

В. Л. Миронов, К. В. Музалевский, И. В. Савин
 Институт физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения
 Российской академии наук, Россия, Красноярск

В. У. Заворотный

Лаборатория исследования земных систем, Национальное управление океанических
 и атмосферных исследований, США, штат Колорадо, Боулдер

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЧВ В ЗОНЕ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ С ПОМОЩЬЮ СИГНАЛОВ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ

Показана принципиальная возможность применения сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) для измерения влажности и температуры почвы в зоне вечной мерзлоты. Предложен и описан метод интерпретации интерференционной картины сигналов ГНСС, позволяющий из данных измерений приёмником ГНСС восстановить значения влажности и температуры толщи активного слоя почвы в зоне вечной мерзлоты. Проведенный теоретический анализ основан на экспериментально обоснованной температурно-зависимой обобщенной рефракционной диэлектрической модели смеси для кустарниковой тундровой почвы, богатой органикой.

Исследования показали, что в результате таяния вечной мерзлоты на севере Сибири выбросы метана в атмосферу будут носить глобальный неконтролируемый характер. В связи с этим актуальным является создание дистанционных методов мониторинга состояния вечной мерзлоты. Использование приёмников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), настроенных на работу в режиме рефлектометров, позволяет измерять интерференционную картину сигналов ГНСС. В литературе известны работы по измерению интерференционной картины сигналов ГНСС для талых почв с использованием полуэмпирических моделей диэлектрической проницаемости [1]. Для почв, находящихся в зонах вечной мерзлоты, подвергающихся воздействию широкого диапазона температур, подобный анализ не проводился.

Рассмотрим недавно предложенную новую экспериментально обоснованную температурно-зависимую обобщенную рефракционную диэлектрическую модель смеси (Т-ОРДМС) для кустарниковой тундровой почвы, богатой органикой, которая позволяет рассчитать комплексную диэлектрическую проницаемость (КДП) почвы как функцию влажности, частоты электромагнитного поля, температуры в процессе замерзания и оттаивания почвы [2]. Основываясь на диэлектрической модели тундровой почвы, мы исследуем возможность измерения влажности и температуры почв в зоне вечной мерзлоты с помощью сигналов ГНСС при вариациях температуры, влажности и шероховатости тундровой почвы. Теоретически рассчитана величина $Q(\theta, T, m_g, h_r)$, являющаяся отношением минимальной $P_{H\min}$ к максимальной $P_{H\max}$ мощности сигнала в интерференционной картине, записанной приемником ГНСС в зависимости от температуры T , влажности m_g , шероховатости h_r почвы и зенитного угла θ спутника ГНСС в процессе замерзания, оттаивания почвенного покрова (рис. 1, 2). Как видно из рис. 1, для талой почвы перед замерзанием ($0 < T < 5$ °С) величина $Q(\theta, T, m_g, h_r)$ практически не зависит от температуры. В то же самое время наблюдается значительная зависимость величины $Q(\theta, T, m_g, h_r)$ от влажности почвы и шероховатости поверхности почвы. Основываясь на

данных моделирования, мы можем предложить алгоритм восстановления значений влажности, температуры и шероховатости почвы из регрессионного анализа функции $Q(\theta, T, m_g, h_r)$, используя в качестве регрессионной модели теоретические зависимости, описывающие данную функцию. Отметим, что для восстановления значений влажности и шероховатости почвы не нужно точно знать температуру почвы перед замерзанием, а величина $Q(\theta, T, m_g, h_r)$ является достаточно чувствительной к вариациям влажности и шероховатости почвы, что позволяет создать алгоритмы восстановления данных параметров.

Находя таким образом значения влажности и шероховатости почвы, далее мы можем восстановить и значение температуры замерзшей почвы. Вышеописанный подход позволяет предложить методологию совместного мониторинга влажности и температуры замерзшей арктической почвы, используя измерения сигналов спутников GPS и ГЛОНАСС.

Предварительный анализ показал, что предлагаемый подход является вполне реалистичным и обоснованным. Ценность предлагаемой методологии, которая до настоящего времени не реализована в системах дистанционного зондирования, состоит в измерении температуры толщи активного слоя вечной мерзлоты на глубинах от 0,07...0,1 м и 0,1...0,7 м в случае вариации влажности почвы от 0,56 до 0,94 г/г и от 0,17 до 0,56 г/г соответственно (проведенная оценка глубины зондирования соответствует толщине скин-слоя).

Библиографические ссылки

1. A physical model for GPS multipath caused by land reflections: toward bare soil moisture retrievals / V. Zavorotny, K. Larson, J. Braun et al. // IEEE J. of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2010. Vol. 3(1). P. 100–110.
2. Mironov V. L., De Roo R. D., Savin I. V. Temperature-Dependable Microwave Dielectric Model for an Arctic Soil // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2010. Vol. 48. № 6. P. 2544–2556.

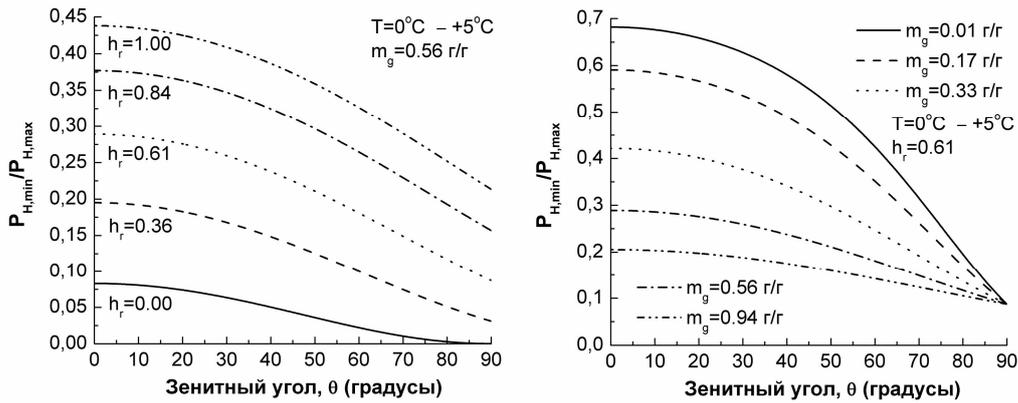


Рис. 1. Зависимости величины P_{Hmin}/P_{Hmax} от зенитного угла при оттаивании арктической почвы ($T = 0 \dots +5^\circ\text{C}$), вычисленные на частоте $f = 1,6$ ГГц, при влажности почвы $m_g = 0,56$ г/г, вариации шероховатости поверхности почвы $h_r = 0,0$ до $h_r = 1,0$ (слева); шероховатости поверхности почвы $h_r = 0,61$, вариации влажности от $m_g = 0$ г/г до $m_g = 0,94$ г/г (справа)

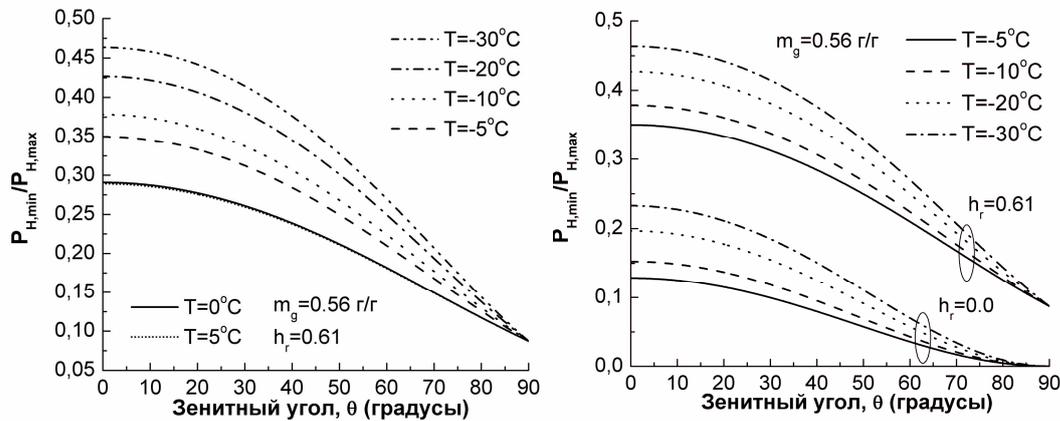


Рис. 2. Зависимости величины P_{Hmin}/P_{Hmax} от зенитного угла для замерзающей арктической почвы с идеально ровной поверхностью $h_r = 0,0$ и при шероховатости поверхности почвы $h_r = 0,61$, при влажности почвы $m_g = 0,56$ г/г и фиксированных температурах $-30, -20, -10, -5, 0, 5^\circ\text{C}$

V. L. Mironov, K. V. Muzalevsky, I. V. Savin

Kirensky Institute of Physics of Russian Sciences Academy, Siberian Branch, Russia, Krasnoyarsk

V. U. Zavorotny

Earth System Research Laboratory, National Oceanic and Atmospheric Administration, USA, Boulder, CO

INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY USING GPS/GLONASS SIGNAL FOR MEASURING THE MOISTURE AND SOIL TEMPERATURE IN THE ACTIVE LAYER OF PERMAFROST

This paper shows the principle possibility of using Global Navigation Satellite Systems (GNSS) signals for measurements of moisture and soil temperature of the active permafrost layer. We propose a method to retrieve moisture and temperature of the thawing/freezing soil based on measuring of the interference pattern of GNSS signals. The theoretical analysis was carried out with the temperature-dependable generalized refractive mixing dielectric model for Arctic soil.