

Дистанционное измерение профилей влажности в пахотном слое почвы на основе поляриметрических наблюдений коэффициента отражения в Р- и С-диапазонах частот. Эксперимент

К. В. Музалевский

*Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН —
обособленное подразделение Федерального исследовательского центра
«Красноярский научный центр СО РАН», Красноярск, 660036, Россия
E-mail: rsdkm@ksc.krasn.ru*

В данном сообщении экспериментально подтверждена принципиальная возможность дистанционного измерения профилей влажности в пахотном слое почвы с пригодной для практического применения точностью на основе поляриметрических измерений коэффициента отражения на двух частотах 630 МГц и 5,4 ГГц. Коэффициенты отражения измерялись под углом 35° импульсным методом в ходе естественных циклов испарения и увлажнения пахотного слоя почвы на участке сельскохозяйственного поля, находящегося под паром в районе пос. Минино, Красноярский край. Профили влажности почвы восстанавливались в ходе решения обратной задачи, информативным признаком в которой выступало отношение коэффициентов обратного радарного рассеяния на согласованных линейных поляризациях. Отношение коэффициентов обратного радарного рассеяния было оценено в скалярном приближении метода Кирхгофа в виде отношения коэффициентов отражения по мощности, измеренных на горизонтальной и вертикальной поляризациях. Среднеквадратическое отклонение и коэффициент детерминации между восстановленными и измеренными значениями объёмной влажности в поверхностном слое почвы толщиной 10 см оказались равны 2,2 % и 0,91 соответственно. Исследование показывает перспективность разработки поляриметрических многочастотных радиолокационных систем комбинированного сверхвысокочастотного и дециметрового диапазонов для дистанционного зондирования профилей влажности пахотного слоя почв.

Ключевые слова: радиолокация, беспилотный летательный аппарат, агропочвы, влажность почвы, пахотный слой, диэлектрическая проницаемость

Одобрена к печати: 13.05.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-145-148

До настоящего времени в производственный процесс ресурсосберегающего земледелия индивидуальных сельхозпроизводителей не внедрены технологии дистанционного зондирования влажности почв с аэроплатформ беспилотных летательных аппаратов (БПЛА, квадрокоптер). В 2019 г. впервые (Wu et al., 2019) на основе рефлектометрических измерений в Р-диапазоне частот (500–700 МГц) в надир с борта малого БПЛА экспериментально продемонстрирована возможность дистанционного зондирования средней влажности поверхностного слоя почвы. Однако, как было показано в публикации (Музалевский, 2019), на практике восстановленное в Р-диапазоне частот среднее значение влажности почвы невозможно соотнести с конкретной глубиной или толщиной поверхностного слоя почвы. В частности, на частоте 435 МГц толщина подобного слоя почвы, существенная для формирования отражённой волны, увеличивается с ~ 1 до ~ 7 см при уменьшении объёмной влажности поверхности почвы с 35 до 2 % в ходе её естественного высыхания в течение 36 дней после орошения (Музалевский, 2019). Вместе с тем в работе (Музалевский, 2019) был предложен двухчастотный поляриметрический способ измерения вертикальных профилей влажности в пахотном слое почвы, который может быть реализован на основе спутниковых радарных данных Sentinel-1 и BIOMAS (Carreiras et al., 2017), а также рефлектометрических измерений с борта БПЛА.

В данном кратком сообщении представлено экспериментальное подтверждение методики дистанционного зондирования профилей влажности почвы, предложенной в теоретической работе (Музалевский, 2019), на основе данных дистанционных измерений коэффициента отражения на частотах 5,4 ГГц и 630 МГц, приведённых в публикации (Музалевский, 2020). Профили влажности почвы восстанавливались в ходе решения обратной задачи, информативным признаком в которой выступало отношение коэффициентов обратного радарного рассеяния на согласованных горизонтальной (НН) и вертикальной (VV) поляризациях $P = \sigma_{\text{НН}}/\sigma_{\text{VV}}$. Отношение коэффициентов обратного радарного рассеяния P было оценено в скалярном приближении метода Кирхгофа (Музалевский, 2019, формула (2)) в виде отношения коэффициентов отражения по мощности, измеренных на горизонтальной, $|R_{\text{Н}}|^2$, и вертикальной, $|R_{\text{V}}|^2$, поляризациях $P = \sigma_{\text{НН}}/\sigma_{\text{VV}} \equiv |R_{\text{Н}}|^2/|R_{\text{V}}|^2$. При этом для модельных величин коэффициентов отражения в отличие от работы (Музалевский, 2019) использовалась диэлектрическая модель (Mironov et al., 2020), а в отличие от публикации (Музалевский, 2020, формула (7)) — модельный профиль влажности почвы в виде экспоненциальной функции (Музалевский, 2019, формула (3)). Коэффициенты отражения (Музалевский, 2020, табл. 3) измерялись с 18 июля по 5 августа 2019 г. в полевых условиях под углом 35° импульсным методом на участке сельскохозяйственного поля размером 3×3 м, находящегося под паром в районе пос. Манино, Красноярский край ($56,0865^\circ$ с. ш., $92,6791^\circ$ в. д.). Среднеквадратическое отклонение (СКО) высоты неровностей поверхности почвенного покрова находилось в пределах 5,7–8,2 мм. Тестовый участок искусственно не орошался, коэффициенты отражения измерялись в ходе естественных циклов испарения и увлажнения почвы. Содержание глинистой фракции в поверхностном слое ~ 25 см почвенного покрова составляло $\sim 34\%$. Вертикальные профили объёмной влажности в пахотном слое почвы измерялись контактным методом датчиком GS3 компании Decagon (США) с погрешностью не хуже чем $0,04 \text{ см}^3/\text{см}^3$. Средняя плотность сухого сложения почвы в поверхностном слое ~ 10 см оказалась равна $1,09 \text{ г}/\text{см}^3$. Данное значение использовалось в диэлектрической модели (Mironov et al., 2020) для восстановления профилей влажности почвы в ходе всех дней эксперимента.

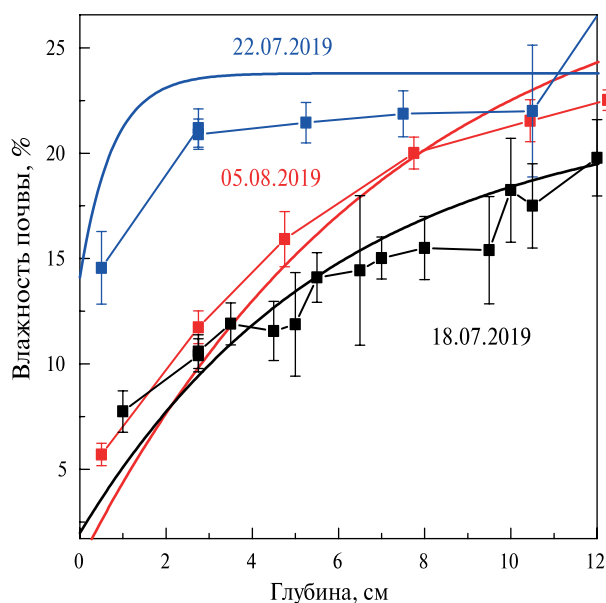


Рис. 1. Профили влажности почвы, восстановленные из данных дистанционного зондирования (сплошные линии) и измеренные контактным методом (символы) на тестовом участке. Усами обозначены доверительные интервалы (95 %)

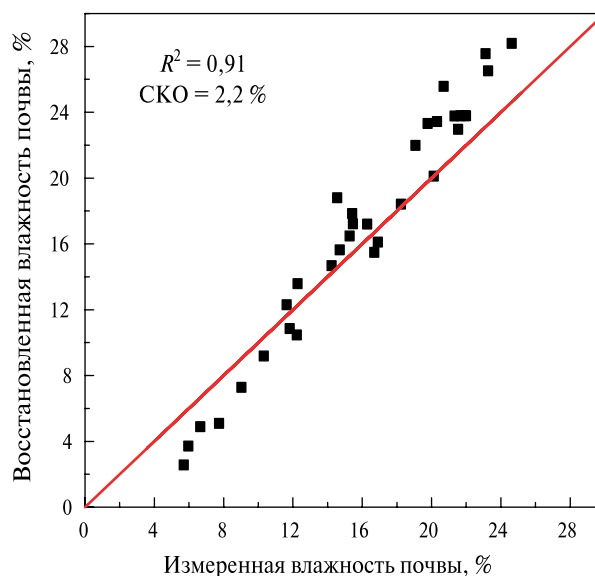


Рис. 2. Зависимость восстановленных значений влажности почвы от измеренных 18, 22, 29, 30 июля и 5 августа 2019 г. в слое толщиной 10 см. R^2 — коэффициент детерминации

В качестве примера на *рис. 1* (см. с. 146) представлены восстановленные из данных дистанционных измерений и измеренные датчиком на тестовом участке профили влажности почвы (один профиль влажности, который был восстановлен с наибольшей погрешностью 22.07.2019, и два из типичных профилей, восстановленных 18.07.2019 и 05.08.2019 с приемлемой погрешностью). На *рис. 2* (см. с. 146) приведена корреляция между восстановленными и измеренными значениями влажности в поверхностном слое почвы толщиной 10 см. Предварительные экспериментальные результаты показывают обоснованность предложенного в работе (Музалевский, 2019) дистанционного способа измерения профилей влажности почвы, непокрытой растительностью, с приемлемой для практики погрешностью (СКО = 2,2 %).

Авторы видят необходимость дальнейших исследований по изучению влияния растительного покрова, плотности и гранулометрического состава почвенного покрова, шероховатости её поверхности на точность прогнозирования влажности почвы. В будущем авторы планируют реализовать предложенную методику в моностатической или бистатической (тандем синхронно движущихся БПЛА) конфигурации с использованием компактного многочастотного рефлектометра, созданного на основе портативного анализатора спектра (<http://www.plan-archel.ru/Products/Measurement%20instrument/r-series>).

Работа выполнена в рамках проекта Российского фонда фундаментальных исследований № 18-05-00405, методика измерения коэффициентов отражения была разработана при поддержке проекта государственного задания № 0356-2019-0004.

Литература

1. *Музалевский К. В.* Возможности дистанционного зондирования профилей влажности почв на основе поляриметрических наблюдений обратного рассеяния волн в P- и C-диапазонах частот // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 203–216.
2. *Музалевский К. В.* Дистанционное измерение влажности в поверхностном слое минеральной почвы на двух частотах // Журн. радиоэлектроники. 2020. № 1. 23 с. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan20/7/text.pdf>.
3. *Carreiras J. M. B., Quegan S., Le Toan T.* Coverage of high biomass forests by the ESA BIOMASS mission under defense restrictions // Remote Sensing of Environment. 2017. V. 196. P. 154–162.
4. *Mironov V. L., Karavayskiy A. Yu., Lukin Yu. I., Molostov I. P.* A dielectric model of thawed and frozen Arctic soils considering frequency, temperature, texture, and dry density // Intern. J. Remote Sensing. 2020. V. 41. No. 10. P. 3845–3865.
5. *Wu K., Rodriguez G. A., Zajc M., Jacquemin E., Clément M., De Coster A., Lambot S.* A new drone-borne GPR for soil moisture mapping // Remote Sensing of Environment. 2019. V. 235. No. 111456.

Remote sensing of moisture profiles in the arable soil layer based on polarimetric observations of the reflection coefficient in the P- and C-bands. Experiment

K. V. Muzalevskiy

*Kirensky Institute of Physics SB RAS, Krasnoyarsk 660036, Russia
E-mail: rsdkm@ksc.krasn.ru*

This report experimentally confirmed the fundamental possibility of remote sensing of moisture profiles in the arable soil layer with practical acceptable accuracy based on polarimetric measurements of the reflection coefficient at two frequencies of 630 MHz and 5.4 GHz. Reflection coefficients were

measured at an angle of 35° by the impulse method, during natural cycles of the evaporation and moistening of soil arable layer in a plot of an agricultural field under steam in the area of Minino village, Krasnoyarsk region. Soil moisture profiles were retrieved in the course of solving the inverse problem, in which cost function was the ratio of the backscattering coefficients taken on coincident linear polarizations. The ratio of the backscattering coefficients was estimated by the scalar Kirchhoff approximation in the form of a ratio of power reflection coefficients, which were measured on horizontal and vertical polarizations. The standard deviation and the determination coefficient between the retrieved and measured soil moisture in the 10 cm topsoil were 2.2 % and 0.91, respectively. The study shows the prospects of developing polarimetric multi-frequency radar systems of combined UHF and SHF bands for remote sensing of moisture profiles in the arable layer of soils.

Keywords: radar, unmanned aerial vehicle, agricultural soils, soil moisture, arable layer, dielectric constant

Accepted: 13.05.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-145-148

References

1. Muzalevskiy K. V., *Vozможности дистанционного зондирования профилей влажности почв на основе поляриметрических наблюдений обратного рассеяния волн в P- и C-диапазонах частот (Possibilities of remote sensing of the soil moisture profile based on backscattering polarimetric observations in P- and C-bands)*, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 5, pp. 203–216.
2. Muzalevskiy K. V., *Distantsionnoe izmerenie vlazhnosti v poverkhnostnom sloe mineral'noi pochvy na dvukh chastotakh (Remote sensing of the topsoil moisture of mineral soil at two frequencies)*, *Zhurnal radioelektroniki*, 2020, No. 1, 23 p., available at: <http://jre.cplire.ru/jre/jan20/7/text.pdf>.
3. Carreiras J. M. B., Quegan S., Leo T., *Coverage of high biomass forests by the ESA BIOMASS mission under defense restrictions*, *Remote Sensing of Environment*, 2017, Vol. 196, pp. 154–162.
4. Mironov V. L., Karavayskiy A. Yu., Lukin Yu. I., Molostov I. P., *A dielectric model of thawed and frozen Arctic soils considering frequency, temperature, texture, and dry density*, *Intern. J. Remote Sensing*, 2020, Vol. 41, No. 10, pp. 3845–3865.
5. Wu K., Rodriguez G. A., Zajc M., Jacquemin E., Clément M., De Coster A., Lambot S., *A new drone-borne GPR for soil moisture mapping*, *Remote Sensing of Environment*, 2019, Vol. 235, No. 111456.