

УДК 528.855, 537.876.23

**Обобщенная зависимость коэффициента излучения
почвенного покрова от температуры и объемной
влажности почвы в бассейне Верхней Оби***

П.Н. Уланов¹, А.Н. Романов², Д.Н. Трошкин², И.В. Хвостов²

¹Алтайский государственный университет, (Барнаул, Россия)

²Институт водных и экологических проблем СО РАН, (Барнаул, Россия)

**The Generalized Dependence of Soil Cover Emissivity
on Temperature and Soil Moisture in the Upper Ob River Basin**

P.N. Ulanov¹, A.N. Romanov², D.N. Troshkin², I.V. Khvostov²

¹Altai State University (Barnaul, Russia)

²Institute for Water and Environmental Problems of the Siberian Branch
of the RAS(Barnaul, Russia)

Приведены результаты измерений диэлектрических и радиоизлучательных характеристик почв, отобранных в Алтайском крае в поймах рек Обь, Алей, Ануй, Катунь, Чарыш. Почвенные образцы отбирались на тестовых участках, затопляемых во время весенних паводков, а также на тестовых участках, удаленных от рек и не попадающих в зону возможного затопления. Лабораторные измерения диэлектрических и радиоизлучательных характеристик почв производились на установке мостового типа с использованием измерителя разности фаз ФК2-18 на частоте 1.413 ГГц. Для образцов, отобранных в поймах рек, установлены обобщенные зависимости показателей преломления и поглощения почвы от ее объемной влажности и температуры. Измеренные зависимости диэлектрических характеристик от температуры в интервале от 262 до 290 К и от объемной влажности в диапазоне от 0 до 0.55 см³/см³ использованы для расчета коэффициентов излучения почвенного покрова. На основе установленных закономерностей рассчитана обобщенная зависимость объемной влажности почвы от коэффициента излучения почвенного покрова. Полученный результат является важным этапом решения задачи по восстановлению пространственно-временного распределения почвенной влаги по данным спутникового микроволнового зондирования в L-диапазоне.

Ключевые слова: показатели преломления и поглощения, комплексная диэлектрическая проницаемость, коэффициент излучения.

The results of measurements of the dielectric and radio emission characteristics of soils sampled in the floodplains of the Ob, Alei, Anuy, Katun, and Charysh rivers in the Altai Territory are presented. Soil samples were obtained on test areas flooded during spring floods, as well as on test sites distanced from rivers and not falling into the zones of possible flooding. Laboratory measurements of dielectric and radio-emitting characteristics of soils were conducted with a bridge type installation using a phase difference meter FK2-18 at the frequency of 1.413 GHz. For samples collected in river floodplains, generalized dependencies of refractions and absorptions on volumetric moisture and temperature are developed. The measured dependencies of the dielectric characteristics on the temperature in the range from 262 to 290 K and on the volumetric moisture in the range from 0 to 0.55 cm³ / cm³ are used to calculate soil cover emissivity. Based on the established regularities, a generalized dependence of the soil moisture on the emissivity of soil cover is calculated. The obtained result is an important step in solving the problems of restoring the spatial-temporal distribution of soil moisture from the data of the L-band satellite microwave remote sensing.

Key words: refractive index and absorption index, complex dielectric constant, emissivity.

DOI 10.14258/izvasu(2018)1-09

*Экспедиционное обследование территории выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ № 17-45-220460 «Разработка дистанционных микроволновых методов космического мониторинга предвестников опасных гидрологических явлений и их апробация на юге Западной Сибири».

Введение

Происходящие в Северном полушарии климатические изменения, связанные с интенсивным потеплением Арктики, охватывают всю Северную Евразию, включая умеренные широты, достигая южных территорий Китая [1]. Эти изменения способствуют активизации опасных гидрологических и метеорологических явлений, таких как аномальные засухи, внезапные паводки и наводнения, ливневые дожди, летние снегопады, зимние оттепели, обледенение почв. Изменение температуры окружающей среды оказывает влияние на многие природные процессы, в том числе на формирование стока рек, их гидрологический режим. Межгодовые колебания включают в себя увеличение водности рек в зимний период, их более раннее вскрытие и более позднее замерзание. Детальное изучение современных гидрологических изменений необходимо для возможности надежного прогнозирования возникающих опасных природных явлений и для принятия практических мер по уменьшению негативных последствий при их наступлении.

Наблюдаемые в Северном полушарии изменения гидрологического режима связаны с изменением количества осадков и вариациями температуры в бассейнах арктических рек [2], деградацией многолетнемерзлых почв, растительности, более сильным прогреванием почвенного покрова на участках дефляции, возрастанием скорости испарения и, как результат, поступлением в атмосферу дополнительного количества водяного пара и метана, способствующих увеличению парникового эффекта [3–5]. Начиная с 1960-х гг. в Северном полушарии наблюдается повышение температуры воздуха, уменьшение количества твердых осадков, уменьшение массы ледников, а также суммарной площади морских льдов в Сибирской Арктике [6].

В последние несколько лет на юге Западной Сибири (Алтайский край, республики Алтай, Тыва, Хакасия) наблюдался ряд опасных гидрологических

явлений, приведших к человеческим жертвам среди населения, нанесших значительный ущерб социально-экономической сфере регионов в результате затопления населенных пунктов, сельскохозяйственных полей, гибели домашнего скота, порче личного и общественного имущества (сильные паводки 2010 и 2013 гг., аномальный паводок 2014 г.).

Для регулярного мониторинга гидрологической обстановки широко используются дистанционные методы космического мониторинга, позволяющие получать объективную информацию о состоянии подстилающей поверхности, а также выявлять на ранних стадиях возможность возникновения опасных гидрологических и метеорологических явлений, оценивать их интенсивность. Ведутся дистанционные исследования гидрологических процессов, производится оценка состояния поверхностных вод, использования воды в экосистемах, изменения облачности, водяного пара, осадков, испарения и транспирации, появления снега и льда [7, 8].

Для дистанционной оценки вероятности возникновения опасных гидрологических явлений могут быть использованы микроволновые методы, основанные на зависимостях радиоизлучательных характеристик почвенного покрова от температуры и объемной влажности почвы. В данной работе приведены результаты исследований диэлектрических и радиоизлучательных характеристик почв Алтайского края при вариациях объемной влажности и температуры.

Методика исследований

В качестве объектов исследования использовались образцы почв, отобранные в Алтайском крае в бассейне Верхней Оби. Почвенные образцы отбирались на затопляемых во время весенних паводков тестовых участках в поймах рек Обь, Алей, Ануй, Катунь и Чарыш, а также на тестовых участках, удаленных от рек и не попадающих в зону возможного затопления. Схема размещения площадок отбора представлена на рисунке 1.

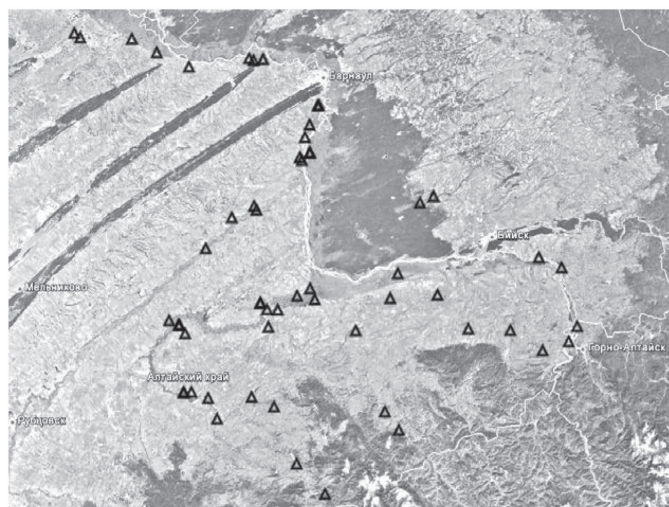


Рис. 1. Карта-схема участков отбора почвенных образцов

Для количественного описания содержащейся в почвенных образцах воды использовались объемная ($W = V_B / V$ [см³/см³]) и массовая ($W_M = M_V / M$ [г/г]) влажности, связанные между собой отношением $W = (\rho / \rho_B) \cdot W_M$, где V , V_B — объемы почвы и жидкой фазы, $M = M_{\text{сух}} + M_B$ — масса влажного почвенного образца, $M_{\text{сух}}$, M_B — массы сухой почвы и воды, ρ , $\rho_B = 1$ — плотности почвы и воды. Величина $\rho = M / V$ [см³/см³] определялась путем отбора почвенного образца в натурных условиях в емкость известного объема ($V \approx 4$ см³) и взвешивания на аналитических весах с погрешностью не более 10^{-4} г.

На лабораторной установке мостового типа, созданной на основе измерителя разности фаз ФК2-18, измерялись ослабление и сдвиг фазы электромагнитной волны, прошедшей через исследуемый почвенный образец, помещенный в измерительный коаксиальный волновод объемом 3.7 см³. Погрешность измерений ослабления составляла 0.5 дБ, погрешность измерения фазы — 2 град. Обоснование выбора метода мостовых схем для решения электродинамической задачи о прохождении электромагнитной волны через слой диэлектрика, описание использованной аппаратуры, методика расчета диэлектрических и радиоизлучательных характеристик образцов, а также оценочные значения возникающих погрешностей подробно описаны в работе [9].

Перед измерением каждый образец измельчали и тщательно перемешивали до однородного состо-

яния. В зависимости от влажности грунта и его набивки в измерительный контейнер массы исследуемых образцов составляли 3.3–5.5 г, плотности $\rho \approx 1.2 \div 1.8$ г/см³. Различие масс и плотностей исследованных образцов учитывали при обработке результатов диэлектрических измерений. Увлажнение образцов производилось дистиллированной водой.

Для описания диэлектрических и радиоизлучательных характеристик почвенных образцов использовали комплексный показатель преломления $N = \sqrt{\varepsilon} = n + ik$, где n , k — показатели преломления и поглощения, комплексная диэлектрическая проницаемость (КДП) $\varepsilon = \varepsilon' + i \cdot \varepsilon''$, где ε' , ε'' — действительная и мнимая части КДП, связанные с n и k соотношениями [10] $\varepsilon' = n^2 - k^2$ и $\varepsilon'' = 2nk$, а также коэффициент излучения χ , связанный с n и k соотношением $\chi = 4n / ((n+1)^2 + k^2)$ [9]. Экспериментальные зависимости диэлектрических характеристик от температуры и влажности аппроксимировались непрерывными зависимостями с помощью пакета Microcal™ Origin 6.1.

Результаты исследований

На рисунке 2а приведены экспериментальные значения показателей преломления и поглощения для всех почв, отобранных с тестовых участков в бассейне Верхней Оби.

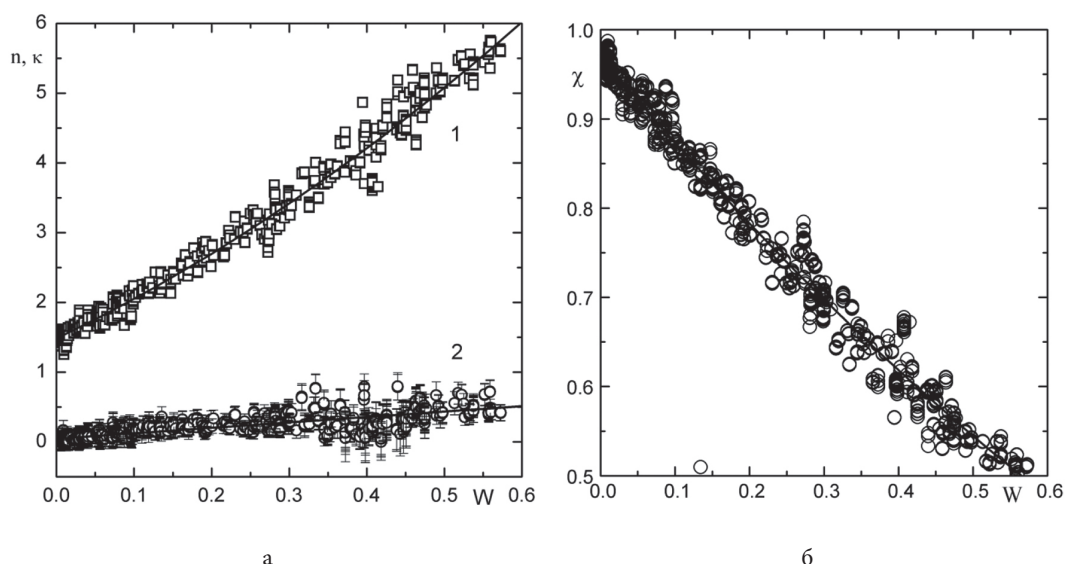


Рис. 2. Зависимости показателей преломления n (1) и поглощения k (2) от влажности для всех почв, отобранных с тестовых участков в бассейне Верхней Оби (а).

Обобщенная зависимость коэффициента излучения χ почвы от объемной влажности W (б)

Из рисунка 2а видно, что величины n и k оказываются достаточно близкими по численным значениям для почвенных образцов, отобранных с разных участков. Это дает возможность расчета одной эмпи-

рической обобщенной зависимости для почв в бассейне Верхней Оби. Обобщенная зависимость $n(W)$, аппроксимированная полиномом второй степени, имеет следующий вид:

$$n = (1.48 \pm 0.01) + (5.34 \pm 0.12)W + (3.70 \pm 0.24)W^2, \quad \sigma = 0.2,$$

где σ – среднеквадратическая погрешность. Обобщенная зависимость $k(W)$, аппроксимированная прямой линией, имеет следующий вид:

$$\kappa = (0.047 \pm 0.004) + (0.777 \pm 0.016)W, \quad \sigma = 0.66.$$

Выбор вида аппроксимирующей функции осуществлялся на основе минимизации величины σ .

На рисунке 26 приведена расчетная обобщенная зависимость коэффициента излучения от объемной влажности при зондировании в надири, имеющая вид

$$\chi = (0.893 \pm 0.001) - (1.245 \pm 0.013)W + (0.687 \pm 0.025)W^2, \quad \sigma = 0.02.$$

Обратная зависимость $W(\chi)$ может быть использована для дистанционной оценки влажности почвы.

Наилучшим образом она описывается полиномом второй степени:

$$W = (1.281 \pm 0.015) - (2.167 \pm 0.047)\chi + (0.826 \pm 0.036)\chi^2, \quad \sigma = 0.026.$$

Заметное влияние на радиоизлучательные характеристики почвенного покрова оказывает температура почвы. На рисунке 3 приведены экспериментальные значения коэффициентов излучения почв, различающихся по влажности, измеренные при разной температуре в интервале 262–290 К. Видно, что наибольшие вариации коэффициентов излучения наблюдаются в интервале температур интенсивных фазовых переходов, связанных с замерзанием почвенной влаги и образованием в почве льда. Радиояркостный контраст $\Delta\chi$, зависит от величины W и для разных значений W изменяется от 0.15 до 0.35. В интервале отрицательных температур значения χ для образцов разной влажности близки и варьируют в пределах 0.80–0.85. В интервале положительных температур разброс значений χ , зависящих от W , достигает 0.20.

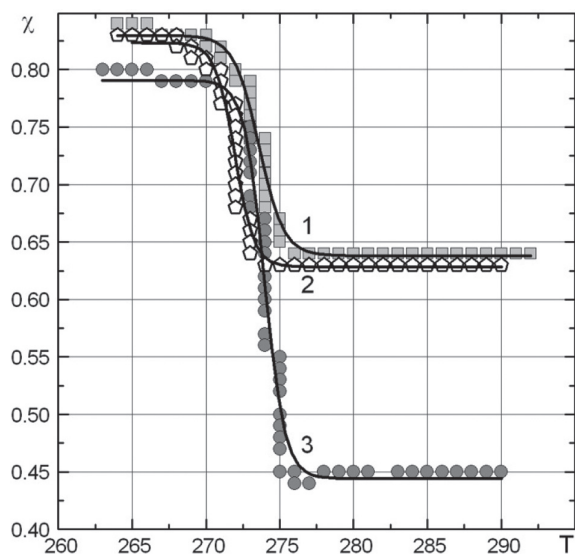


Рис. 3. Зависимости коэффициентов излучения почвы с объемной влажностью $W = 0.36 \text{ см}^3/\text{см}^3$ (1), $0.40 \text{ см}^3/\text{см}^3$ (2), $0.54 \text{ см}^3/\text{см}^3$ (3) от температуры

Эмпирические зависимости $\chi(T)$, представленные на рисунке 3, наилучшим образом описываются функцией следующего вида:

$$\chi = \frac{\chi_1 - \chi_2}{1 + \exp\left[\frac{T - T_0}{dT}\right]} + \chi_2, \quad (1)$$

где χ_1, χ_2 — начальное и конечное значения коэффициентов излучения; T_0 — средняя температура; dT — ширина фазового перехода. Численные значения коэффициентов, входящих в соотношение (1), приведены в таблице.

Значения численных коэффициентов в соотношении (1)

W_v	χ_1	χ_2	t_0	Δt
0.36	0.83	0.64	273.6	0.839
0.40	0.82	0.63	271.9	0.657
0.54	0.79	0.44	273.9	0.688

Заключение

В результате лабораторных измерений диэлектрических и радиоизлучательных характеристик почв, отобранных в Алтайском крае в поймах рек Обь, Алей, Ануй, Катунь и Чарыш, установлена обобщенная зависимость коэффициента излучения χ почвенного покрова от объемной влажности W . С использованием этой зависимости рассчитана обратная зависимость $W(\chi)$, позволяющая по измеренным значениям коэффициента излучения почвенного покрова дистанционно оценивать объемную влажность почвы. Для почв, различающихся по влажности, оценено влияние температуры на коэффициент излучения почвенного покрова. Установленные зависимости могут быть использованы при разработке дистанционного микроволнового способа определения влажности почвенного покрова.

Библиографический список

1. He S., Gao Y., Li F., Wang H., He Y. Impact of Arctic Oscillation on the East Asian climate: A review // *Earth-Science Reviews*. — 2017. — V. 164. DOI:10.1016/j.earscirev.2016.10.014.
2. Bring A., Destouni G. Hydro-climatic changes and their monitoring in the Arctic: Observation-model comparisons and prioritization options for monitoring development // *Journal of Hydrology*. — 2013. — V. 492. DOI:10.1016/j.jhydrol.2013.04.003
3. Harris C. et al. Permafrost and climate in Europe: Monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses // *Earth-Science Reviews*. — 2009. — V. 92, № 3–4.
4. Bergamaschi P., Houweling S., Segers A., et al. Atmospheric CH₄ in the first decade of the 21st century: inverse modeling analysis using SCIAMACHY satellite retrievals and NOAA surface measurements // *J. Geophys. Res. Atmos.* — 2013. — V. 118.
5. Koven C.D., Riley W.J., Stern A. Analysis of permafrost thermal dynamics and response to climate change in the CMIP5 Earth system models // *J. Clim.* — 2013. — V. 26.
6. Konya K., Kadota T., Yabuki H., Ohata T. Fifty years of meteo-glaciological change in Toll Glacier, Bennett Island, De Long Islands, Siberian Arctic // *Polar Science*. — 2014. — V. 8, №. 2. DOI:10.1016/j.polar.2013.10.002.
7. Su Z., Roebeling R.A., Schulz J. Observation of Hydrological Processes Using Remote Sensing // *Treatise on Water Science*. — 2011. — V. 2.
8. Schaepman M.E. Spectrodirectional remote sensing: From pixels to processes // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. — 2007. — V. 9, № 2.
9. Комаров С.А., Миронов В.Л., Романов А.Н. Аэрокосмическое зондирование гидрологического состояния почв радиофизическими методами. — Барнаул, 1997.
10. Шарков Е.А. Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы. — М., 2014. — Т. 1.