымороженного, грунта, лежащего на влажном грунте.

2. Мощность радиотеплового излучения носит осциллирующий характер на двух ортогональных поляризациях в зависимости от толщины промежуточного слоя. По мере увеличения угла наблюдения происходит изменение характера осцилляций $T_я$ на ВП. Так, при углах, меньших угла Брюстера, для льда данные осцилляции находятся в фазе с осцилляциями на ГП; при угле наблюдения, равном углу Брюстера, осцилляции на ВП прекращаются, а при углах наблюдения больших, чем угол Брюстера, осцилляции радиояркой температуры находятся в противофазе.

3. При увеличении площади поверхности ледяного покрова из-за существования неоднородностей границы раздела лед-воздух и рассеяния излучения, а также вариаций толщин слоя льда эффект осцилляции $T_я$ уменьшается. В эксперименте с нарастанием ледяного покрова естественного водоема на длине волны 0.88 см и "снятии" сигнала с пятна на поверхности льда площадью $\sim 7-24$ м² наблюдались на порядок ослабленные осцилляции по сравнению с расчетными. При этом $T_я$ на ВП всегда превосходила ту же величину на ГП.

Кроме того, приведенные результаты могут использоваться и при радиолокационных исследованиях слоистых земных покровов из космоса, так как радары, установленные на ИСЗ, имеют разрешение порядка одного метра.

4. Радиояркая температура тонкого слоя сухого грунта, расположенного на влажном грунте, при толщине порядка длины волны может иметь для некоторой толщины более высокое значение на ГП при любых углах наблюдения. В этом случае также наблюдаются осцилляции в одной фазе для углов, меньших угла Брюстера, и противофазные осцилляции для углов наблюдения, превышающих этот угол.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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.
- Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Цыренжапов С.В., Крылов С.Д.* Радиотепловое излучение озерного льда в весенний период // Исслед. Земли из космоса. 2005. № 2. С. 76–81.
- 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.
- Клепиков И.Н., Шарков Е.А.* Теоретические исследования собственного излучения резконеоднородных неизотермических сред // Исслед. Земли из космоса. 1992. № 6. С. 3–15.
- Митник Л.М.* Излучательные характеристики водной поверхности. Сер. Океанология. Обнинск, 1978. 66 с.
- Шутко А.М.* СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. М.: Наука, 1986. 188 с.
- Яценко А.С.* Суточная динамика радиояркостной температуры почв в процессах испарения и инфильтрации, замерзания и оттаивания: Дисс. канд. физ.-мат. наук. Омск, 2009. 140 с.
- 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. № 1. P. 104–111.
- Liu Q., Augstein E., Darovskikh A.* Polarization Anomaly of the Microwave Brightness Temperature from Ice // Appl. Opt. 1998. V. 37. № 12. P. 2228–2230.
- Matzler C., Wegmuller U.* Dielectric properties of fresh-water ice at microwave frequencies // J. Phys. D.: Appl. Phys. (UK). 1987. P. 1623–1630.
- Ray P.S.* Broadband complex refractive indices of ice and water // Appl. Opt. 1972. V. 11. № 8. P. 1836–1844.

Thermal Radiation from a Three-Layer Media with Thin Intermediate Layer**A. A. Gurulev, A. O. Orlov, S. V. Tsyrendzapov***Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Chita*

Thermal radiation of the thin three-layer media with a thin intermediate layer at microwaves is considered. Calculations of the radio brightness temperature of thin ice cover and freezing layer of a ground are carried out. It is shown, that there is a special character of oscillations of the radio brightness temperature at two linear polarizations (horizontal and vertical) with change of the intermediate layer thickness. The radio brightness temperature at the horizontal polarization is larger than it at vertical polarization for some thickness of intermediate layer. When the viewing angle is greater the Brewster angle of the intermediate medium, the antiphase oscillations of thermal microwave radiation at orthogonal polarizations are observed.

Keywords: radio brightness temperature, thin layers, ice cover, frozen ground