

Суточная динамика коэффициента излучения и радиояркостной температуры почв на частотах 1,4 и 6,9 ГГц

П.П. Бобров¹, В.Л. Миронов², А.С. Ященко¹, А.В. Богданов²

¹Омский государственный педагогический университет
644099, Омск, наб. Тухачевского, 14

E-mail: bobrov@omgpi.ru

²Институт физики им Л.В. Киренского СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок

E-mail: rsdvm@ksc.krasn.ru

Приведены результаты экспериментального исследования динамики радиояркостной температуры почвенных участков, отличающихся содержанием гумуса, в процессах испарения и инфильтрации на частоте 6,9 ГГц. Показано, что различия в гидрофизических свойствах почв проявляются в различной суточной амплитуде изменений радиояркостной температуры и в различном временном сдвиге между суточными минимумами коэффициента излучения и радиояркостной температуры. В период ночных осенних заморозков проведено исследование суточной динамики радиояркостных температур на частотах 1,4 и 6,9 ГГц в процессах циклического промерзания и оттаивания. Показана возможность дистанционного обнаружения постепенного увлажнения поверхностного слоя, вызванного подтягиванием почвенной влаги к холодному фронту при промерзании.

Исследование динамики радиояркостной температуры почв производилось с помощью радиометрического комплекса, разработанного в ИКИ РАН (рис. 1). Флуктуационная чувствительность радиометров была не хуже 0,3 К (по 1 σ) при $\tau=1$ с. Ширина полосы пропускания трактов составляла 60 МГц у радиометра на частоту 1,4 ГГц и 200 МГц у радиометра 6,9 ГГц. Ширина главного лепестка антенн по уровню – 3 дБ составляла 22-25°. Излучение почв измерялось под углом 45° от надира.

На испытательной базе Института леса СО РАН "Погорельский бор" исследовались два почвенных участка, один из которых представлял почву естественного сложения, а с поверхности второго был удален гумусный слой. Гранулометрический состав и содержание гумуса приведены в табл. 1. Содержание солей (сухой остаток) не превышало 0,05%. Существенное различие наблюдается только в содержании гумуса. Участки обследовались поочередно с временным интервалом 15- 60 мин. Динамика радиояркостной температуры на частоте 6,9 ГГц в процессах инфильтрации и испарения приведена на рис. 2.

За период наблюдений осадки, вызвавшие заметное изменение содержания влаги в почве, выпали 4 сентября (16 мм). Началу дождя соответствует ярко выраженное уменьшение радиояркостной температуры. В период с 5 по 13 сентября осадков не было, поэтому наблюдается рост среднесуточной радиояркостной температуры. Уменьшение радиояркостной температуры 14, 15 и 19 сентября, вызванное осадками слабой интенсивности (8 мм за три дня), не столь значительно.

Таблица 1. Гранулометрический состав и содержание гумуса в почвах исследуемых участков

№ участка	Гранулометрический состав, % по фракциям в мм							Содержание гумуса Н, %
	1–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	<0,001	<0,01	
1	13,10	36,84	11,98	8,06	10,04	19,98	38,08	6,03
2	7,70	48,24	9,98	4,06	7,82	22,20	34,08	0,52



Рис. 1. Вид радиометрического комплекса при калибровке радиометров.
 1 – радиометр 1,4 ГГц, 2 – радиометр 6,9 ГГц, 3 – металлический лист,
 4 – бассейн с водой, 5 – метеостанция

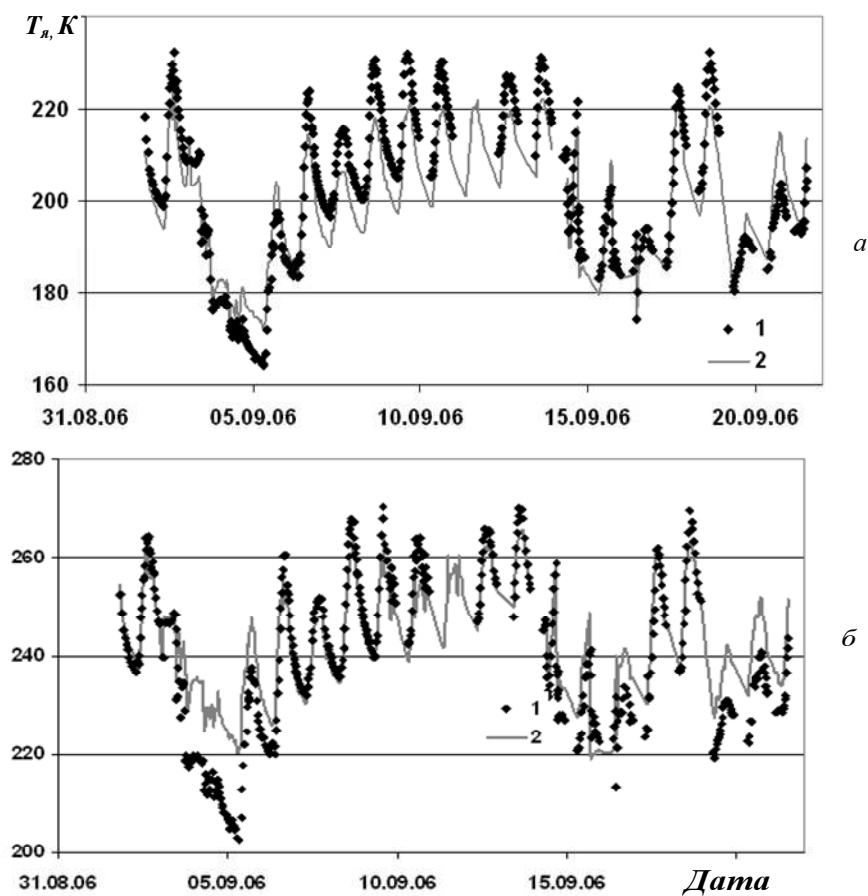


Рис. 2. Динамика радиояростной температуры на частоте 6,9 ГГц (а – горизонтальная поляризация, б – вертикальная). 1 – участок №1 (содержание гумуса 6,03 %);
 2 – участок № 2 (содержание гумуса 0,52 %)

Анализ данных показывает, что яркостная температура участка 1 с высоким содержанием гумуса в процессе испарения выше как на вертикальной, так и на горизонтальной поляризации. Почва с более высоким содержанием гумуса имеет меньший коэффициент отражения в оптическом диапазоне и сильнее нагревается в дневное время. Разность термодинамических температур участков 1 и 2 на глубине 1 см составляет в эти часы 1–3 К. Благодаря этому, а также из-за более высокой пористости почвы поверхностный слой почвы, богатой гумусом, высыхает быстрее. В ночные часы из-за более высокой излучательной способности высокогумусной почвы в ИК диапазоне температура поверхности участка 1 на 0,2–2 К меньше, чем почвы участка 2. Вследствие этого и амплитуда суточных колебаний яркостной температуры у почвы с более высоким содержанием гумуса, как правило, выше, чем у почвы, бедной гумусом (см. рис. 3). Особенно четко это выражено в излучении на вертикальной поляризации. Максимальные значения суточных амплитуд как первого, так и второго участков наблюдаются в периоды интенсивного испарения после выпадения осадков (5–6 сентября и 16–18 сентября).

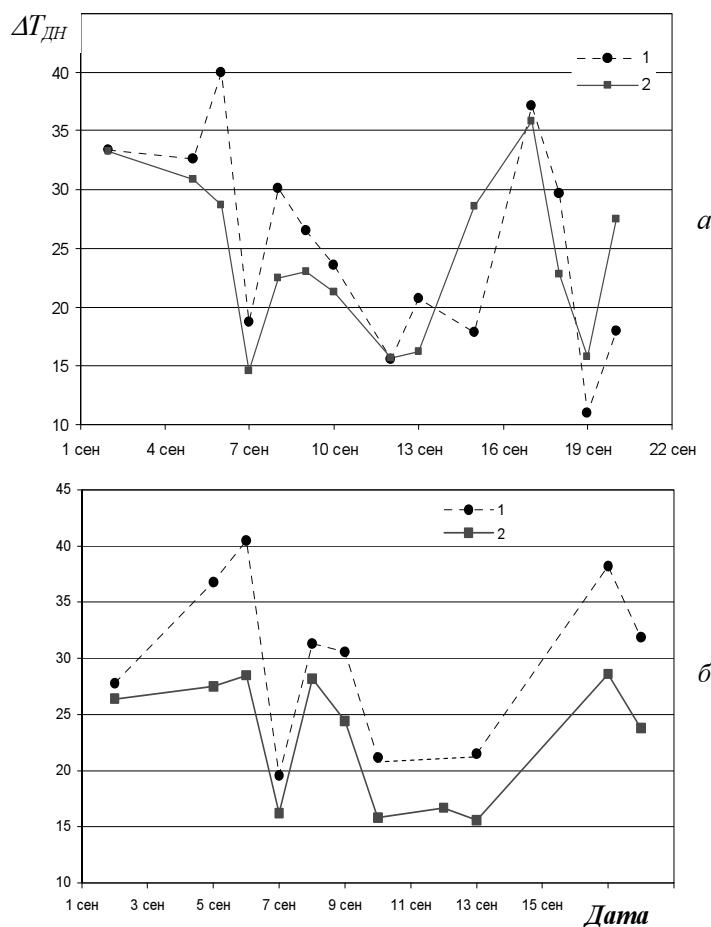


Рис. 3. Суточные амплитуды радиояркостной температуры на частоте 6,9 ГГц (а - горизонтальная поляризация, б - вертикальная). 1 – участок №1 (содержание гумуса 6,03 %); 2 – участок № 2 (содержание гумуса 0,52 %)

Значения радиояркостной температуры T_y были переведены в значения коэффициента излучения $\chi = T_y / T_{эф}$, где $T_{эф}$ – эффективная температура излучающего слоя, определяемая как среднее арифметическое температуры поверхности почвы, измеряемой ИК термометром и температурой на глубине 1 см. Поскольку коэффициент излучения определяется влажностью почвы и шероховатостью поверхности, то его максимальные суточные значения соответствуют минималь-

ным значениям влажности в эффективно излучающем слое. Если максимальные значения радиояростной температуры наблюдались (в разные дни) с 15 до 18 часов, то максимальные значения коэффициента излучения наблюдались с 18 до 20 часов. Это означает, что вплоть до этого времени происходило испарение почвенной влаги и, следовательно, уменьшение ее диэлектрической проницаемости.

По окончании процесса испарения в конце дня начиналось подтягивание почвенной влаги по капиллярам из более влажных нижележащих слоев. Коэффициент излучения при этом уменьшался. Этот процесс продолжался до 9-10 часов утра следующего дня, при том, что минимум термодинамической температуры наблюдался на два – два с половиной часа ранее. Временной сдвиг между моментами минимума радиояростной температуры и минимума коэффициента излучения для почвенного участка № 1 увеличивается с увеличением влажности почвы (рис. 4а). Такой зависимости для участка с малым содержанием гумуса не наблюдалось (рис. 4б). Малые значения временного сдвига для почвы, богатой гумусом, при малой влажности обусловлены резким уменьшением влагопроводности при разрыве капиллярных связей из-за больших диаметров капилляров в пористой почве.

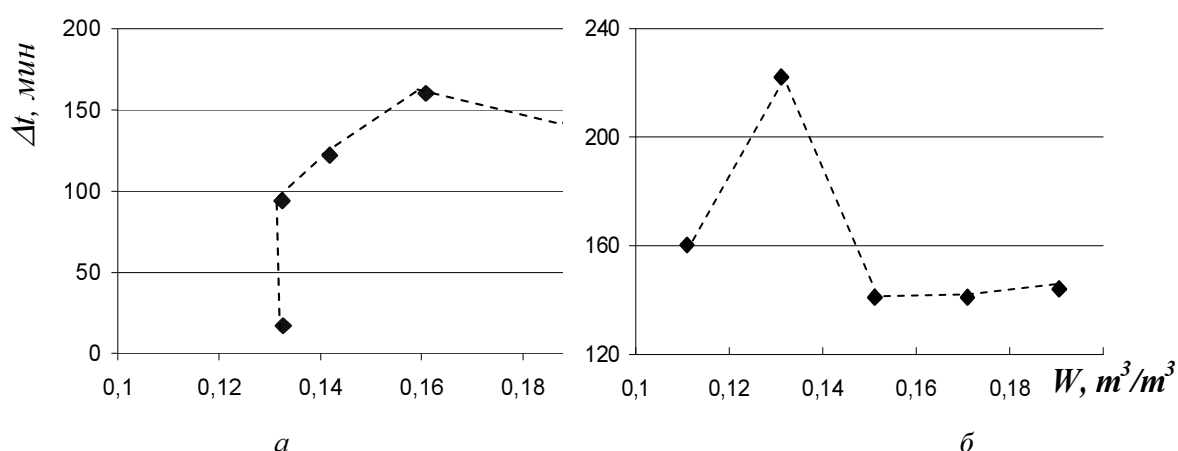


Рис. 4. Временной сдвиг между моментами минимумов радиояростной температуры и минимумов коэффициента излучения на частоте 6,9 ГГц в зависимости от влажности в слое 0-1 см почвы участка №1(а) и №2 (б)

Для восстановления значений влажности поверхностного слоя по дистанционно измеряемому коэффициенту излучения использовалась рефракционная модель диэлектрической проницаемости почвы [1]. Оказалось, что значения влажности, найденные через значения коэффициента излучения на горизонтальной и вертикальной поляризации, значительно различаются.

Влияние поверхностных неровностей на коэффициент излучения учитывалось с помощью соотношения, приведенного в работе [2]:

$$\chi = 1 - |r|^2 \exp\left(\left(-\frac{2\pi}{\lambda_0} h\right)^2 \cos^2 \theta\right), \quad (1)$$

где r – коэффициент отражения от гладкой поверхности, λ_0 – длина волны излучения. Параметр шероховатости h оценивался по фотографиям поверхности участков. Размеры почвенных агрегатов на поверхности составляли от 0,1 до 1,5 см, следовательно, высоты неровностей были от 0,05 до 0,75 см. Среднее значение высот неровностей равно 0,4 см.

Результаты расчетов с использованием этого параметра шероховатости в формуле (1) в сравнении с данными прямых измерений влажности в поверхностных слоях участков 1 и 2 приведены на рис. 5 и 6. Видно, что различие между прямыми и дистанционными измерениями влажности по коэффициенту излучения на горизонтальной поляризации не превышает 0,03-0,04 м³/м³ при

влажности, изменяющейся в диапазоне от 0,08 до 0,34 м³/м³. Относительная ошибка составляет около 40% при низких влажностях и менее 10 % – при высоких.

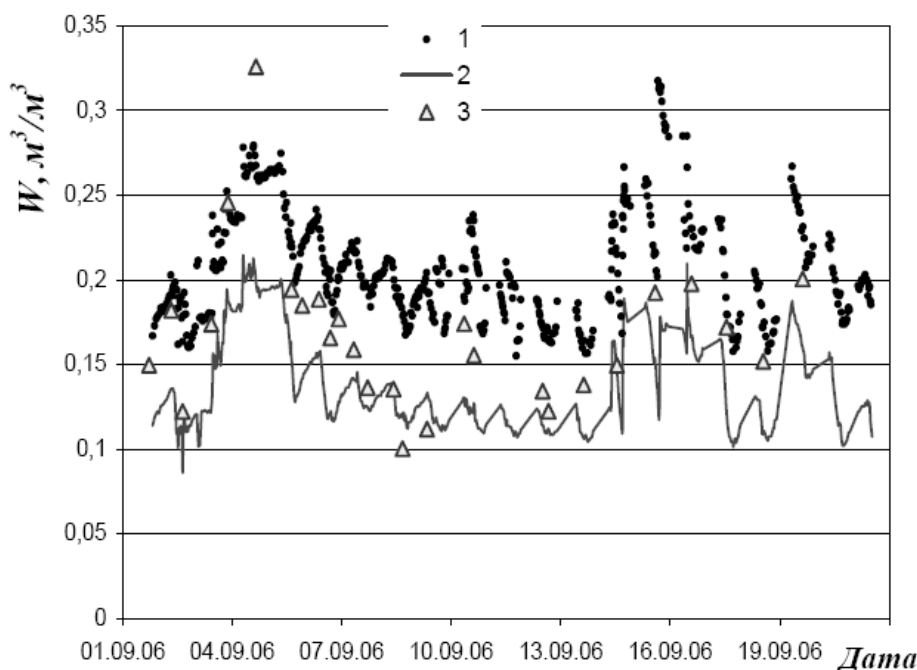


Рис. 5. Восстановленные значения влажности почвы участка 1 по измеренным значениям коэффициента излучения на вертикальной поляризации (1), на горизонтальной поляризации (2) и данные прямых измерений термостатно-весовым способом (3) в слое 0-1 см (с 2 по 9 сент. и с 14 по 19 сент.) и в слое 0-2 см (с 10 по 13 сент.)

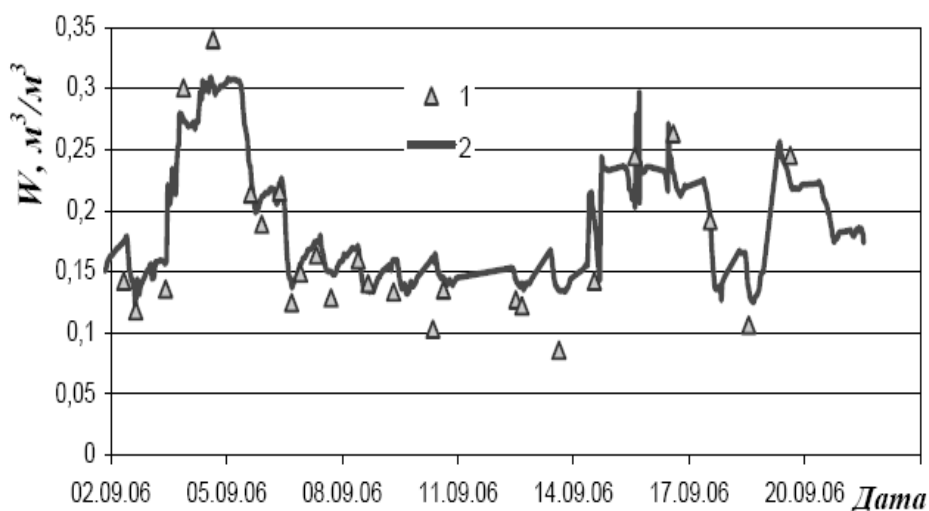


Рис. 6. Изменение влажности в поверхностном слое участка 2. 1 – данные прямых измерений в слое 0-1 см (с 2 по 9 сент. и с 14 по 19 сент.) и в слое 0-2 см (с 10 по 13 сент.); 2 - восстановленные значения по измеренным значениям коэффициента излучения на горизонтальной поляризации с учетом шероховатости поверхности при $h=0,4$ см

Радиотепловое излучение на частоте 1,4 ГГц формируется в более толстом поверхностном слое, поэтому с помощью радиометра на эту частоту можно получать данные о влажности в более глубоком слое. К сожалению, измерения с использованием этого радиометра проведены только в осенний период, когда наблюдалось циклическое промерзание и оттаивание поверхностного слоя.

Температура почвы на глубине 1 см колебалась от $+3^{\circ}\text{C}$ днем до -5°C ночью, когда почва промерзала на глубину от 4-х до 7см. Суточные изменения радиояркой температуры приведены на рис. 7.

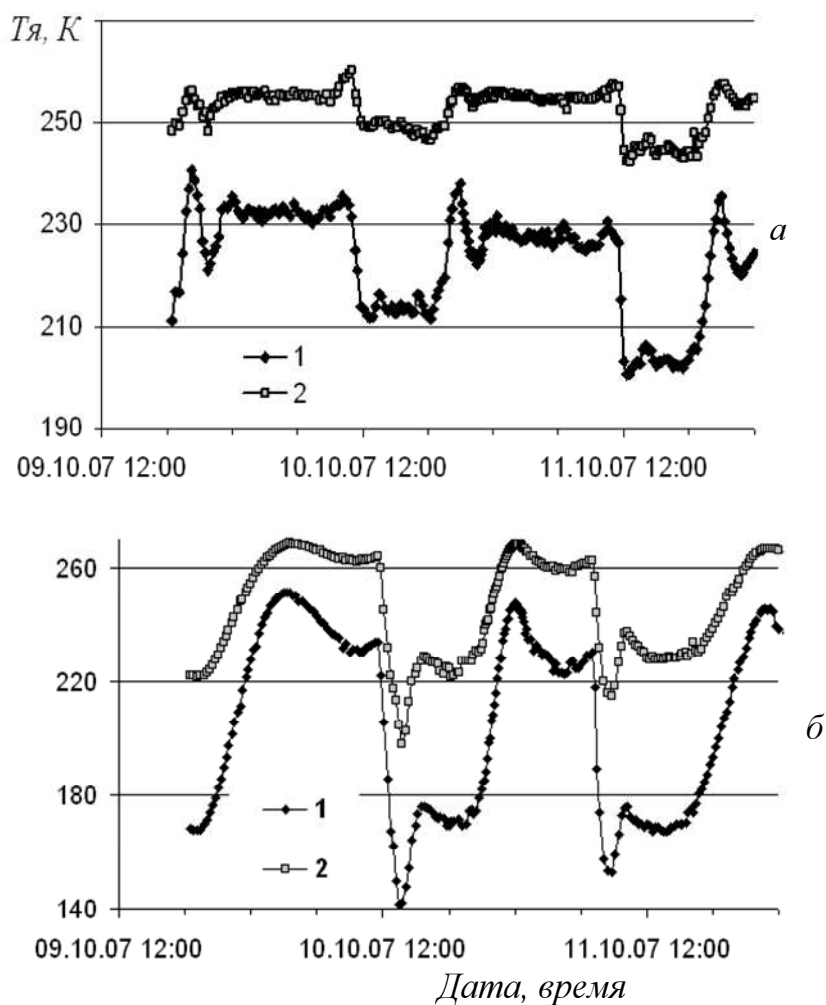


Рис. 7. Изменение радиояркой температуры на частотах 6,9 ГГц (а) и 1,4 ГГц (б) в процессе промерзания и оттаивания поверхностного слоя почвы участка №1

При промерзании поверхностного слоя наблюдается возрастание радиояркой температуры, сопровождаемое осцилляциями, вызванными интерференцией волн, отраженных от границ промерзшего слоя. Осцилляции на частоте 6,9 ГГц затухают, когда толщина промерзшего слоя превышает глубину зондирования, и вновь возникают с началом процесса оттаивания. После каждого цикла промерзание-оттаивание радиояркая температура уменьшается из-за подтягивания влаги к холодному фронту в процессе промерзания поверхностного слоя.

На частоте 1,4 ГГц глубина зондирования превышает толщину слоя промерзания, поэтому стабильных значений радиояркой температуры, соответствующих полностью промерзшей почве, не достигается. Не наблюдается также уменьшения радиояркой температуры после цикла промерзание-оттаивание, так перераспределение влаги происходит в пределах зондируемого слоя.

Моделирование временного ряда радиоярких температур на двух существенно различающихся частотах при относительно медленном изменении диэлектрических характеристик почв

позволяет достаточно определять влажность в поверхностных слоях почв. В табл. 2 приведены данные об изменении объемной влажности в слое глубиной до 5 см, из которых следует, что в результате циклического промерзания и оттаивания на небольшую глубину влажность в слое 0-1 см возрастает, а в нижележащих уменьшается.

Таблица 2. Значения объемной влажности почвы, полученные термостатно-весовым способом и восстановленные из дистанционных измерений

Дата Слой	10.10.07		11.10.07	12.10.07	13.10.07	
	Прямые измерения	Дистанц. измерения	Дистанц. измерения	Дистанц. измерения	Прямые измерения	Восстановленный
0-1см	0,346	0,352	0,367	0,374	0,397	0,385
1-2см	0,337	0,313	0,313	0,297	0,280	0,274
2-5см	0,252	0,267	0,256	0,256	0,228	0,240

Таким образом, исследование особенностей суточной динамики термодинамических и радиоярких температур на разных длинах волн позволяет получать дополнительную информацию о гидрофизических свойствах почв.

Литература

1. Бобров П.П., Миронов В.Л., Ивченко О.А., Красноухова В.Н. Спектроскопическая модель диэлектрической проницаемости почв, использующая стандартизованные агрофизические показатели // Исследование Земли из космоса, 2008. № 1. С. 15-23.
2. Choudhury B.J., Schmugge T.J., Chang A., Newton R.W. Effect of surface roughness on the microwave emission from soils //Journal of Geophys. Research. 1979. V.84. №C9. P. 5699-5706.