

ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 631.43

DOI 10.25587/SVFU.2022.27.3.001

*Г.Р. г. Бабаева¹, Ю.Г. Данилов²*¹ Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку, Азербайджанская Республика² СВФУ им. М.К. Аммосова, г. Якутск, РоссияКОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ
СОДЕРЖАНИЯ ВЛАГИ В ПОЧВЕ

Аннотация. Спектральные методы измерения влажности почвы широко используются при проведении как контактных, так и дистанционных измерений. В спектральных методах определения влажности почвы в основном используются отражательные спектры почвы, наиболее информативными из которых являются ближне-инфракрасные (NIR) и средне-инфракрасные участки спектра. Известен двухволновый метод измерения, в котором используются длины волн 1450 нм и 1300 нм на отражательном спектре, которые не подвержены влиянию органических веществ, имеющихся в почве. Однако известны доказательства того, что двухволновый отражательный метод определения влаги в почве в зависимости от используемых конкретных длин волн может быть подвержен влиянию содержания глины в почве. Разработан комбинированный метод определения водного содержания почвы. Метод основан на двух известных способах определения водного содержания почвы, предусматривающих измерение отражательного сигнала, определенного по спектру отражения, а также учет постоянных коэффициентов, зависящих от длины волны излучения. Предлагаемый совмещенный метод предполагает определение указанных постоянных коэффициентов во втором способе используя измерения на трех участках Земли после проведения измерений по первому способу на двух длинах волн при известных постоянных коэффициентах. Далее, на этапе совмещения этих методов осуществляется такой выбор длины волны проводимых измерений, при котором разность между результатами измерений по двум совмещаемым методам достигает минимума.

Ключевые слова: водное содержание, почва, длина волны, дистанционное зондирование, отражательный спектр, калибровка, валидация, двухволновые измерения, спектральные методы, проксимальные методы, контактные методы.

*G.R. g. Babayeva¹, Yu.G. Danilov²*¹ National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan² M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

COMBINED METHOD FOR MEASURING SOIL MOISTURE CONTENT

Abstract. Spectral methods of measuring soil moisture are widely used in both contact and remote measurements. Spectral methods for determining soil moisture mainly use reflective spectra of soil, the most informative of which

¹ БАБАЕВА Гюльшен Рауф гызы – с.н.с. ОКБ Космического приборостроения. Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку. Азербайджанская Республика. E-mail: gulshen.babayeva@gmail.com

БАБАЕВА Gulshen Rauf gyzy – Senior Researcher, National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan. E-mail: gulshen.babayeva@gmail.com

² ДАНИЛОВ Юрий Георгиевич – к.г.н., проф. Эколого-географического отделения Института естественных наук СВФУ им. М.К. Аммосова. E-mail: iug.danilov@s-vfu.ru

ДАНИЛОВ Yury Georgievich – Candidate of Geographical Sciences, Professor, Department of Ecology and Geography, Institute of Natural Sciences, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University. E-mail: iug.danilov@s-vfu.ru

are near-infrared (NIR) and mid-infrared sections of the spectrum. A two-wave measurement method is known, which uses wavelengths of 1450 nm and 1300 nm on the reflective spectrum, which are not affected by organic substances present in the soil. However, there is evidence that a two-wave reflective method for determining soil moisture, depending on the specific wavelengths used, may be influenced by the clay content in the soil. A combined method for determining the water content of the soil has been developed. The method is based on two known methods for determining the water content of the soil, providing for the measurement of a reflective signal determined by the reflection spectrum, as well as taking into account constant coefficients depending on the wavelength of radiation. The proposed combined method involves the determination of these constant coefficients in the second method using measurements on three sites of the earth after measurements by the first method at two wavelengths at known constant coefficients. Further, at the stage of combining these methods, the wavelength of the measurements is selected in such a way that the difference between the measurement results of the two combined methods reaches a minimum.

Keywords: water content, soil, wavelength, remote sensing, reflective spectrum, calibration, validation two-wave measurements, spectral methods, proximal methods, contact methods.

Введение

Содержание влаги в почве можно интерпретировать как временное хранение воды в неглубоком слое верхней поверхности Земли по сравнению с общим количеством воды в глобальном масштабе. Этот показатель важен при исследовании агрономических, гидрологических и метеорологических процессов разного масштаба, например, при оценке и прогнозировании наводнений, эрозионных процессов, других природных бедствий.

Нами проведена разработка комбинированного метода измерения содержания влаги в почве путем выбора общей длины волны для соответствующих методов, при котором разница в вычисленных значениях *SMC* минимальна.

Измерения содержания влаги в почве

Влажность почвы может быть определена контактными и дистанционными методами. К контактному методу могут быть отнесены гравиметрические, нейтронные, рефлектометрические, емкостные, тензометрические и гигрометрические способы определения содержания влаги в почве [1-6]. Вместе с тем, контактные методы трудоемки и требуют значительных материальных и трудовых затрат. В отличие от них, методы дистанционного зондирования, основанные на отражательных характеристиках влажной почвы, позволяют избежать указанных недостатков [7-8]. Обзор указанных методов был приведен в работе [9], в которой рассматривались проблемы измерения влаги в почве с точки зрения исследования экологии и гидрологии в масштабе бассейнов гидрообъектов.

Вместе с тем с развитием дистанционных методов важность и значимость контактных методов ничуть не снижается. Дело в том, что любая бортовая информация, полученная от удаленных летательных объектов, оснащенных дистанционным измерительным оборудованием должна быть подтверждена путем реализации таких стандартных процедур как калибровка и валидация, для выполнения которых используются контактные методы измерений.

С физической точки зрения, спектральные методы измерения влажности почвы наиболее широко распространены. Это, в частности, объясняется тем, что спектральные методы используются как при дистанционных, так и при контактных измерениях. Особую группу здесь составляют проксимальные методы спектральных измерений, в которых влияние атмосферы на результат измерений почти отсутствует [10]. В спектральных методах определения влажности почвы в основном используются отражательные спектры почвы, наиболее информативными из которых являются ближне-инфракрасные (NIR) и средне-инфракрасные участки спектра. Например, в работе [11] сообщается о разработке двух волнового сенсора, работающего на длинах волн 1,94 мкм и 1,8 мкм где, на первой имеется сильная линия поглощения влаги, а на второй поглощение незначительно. Совместная обработка сигналов указанных каналов позволяет

вычислить содержание влаги в почве. В работе [12] указано, что информация о содержании влаги в почве содержится на длинах волн 1450, 1940 и 2200 нм в отражательном спектре. В работе [13] сообщается о создании сенсора, в котором используются длины волн 1450 нм и 1300 нм на отражательном спектре, которые не подвержены влиянию органических веществ, имеющихся в почве. В работе [14] показано, что двухволновый отражательный метод определения влаги в почве в зависимости от используемых конкретных длин волн может быть подвержен влиянию содержания глины в почве, что косвенно подтверждает мысль, высказанную в [13] о возможном влиянии содержания минералов в почве. На рис. 1 показан общий вид используемой лабораторной установки при проведении двухволновых измерений.

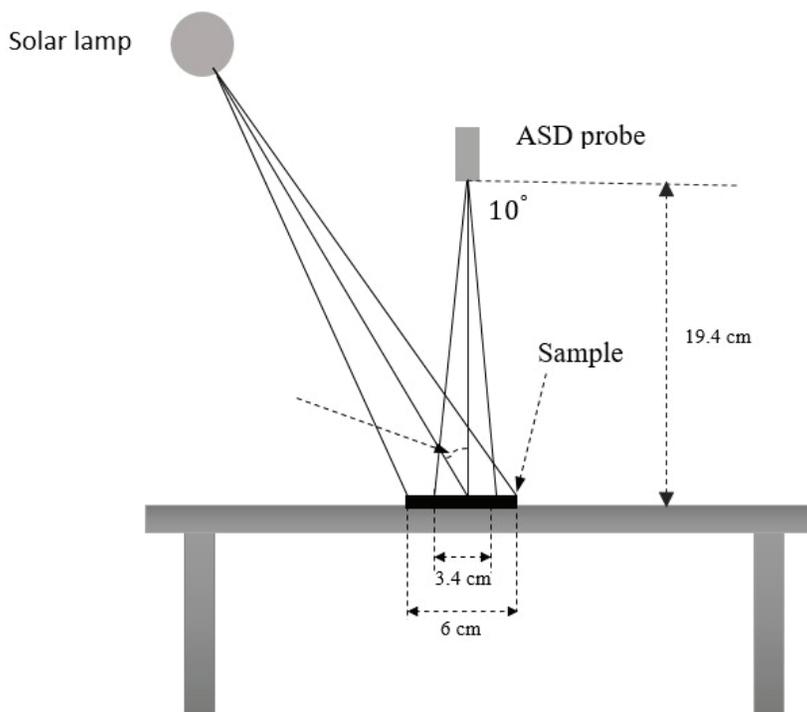


Рис. 1. Схематическое представление лабораторной установки, используемой для проведения двухволновых измерений

Предлагаемый метод

Проведенный анализ существующих методов определения содержания влаги в почве с использованием отражательных спектров в почве показывает, что результат этих исследований обычно представляются в двух вариантах:

1. Общее содержание влаги в почве SMC определяется в качестве некоторой функции

$$SMC = F_1(U(\lambda_1), U(\lambda_2), a_i) \quad (1)$$

где: $U(\lambda_1)$ – сигнал отражения почвы в SWIR диапазоне; $U(\lambda_2)$ – сигнал отражения почвы в видимом диапазоне; a_i – постоянные, зависящие от технологии изготовления сенсора.

2. Сигнал отражения на определенной длине волны $I(\lambda_0)$ определяется в качестве степенной функции SMC в виде полинома

$$I(\lambda_0) = F_2(SMC^2, SMC, b_j(\lambda_0)) \quad j=1,3 \quad (2)$$

где: SMC^2, SMC – члены степенного полинома;

$b_j(\lambda_0)$ – постоянные коэффициенты, зависящие от длины волны.

Целью настоящего исследования является разработка комбинированного метода измерения содержания влаги в почве путем совмещения выражений (1) и (2), путем выбора общей длины волны для соответствующих методов, при котором разница в вычисленных значениях SMC минимальна.

Алгоритм предлагаемого метода состоит в следующем:

1. Принимается $\lambda_1 = \lambda_0$ и проводятся измерения отраженного сигнала $U(\lambda_1) = I(\lambda_0)$.
2. При известных a_i проводятся измерения $U(\lambda_2)$ и вычисляется величина SMC используя явную форму записи формулы (1).
3. Измерения по пунктам 1,2 проводятся для трех разных образцов почвы с разной величиной SMC . Как результат, получаем множество $(SMC_1; SMC_2; SMC_3)$.
4. С учетом полученных величин SMC_j , используя (2) составляется система уравнений

$$\begin{aligned} I(\lambda_0) &= F_{21}(SMC_1^2; SMC_1; b_j(\lambda_0)) \\ I(\lambda_0) &= F_{22}(SMC_2^2; SMC_2; b_j(\lambda_0)) \\ I(\lambda_0) &= F_{23}(SMC_3^2; SMC_3; b_j(\lambda_0)) \end{aligned} \quad (3)$$

Решение системы уравнений (3) относительно b_j ; $j = \overline{1,3}$; позволяет определить эти коэффициенты на длине волны λ_0 . Таким образом, наличие информации о коэффициентах a_i в методе (1), позволяет определить коэффициенты $b_j(\lambda_0)$, необходимые для реализации метода (2) при условии, что результаты методов (1) и (2) должны максимально совпадать.

Блок-схема алгоритма приведена на рис. 2

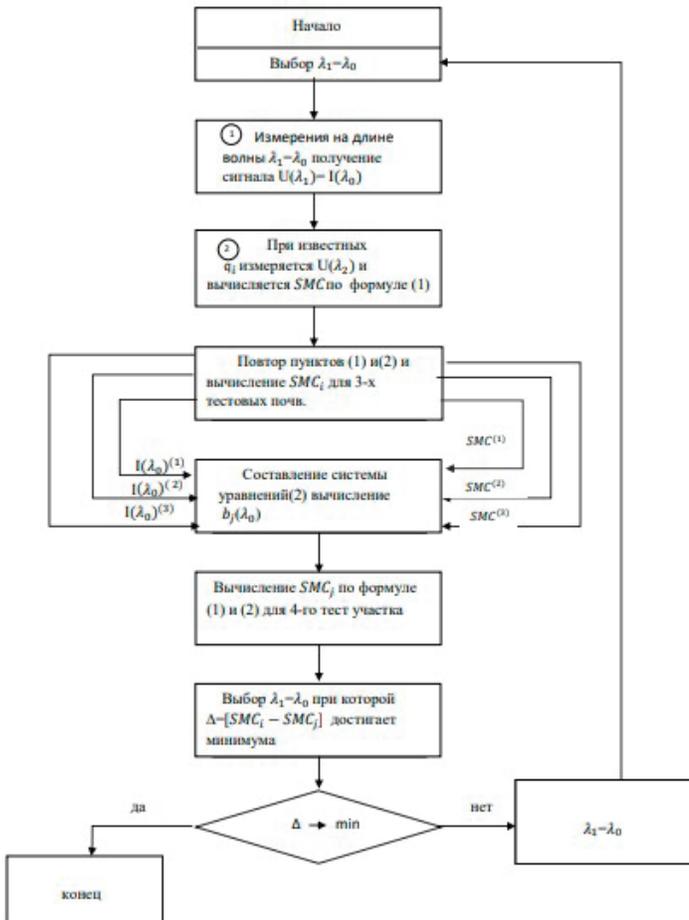


Рис. 2. Блок-схема алгоритма реализации предлагаемого метода

Модельное исследование

Для подтверждения возможности реализации вышеизложенного метода проведем теоретико-модельное исследование. Согласно [15], SMC может быть измерен по формуле

$$SMC_1 = a_0 + a_1 \log P_i(\lambda_1) + a_2 \log Q_1(\lambda_2) \tag{4}$$

где: $P_i(\lambda_1)$ – отраженный сигнал в видимых диапазоне;

$Q_1(\lambda_2)$ – отраженный сигнал в ИК диапазоне.

При этом согласно [16], между величиной SMC и отраженным сигналом $P(\lambda)$ на длинах поглощения (λ) влажной почвы (рис. 3) имеется следующее соотношение.

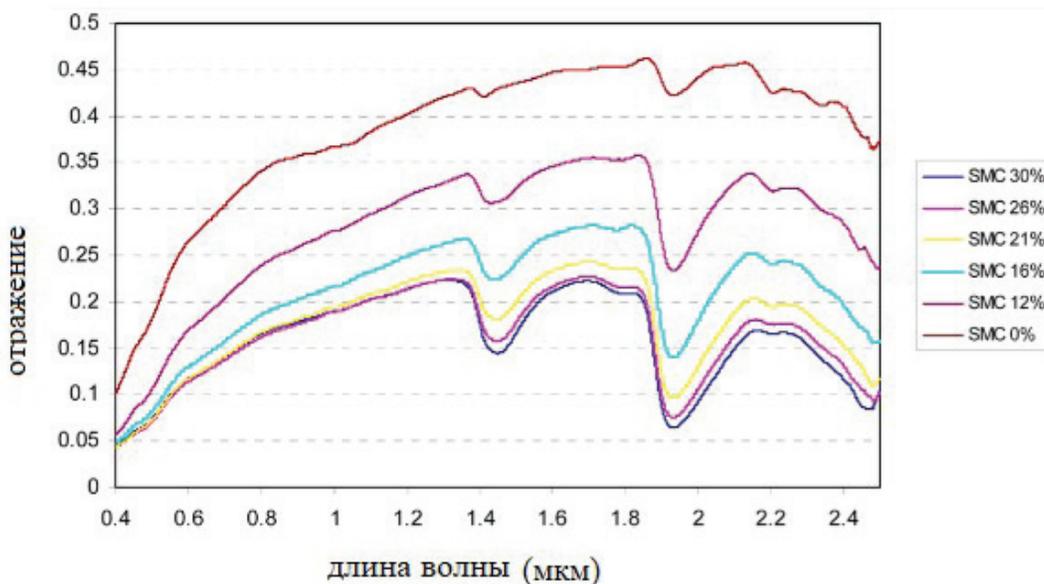


Рис. 3. Спектры отражения влажной почвы в зависимости от SMC , указанных в процентах

$$P(\lambda) = b_1(\lambda)SMC^2 + b_2(\lambda) SMC + b_3(\lambda) \tag{5}$$

Очевидно, что, согласно вышеизложенному алгоритму, если провести измерения SMC по формуле (4) на длинах волн $\lambda_1 = 1,9$ мкм и $\lambda_2 = 0,8$ мкм и при наличии данных о значениях a_0, a_1, a_2 вычислить значения SMC_1 на трех тестовых участках, то вставив полученные значения $SMC_i, i = \overline{1,3}$ в формулу (5) в правой стороне, а значение $\underline{P}(\lambda_i)$, в левую сторону (5) можем получить следующую систему уравнений относительно $b_j(j = \overline{1,3})$.

$$\begin{aligned} P(\lambda_1)^{(1)} &= b_1(\lambda_1)SMC^{2(1)} + b_2(\lambda_1)SMC^{(1)} + b_3(\lambda_1) \\ \underline{P}(\lambda_1)^{(2)} &= b_1(\lambda_1) SMC^{2(2)} + b_2(\lambda_1)SMC^{(2)} + b_3(\lambda_1) \\ P(\lambda_1)^{(3)} &= b_1(\lambda_1)SMC^{2(3)} + b_2(\lambda_1)SMC^{(3)} + b_3(\lambda_1) \end{aligned} \tag{6}$$

Решение системы (6) относительно $b_1(\lambda_1), b_2(\lambda_1), b_3(\lambda_1)$ позволяет получить рабочую формулу в виде (2) для проведения измерений SMC .

Далее должно быть исследован 4-й дополнительный участок земли используя рабочие формулы (1) и (2). При этом, согласно предложенному алгоритму, следует определить такую

величину λ_1 при которой разница значений SMC , полученных по формулам (1) и (2) достигла бы минимальной величины.

Заключение

Таким образом, предложен комбинированный метод определения водного содержания почвы. Метод синтезирован на базе двух известных выражений связывающих SMC и величину отражательного сигнала, определенного по спектру отражения, а также постоянные коэффициенты, зависящие от длины волны излучения. Предлагаемый совмещенный метод предполагает определение указанных постоянных коэффициентов во втором выражении используя измерения на трех участках земли при известных постоянных коэффициентах первом методе. Далее, во втором этапе совмещения этих методов осуществляется такой выбор длины волны проводимых измерений, при котором разность между результатами измерений по двум совмещаемым методам достигает минимума.

Литература

1. Schanz T., Baille W., Nguyen L. Effects of Temperature on Measurements of Soil Water Content with Time Domain Reflectometry // *Geotech Test J.* – 2011. – vol. 34 (1). – P. 1–8.
2. Dobriyal P., Qureshi A., Badola R., Hussain S.A. A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management // *J Hydrol.* – 2012. – vol. 458-459. – P. 110-117.
3. Kirkham M.B. *Principals of Soil and Plant Relationship.* – UK: British Library Cataloguing Publication Data, 2014.
4. Devaser V., Luhach A. Kr. An Approach to Analyse the Agriculture Acreage and Estimate Production // *Indian Journal of Science and Technology (IJST).* – 2016. – vol. 9 (28). – P. 1-6.
5. Udagani C. Gamma Ray Attenuation Study with Varying Moisture Content of Clay Bricks // *Int J Eng Sci Invent.* – 2013. – vol. 2(7). – P. 35-38.
6. Shukla A., Panchal H., Mishra M., et al. Soil Moisture Estimation using Gravimetric Technique and FDR Probe Technique: A Comparative Analysis // *American International Journal of Research in Formal, Applied & Natural Sciences.* – 2014. – vol. 8(1). – P. 89-92.
7. Bhagat V.S. Space-borne Microwave Remote Sensing of Soil Moisture // *A Review. Recent Progress in Space Technology.* – 2014. – vol. 24(4). – P. 119-150.
8. Srivastava H.S., Patel P., Sharma Y., et al. Large-Area Soil Moisture Estimation Using Multi-Incidence-Angle RADARSAT-1 SAR Data // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* – 2009. – vol. 47(8). – P. 2528-2537.
9. Robinson D.A., Campbell C.S., Hopmans J.W., Hornbuckle B.K., et al. Soil Moisture Measurement for Ecological and Hydrological Watershed-Scale Observatories // *A Review. Vadose Zone Journal.* – 2008. – P. 358-389.
10. Xiaoling Wu., Jeffrey P., Walker and Nan Ye. Inter-Comparison of Proximal Near-Surface Soil Moisture Measurement Techniques // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing.* – 2022. – P. 2370–2378.
11. Zhe Yin, Tingwu Lei, Qinghong Yan, Zhanpeng Chen, Yuequn Dong. A near-infrared reflectance sensor for soil surface moisture measurement // *Computers and Electronics in Agriculture.* – 2013. – P. 101-107.
12. Zhe Yin, Wei Qin, Changqing Zuo, Nan Yan, Bai Li, Qiankun Guo, Zhijie Shan, Zhaoyan Wang. NIR Sensor, Reflection Model for Soil Moisture Measurement Using Near-infrared Reflection Sensor // *International Forum on Energy, Environment Science and Materials (IFEESM 2015)*, DOI: 10.2991/ifeesm-15.2015.158
13. Whalley W.R., Leeds-Harrison P.B. Estimation of soil moisture status using near infrared reflectance // *Hydrological processes.* – 1991. – vol. 5. – P. 321-327.
14. Oltra-Carrio R., Frederic B., Fieuzal R., Briottet X. Improvement of Soil Moisture Retrieval from Hyperspectral VNIR-SWIR Data Using Clay Content Information: From Laboratory to Field Experiments // *Remote Sens.* – 2015. – vol. 7(3). – P. 3184-3205.
15. Ryohei Ito, Masaki Harada, Ayako Michida, Masaru Mizoguchi, Takashi Mishima, Takaharu Kameoka, Atsushi Hashimoto, Kenichi Nakanishi, Hiroshi Shono, Masaaki Oka, Hirokazu Taki, Fumitaka Uchio, Yasunori

Saito, Hiroaki Ishizawa, Yoshitaka Motonaga, Takehiko Hoshi, Nobukazu Iguchi, Eiji Goto, Seishi Ninomiya, Masayuki Hirafuji, Tokihiro Fukatsu. Soil moisture monitoring using near-infrared sensing technique and the Internet in a coffee plantation field // AFITA/WCCA joint congress on it in agriculture, 2004.

16. Fabre S., Briottet X., Lesaignoux A. Estimation of soil moisture content from the spectral reflectance of bare soils in the 0.4 – 2.5 μm domain // *Sensors*. – 2015. – vol. 15(2). – P. 62-81.

References

1. Schanz T., Baille W., Nguyen L. Effects of Temperature on Measurements of Soil Water Content with Time Domain Reflectometry // *Geotech Test J.* – 2011. – vol. 34 (1). – P. 1–8.

2. Dobriyal P., Qureshi A., Badola R., Hussain S.A. A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management // *J Hydrol.* – 2012. – vol. 458-459. – P. 110-117.

3. Kirkham M.B. *Principals of Soil and Plant Relationship.* – UK: British Library Cataloguing Publication Data, 2014.

4. Devaser V., Luhach A. Kr. An Approach to Analyse the Agriculture Acreage and Estimate Production // *Indian Journal of Science and Technology (IJST).* – 2016. – vol. 9 (28). – P. 1-6.

5. Udagani C. Gamma Ray Attenuation Study with Varying Moisture Content of Clay Bricks // *Int J Eng Sci Invent.* – 2013. – vol. 2(7). – P. 35-38.

6. Shukla A., Panchal H., Mishra M., et al. Soil Moisture Estimation using Gravimetric Technique and FDR Probe Technique: A Comparative Analysis // *American International Journal of Research in Formal, Applied & Natural Sciences.* – 2014. – vol. 8(1). – P. 89-92.

7. Bhagat V.S. Space-borne Microwave Remote Sensing of Soil Moisture // *A Review. Recent Progress in Space Technology.* – 2014. – vol. 24(4). – P. 119-150.

8. Srivastava H.S., Patel P., Sharma Y., et al. Large-Area Soil Moisture Estimation Using Multi-Incidence-Angle RADARSAT-1 SAR Data // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* – 2009. – vol. 47(8). – P. 2528-2537.

9. Robinson D.A., Campbell C.S., Hopmans J.W., Hornbuckle B.K., et al. Soil Moisture Measurement for Ecological and Hydrological Watershed-Scale Observatories // *A Review. Vadose Zone Journal.* – 2008. – P. 358-389.

10. Xiaoling Wu., Jeffrey P., Walker and Nan Ye. Inter-Comparison of Proximal Near-Surface Soil Moisture Measurement Techniques // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing.* – 2022. – P. 2370–2378.

11. Zhe Yin, Tingwu Lei, Qinghong Yan, Zhanpeng Chen, Yuequn Dong. A near-infrared reflectance sensor for soil surface moisture measurement // *Computers and Electronics in Agriculture.* – 2013. – P. 101-107.

12. Zhe Yin, Wei Qin, Changqing Zuo, Nan Yan, Bai Li, Qiankun Guo, Zhijie Shan, Zhaoyan Wang. NIR Sensor, Reflection Model for Soil Moisture Measurement Using Near-infrared Reflection Sensor // *International Forum on Energy, Environment Science and Materials (IFEESM 2015)*, DOI: 10.2991/ifeesm-15.2015.158

13. Whalley W.R., Leeds-Harrison P.B. Estimation of soil moisture status using near infrared reflectance // *Hydrological processes.* – 1991. – vol. 5. – P. 321-327.

14. Oltra-Carrio R., Frederic B., Fieuzal R., Briottet X. Improvement of Soil Moisture Retrieval from Hyperspectral VNIR-SWIR Data Using Clay Content Information: From Laboratory to Field Experiments // *Remote Sens.* – 2015. – vol. 7(3). – P. 3184-3205.

15. Ryoei Ito, Masaki Harada, Ayako Michida, Masaru Mizoguchi, Takashi Mishima, Takaharu Kameoka, Atsushi Hashimoto, Kenichi Nakanishi, Hiroshi Shono, Masaaki Oka, Hirokazu Taki, Fumitaka Uchio, Yasunori Saito, Hiroaki Ishizawa, Yoshitaka Motonaga, Takehiko Hoshi, Nobukazu Iguchi, Eiji Goto, Seishi Ninomiya, Masayuki Hirafuji, Tokihiro Fukatsu. Soil moisture monitoring using near-infrared sensing technique and the Internet in a coffee plantation field // AFITA/WCCA joint congress on it in agriculture, 2004.

16. Fabre S., Briottet X., Lesaignoux A. Estimation of soil moisture content from the spectral reflectance of bare soils in the 0.4 – 2.5 μm domain // *Sensors*. – 2015. – vol. 15(2). – P. 62-81.