

- Behmann J., Steinrucken J., Plumer L. Detection of early plant stress responses in hyperspectral images // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2014. № 93. pp. 98–111.
- Gogineni R., Chaturvedi A. Hyperspectral image classification // *Processing and analysis of hyperspectral data*. IntechOpen. 2019. DOI 10.5772/intechopen.88925
- Golhani K., Balasundrama S.K., Vadmalai G. et al. A review of neural networks in plant disease detection using hyperspectral data // *Information Processing in Agriculture*. 2018. № 5. pp. 354–371.
- Harrison B.D. Concluding Comments and Reflection on Currents Trends in plant Virology // *Papers presented at the Symposium on Viral genes and plant pathogenesis* / Pirone T.P., Shaw J.G. (eds.) Springer-Verlag, 1990. pp. 205–213.
- Howell W.E., Mink G.I. The role of weed hosts, volunteer carrots, and overlapping growing seasons in the epidemiology of carrot thin leaf and carrot motley dwarf viruses in central Washington // *Plant disease reports*. 1977. Vol. 61. pp. 217–222.
- Lowe A., Harrison N., French A.P. Hyperspectral image analysis techniques for the detection and classification of the early onset of plant disease and stress // *Plant Methods*. 2017. Vol. 13 (80). pp. 1–12. DOI: 10.1186/s13007-017-0233-z
- Lv W., Wang X. Overview of Hyperspectral Image Classification // *Journal of sensors*. 2020. Vol. 2020. 13 p. DOI: 10.1155/2020/4817234
- Mertens S., Verbaeken L. et al. Proximal Hyperspectral Imaging Detects Diurnal and Drought-Induced Changes in Maize Physiology // *Frontiers in plant science*. 2021. Vol. 12. DOI: 10.3389/fpls.2021.640914
- Miller W.A., Waterhouse P.M., Gerlach W.L. Sequence and organization of barley yellow dwarf virus genomic RNA // *Nucleic Acids Research*. 1988. Vol. 16. pp. 6097–6111.
- Murant A., Waterhouse P.M., Raschke J., Robinson D. Carrot red leaf virus and Carrot mottle viruses observation on composition of the particles in single and mixed infections // *Journal of General Virology*. 1985. Vol. 66(7). pp. 1575–1579.
- Pemberton A.W., Frost R.R. Celery Mosaic Virus in England // *Plant Pathology*. 1974. Vol. 23 (1). pp. 20–24.
- Rubatzky V.E., Quirós C.F., Simon P.W. Carrots and Related Vegetable Umbelliferae. Crop production science in horticulture series. Vol. 10. CABI Publishing, 1999. 294 p. ISBN 0-85199-129-7
- Scholthof K.-B.G., Adkins S., Czosnek H., Palukaitis P., Jacquot E., Hohn T., Hohn B., Saunders K., Candresse T., Ahlquist P., Hemenway C., Foster G.D. Top 10 plant viruses in molecular plant pathology // *Molecular Plant Pathology*. 2011. Vol. 12 (9). pp. 938–954. DOI: 10.1111/J.1364-3703.2011.00752.X
- Thenkabail P.S., Lyon J.G., Huete A. Hyperspectral indices and image classifications for agriculture and vegetation. CRC Press, 2018. 332 p.
- Thornberry H.H. et al. Index of Plant Virus Diseases. Agriculture Handbook № 307. Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture, 1966. 446 p.
- Waterhouse P.M., Murant A.F. Purification of carrot red leaf virus and evidence from four serological tests for its relationship to luteoviruses // *Annals of applied biology*. 1981. Vol. 97. pp. 191–204.
- Watson J.D., Crick F.H.C. The structure of small viruses // *Nature*. 1956. Vol. 177. pp. 473–475.
- Watson M.T., Falk B.W. Ecological and epidemiological factors affecting carrot motley dwarf development in carrots grown in the Salinas Valley of California // *Plant Disease*. 1994. Vol. 78. pp. 477–481.

УДК 528.88

DOI: 10.25695/AGRPH.2023.03.09

МЕТОД УСРЕДНЕННОЙ ОЦЕНКИ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ НА ТЕРРИТОРИЯХ С ТЕМПЕРАТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТЬЮ ПРИ ДИСТАНЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ

Г. Р. Бабаева¹, Р. О. Гусейнова²¹ Национальное Аэрокосмическое Агентство;² Азербайджанский архитектурно-строительный университет;

г. Баку, Азербайджанская Республика;

Gulshen.babayeva@gmail.com

Поступила в редакцию 28.02.2023, принята к печати 31.08.2023

Для оценки влажности почвы на значительных территориях в настоящее время в основном используются спутниковые технологии, которые делятся на микроволновые, оптические и термальные. Микроволновые технологии позволяют дистанционно исследовать обширные территории, однако применяемые при этом методы характеризуются низким пространственным разрешением. Указанный недостаток устраняется при использовании комбинации оптических и термальных методов и проведении дистанционных измерений в видимой, ближней инфракрасной и инфракрасной областях спектра. Целью исследования является разработка метода оценки влажности почвы при дистанционном зондировании территорий с изменяющейся температурой. Разработан метод усредненной оценки влажности почвы применительно к модели территории, состоящей из некоторого количества участков, при этом температура изменяется от участка к участку упорядоченным образом. С использованием известной модели Карлсона построена

дискретная модель для расчета усредненной величины влажности почвы. Установлено, что для рассматриваемой модели может существовать такая функция взаимосвязи относительных значений $NDVI$ и T , при которой искомая средняя влажность может достичь экстремума. При этом конкретный тип экстремума определяется после вычисления трех коэффициентов регрессии, имеющихся в модели Карлсона. В результате решения сформулированной оптимизационной задачи установлено наличие экстремума среднего значения влажности на рассматриваемом участке, тип которого может быть определен после проведения экспериментального расчета трех вышеуказанных регрессионных коэффициентов.

Ключевые слова: почва, влажность, модель, оптимизация, температура, дистанционное зондирование.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR AVERAGED ASSESSMENT OF SOIL MOISTURE IN AREAS WITH TEMPERATURE HETEROGENEITY DURING REMOTE MEASUREMENTS

G. R. Babaeva¹, R. O. Huseynova²

¹National Aerospace Agency

²Azerbaijan University of Architecture and Construction
Baku, Republic of Azerbaijan

Currently, satellite technologies are mainly used to assess soil moisture over large areas. These technologies are divided into microwave, optical and thermal. Microwave technologies allow remote exploration of large areas, but the used methods are characterized by low spatial resolution. This disadvantage is eliminated by using a combination of optical and thermal methods with conducting remote measurements in the visible, near-infrared and infrared spectral regions. The aim of the study was to develop a method for assessing soil moisture during remote sensing of territories with varying temperatures. A method has been developed for an average assessment of soil moisture in relation to a model of a territory composed of a certain number of sites, with the temperature varying from site to site in an orderly manner. Using the well-known Carlson model, a discrete model for calculating the average value of soil moisture has been developed. It was found that for the model under consideration a certain function of a relationship between the relative values of $NDVI$ and T may exist, at which the desired average humidity can reach an extreme. In this case, the specific type of extremum is determined after calculating the three regression coefficients available in the Carlson model. As a result of solving the formulated optimization problem, the presence of an extremum of the average moisture value at the site under consideration has been established. The type of extremum can be clarified after experimental calculation of the three regression coefficients.

Key words: soil, humidity, model, optimization, temperature, remote sensing.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что влажность почвы является важным показателем, влияющим на процессы обмена влагой и энергией, протекающие на стыке между поверхностью земли и нижнем слоем атмосферы. Для оценки влажности почвы на значительных территориях в настоящее время в основном используются спутниковые технологии, которые делятся на микроволновые, оптические и термальные (Zhang, 2016; Lakshmi, 2013; Wang, 2009; Hassan-Esfahani, 2015; Hastie, 2009; Haubrock, 2008; Hengl, 2017; Hengl, 2018). Микроволновые технологии позволяют дистанционно исследовать обширные территории, однако применяемые при этом методы отличаются низким пространственным разрешением. Указанный недостаток устраняется при использовании комбинации оптических и термальных методов и проведении дистанционных измерений в видимой, ближней инфракрасной и инфракрасной областях спектра. Теоретические основы такого комбинированного метода были изложены в работах

(Carlson, 1994; Chauhan, 2003) и в дальнейшем применялись во многих исследованиях (Rahmani, 2015; Entezari, 2019).

Кратко физические основы данного метода таковы. Согласно (Chauhan, 2003), как состояние растительности, так и температура почвы зависят от влажности почвы. Такая зависимость графически хорошо отражается на геометрической модели, называемой «универсальным треугольником» (рис.). В данной модели влажность почвы, соответствующая максимальной температуре T_S , имеет минимальное значение, а соответствующая минимальной температуре T_0 – максимальное. Соответствующие значения на оси абсцисс обозначены как T_S и T_0 . Далее вводится относительный показатель температуры $T_{отн}$, определяемый как

$$T_{отн} = \frac{T - T_0}{T_S - T_0} \quad (1)$$

где T – измеренная величина температуры на исследуемой территории.

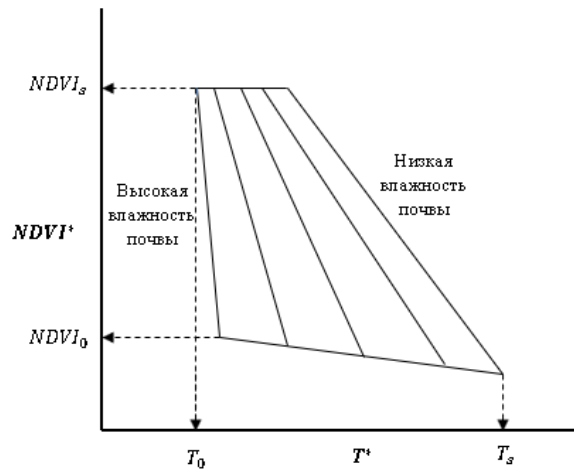


Рис. Геометрическая модель, отображающая взаимосвязь NDVI, температуры поверхности и влажности почвы

Также вводится показатель «относительная величина» $NDVI$, т.е. $NDVI_{отн}$, определяемая как

$$NDVI_{отн} = \frac{NDVI - NDVI_0}{NDVI_s - NDVI_0}, \quad (2)$$

где $NDVI$ – измеренная величина данного показателя.

Согласно (Carlson, 1994), между влажностью почвы M , $NDVI_{отн}$, и $T_{отн}$ существует следующее регрессионное соотношение:

$$M = \sum_{i=0}^{i=n} \sum_{j=0}^{j=n} a_{ij} \cdot NDVI_{отн}^{(i)} \cdot T_{отн}^{(j)}, \quad (3)$$

где a_{ij} – регрессионные коэффициенты.

Если ограничиться полиномиальным представлением второго порядка, то получится:

$$W_s = a_{00} + a_{10}NDVI_{отн} + a_{20}NDVI_{отн}^2 + a_{01}T_{отн} + a_{02}T_{отн}^2 + a_{11}NDVI_{отн}T_{отн} + a_{22}NDVI_{отн}^2T_{отн}^2 + a_{12}NDVI_{отн}T_{отн}^2 + a_{21}NDVI_{отн}^2T_{отн}, \quad (4)$$

где W_s – влажность почвы.

Вышеизложенный метод в дальнейшем получил развитие в работах, обзор которых представлен Lakshmi V. (2013) и Zhang D., Zhou G. (2016).

Вместе с тем при исследовании водно-энергетического баланса отдельных регионов может возникнуть необходимость прогнозирования и оценки возможного баланса влаги на территории, где температура изменяется в значительных пределах, а также, соответственно, изменяется значение $NDVI_{отн}$. Следовательно, возникает необходимость выявления такой взаимосвязи между данными показателями, при которой можно было бы определить экстремально

возможные (минимум или максимум) значения суммарного показателя влажности на рассматриваемой территории. Таким образом, целью настоящего исследования является изучение возможности появления экстремума среднего значения влажности почвы в зависимости от температуры и относительного значения $NDVI$.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Для решения данной задачи прежде всего рассмотрим предлагаемую модель исследуемой территории (табл.), состоящей из m числа подучастков.

Таблица. Табличная модель рассматриваемой территории с изменяющимися в пространстве значениями температуры и NDV

$\Delta T_{отн} = T_{отн.2} - T_{отн.1}$		$\Delta T_{отн} = T_{отн.K} - T_{отн.K-1}$	$\Delta T_{отн} = T_{отн.m} - T_{отн.m-1}$	
$T_{отн.2}NDVI_{отн.1}$	$T_{отн.2}NDVI_{отн.2}$	$T_{отн.K}NDVI_{отн.K}$	$T_{отн.m-1}NDVI_{отн.m-1}$	$T_{отн.m}NDVI_{отн.m}$

Согласно предлагаемой модели, рассматриваемая территория, разделенная на равные участки (табл.), характеризуется тем, что распределение температуры $T_{отн}$ по участкам является упорядоченным, т. е.

$$T_{отн,k+1} = T_{отн,k} + \Delta T; k = 1, m; \Delta T = const,$$

где k – текущий номер подучастка.

Таким образом, температура возрастает по линейно-ступенчатому закону.

$$W_{SK} = a_{00} + a_{10}f(T_{отн}) + a_{20}f(T_{отн})^2 + a_{01}T_{отн} + a_{02}T_{отн}^2 + a_{11}f(T_{отн})T_{отн} + a_{22}f(T_{отн})^2T_{отн}^2 + a_{12}f(T_{отн})T_{отн}^2 + a_{21}f(T_{отн})^2T_{отн}. \quad (6)$$

Далее вводится искомая дискретная функция $NDVI_k = f(T_{отн,k})$,

при которой суммарная влажность почвы на исследуемой территории достигла бы экстремального значения.

С учетом (5) регрессионная модель (4) для k -го участка приобретает следующий вид:

Справа в выражении (6) и далее применительно к $T_{отн}$ для упрощения записи индекс k опускается.

Средний по всем m показатель W_s определяется как

На базе дискретной модели (6), (7) построим соответствующую непрерывную модель для

$$W_{scr} = \frac{1}{T_{отн.max}} \cdot \int_0^{T_{отн.max}} [a_{00} + a_{10} \cdot f(T_{отн}) + a_{20} f(T_{отн})^2 + a_{01} \cdot T_{отн} + a_{02} T_{отн}^2 + a_{11} f(T_{отн}) \cdot T_{отн} + a_{22} f(T_{отн})^2 \cdot T_{отн}^2 + a_{12} f(T_{отн}) \cdot T_{отн}^2 + a_{21} f(T_{отн})^2 \cdot T_{отн}] dT_{отн} \quad (8)$$

Как видно из модели (8), регрессионные коэффициенты в ней зависят от относительного значения температуры ($T_{отн}$).

Вместе с тем модель (8) является целевым функционалом оптимизационной задачи вычисления оптимальной функции $f(T_{отн})$, при которой W_{scr} достиг бы экстремального значения. Согласно законам

$$a_{10}(T_{отн}) + 2f(T_{отн}) \cdot a_{20}(T_{отн}) + a_{11}(T_{отн}) \cdot T_{отн} + 2a_{22}(T_{отн}) \cdot f(T_{отн}) \cdot T_{отн}^2 + a_{12}(T_{отн}) T_{отн}^2 + 2a_{21}(T_{отн}) \cdot f(T_{отн}) \cdot T_{отн}^2 = 0 \quad (9)$$

Из (9) получаем:

$$f(T_{отн}) [2a_{20}(T_{отн}) + 2a_{22}(T_{отн}) T_{отн}^2 + 2a_{21}(T_{отн}) T_{отн}] = -a_{10}(T_{отн}) - a_{11} T_{отн} - a_{12}(T_{отн}) T_{отн}^2 \quad (10)$$

$$f(T_{отн}) = \frac{-a_{10}(T_{отн}) - a_{11}(T_{отн}) T_{отн}}{2a_{20}(T_{отн}) + 2a_{22}(T_{отн}) T_{отн}^2 + 2a_{21}(T_{отн}) T_{отн}} \quad (11)$$

Следовательно, при функциональной зависимости (11) среднее значение влажности почвы достигнет экстремальной величины. Для определения типа экстремума достаточно вычислить вторую производную подынтегрального выражения в (7) по искомой функции и определить знак полученного результата. Обозначим вторую указанную производную как z . Таким образом:

$$z = 2a_{20}(T_{отн}) + 2a_{22}(T_{отн}) T_{отн}^2 + 2a_{21}(T_{отн}) T_{отн} \quad (12)$$

Очевидно, показатель z будет иметь знак, зависящий от знаков и величин $a_{20}(T_{отн})$, $a_{22}(T_{отн})$ и $a_{21}(T_{отн})$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В целом a_{20} определяет регрессию между $NDVI^2$ и W_s и в принципе может быть как положительной, так и отрицательной величиной. Далее $a_{22}(T_{отн})$ определяет регрессию между $NDVI^2 T_{отн}^2$ и W_s . Так как значение $NDVI$ обычно уменьшается при возрастании $T_{отн}$, то $NDVI^2 T_{отн}^2$ может иметь экстремум, и знак $a_{22}(T_{отн})$ является исходно неопределенным. Что касается $a_{21}(T_{отн})$, то данный показатель определяет регрессию между S_w и $NDVI^2 T_{отн}$. Здесь также существует неопределенность, т.к. $NDVI^2$ может иметь экстремум.

Таким образом, в результате решения сформулированной оптимизационной задачи выявлено наличие экстремума среднего значения

вычисления влажности почвы. Такая модель имеет следующий вид:

$$W_{scr} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m W_{s,k} \quad (7)$$

функционального анализа (Эльсгольц, 1974), для определения оптимального вида функции $NDVI=f(T_{отн})$ достаточно взять производную подынтегрального выражения по искомой функции и приравнять полученный результат к нулю.

Таким образом:

$$a_{10}(T_{отн}) + 2f(T_{отн}) \cdot a_{20}(T_{отн}) + a_{11}(T_{отн}) \cdot T_{отн} + 2a_{22}(T_{отн}) \cdot f(T_{отн}) \cdot T_{отн}^2 + a_{12}(T_{отн}) T_{отн}^2 + 2a_{21}(T_{отн}) \cdot f(T_{отн}) \cdot T_{отн}^2 = 0 \quad (9)$$

влажности на рассматриваемом участке, тип которого может быть установлен после экспериментального определения величин и знаков трех вышеуказанных регрессионных коэффициентов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан метод усредненной оценки влажности почвы на значительных территориях, характеризующихся неоднородностью температуры. Рассмотрена модель территории, состоящей из некоторого количества участков, в пределах которых температура изменяется упорядоченным образом. Построена дискретная модель для расчета усредненной величины влажности почвы с использованием известной модели Карлсона. Установлено, что применительно к рассматриваемой модели может существовать такая функция взаимосвязи относительных значений $NDVI$ и T , при которой искомая средняя влажность может достичь экстремума. При этом конкретный тип экстремума может быть определен после вычисления трех коэффициентов регрессии, имеющихся в модели Карлсона. В настоящее время в институтах Национального аэрокосмического агентства разрабатывается комплексная программа совместных экспериментальных исследований для апробации и верификации полученных в рамках настоящей работы теоретических результатов.

Список литературы

- Эльсгольц Л.Е. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. М.: Наука, 1974. 432 с.
 Carlson T.N., Perry E.M., Gillies R.R. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover // Remote Sens. 1994. Vol. 9. pp. 161–173.
 Chauhan N.S., Miller S., Ardanuy P. Spaceborne soil moisture estimation at high resolution: a microwave-optical/IR synergistic approach // International Journal of Remote Sensing. 2003. 24:22, 4599–4622 pp. 4599–4622. <http://dx.doi.org/10.1080/0143116031000156837>
 Entezari M., Esmaily A., Niazmardi S. Estimation of soil moisture and earths surface temperature using landsat-8 satellite data // The International Archives of the Photogrammetry. 2019. Vol. XLII-4/W18.

- Hassan-Esfahani L., Torres-Rua A., Jensen A., McKee M. Assessment of surface soil moisture using high-resolution multi-spectral imagery and artificial neural networks // *Remote Sens.* 2015. Vol. 7(3). pp. 2627–2646. doi:10.3390/rs70302627
- Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The elements of statistical learning data mining, inference, and prediction. 2nd ed. Springer, New York, 2009. 660 p.
- Haubrock S.-N., Chabrillat S., Lemmnitz C., Kaufmann H. Surface soil moisture quantification models from reflectance data under field conditions // *Int. J. Remote Sens.* 2008. Vol. 29 (1). pp. 3–29. doi:10.1080/01431160701294695
- Hengl T., Mendes de Jesus J., Heuvelink G.B.M., Ruiperez Gonzalez M., Kilibarda M., Blagotić A., Shangguan W., Wright M.N., Geng X., Bauer-Marschallinger B., Guevara M.A., Vargas R., MacMillan R.A., Batjes N.H., Leenaars J.G.B., Ribeiro E., Wheeler I., Mantel S., Kempen B. SoilGrids250m Global gridded soil information based on 665 machine learning / Edited by B. Bond-Lamberty. *PLoS One.* 2017. Vol. 12(2). e0169748. doi:10.1371/journal.pone.0169748
- Hengl T., Nussbaum M., Wright M.N., Heuvelink G.B.M., Gräler B. Random forest as a generic framework for predictive modeling of spatial and spatio-temporal variables // *Peer J.* 2018. Vol. 6. e5518. doi:10.7717/peerj.5518,
- Lakshmi V. Remote sensing of soil moisture// Hindawi Publishing Corporation. Vol. 2013. ID 424178. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/424178>
- Rahmati M., Oskouei M.M., Nyshabouri M.R., Walker J.P., Fakherifard A., Ahmadi A., Mousavi S.B. Soil moisture derivation using triangle method in the lighvan watershed, north western Iran // *Journal of Soil Science and Plant Nutrition.* 2015. Vol. 15 (1). pp. 167–178.
- Wang L., Qu J.J. Satellite remote sensing applications fo surface soil moisture monitoring: a review// *Front. Earth Sci.* 2009. Vol. 3 (2). pp. 237–247.
- Zhang D., Zhou G. Estimation of soil moisture from optical and thermal remote sensing: a review// *Sensors.* 2016. 16(8): 1308.

References

- El'sgol'ts L.Ye. *Differentsial'nyye uravneniya i variatsionnoye ischisleniye* [Differential equations and variational calculations]. M.: Nauka, 1974, 432 p.
- Carlson T.N., Perry E.M., Gillies R.R. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover// *Remote Sens.* 1994. Vol. 9. pp. 161–173.
- Chauhan N.S., Miller S., Ardanuy P. Spaceborne soil moisture estimation at high resolution: a microwave-optical/IR synergistic approach // *International Journal of Remote Sensing.* 2003. 24:22, 4599-4622 pp. 4599–4622. <http://dx.doi.org/10.1080/0143116031000156837>
- Entezari M., Esmacily A., Niazmardi S. Estimation of soil moisture and earths surface temperature using landsat-8 satellite data // *The International Archives of the Photogrammetry.* 2019. Vol. XLII-4/W18.
- Hassan-Esfahani L., Torres-Rua A., Jensen A., McKee M. Assessment of surface soil moisture using high-resolution multi-spectral imagery and artificial neural networks // *Remote Sens.* 2015. Vol. 7(3). pp. 2627–2646. doi:10.3390/rs70302627
- Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The elements of statistical learning data mining, inference, and prediction. 2nd ed. Springer, New York, 2009. 660 p.
- Haubrock S.-N., Chabrillat S., Lemmnitz C., Kaufmann H. Surface soil moisture quantification models from reflectance data under field conditions // *Int. J. Remote Sens.* 2008. Vol. 29 (1). pp. 3–29. doi:10.1080/01431160701294695
- Hengl T., Mendes de Jesus J., Heuvelink G.B.M., Ruiperez Gonzalez M., Kilibarda M., Blagotić A., Shangguan W., Wright M.N., Geng X., Bauer-Marschallinger B., Guevara M.A., Vargas R., MacMillan R.A., Batjes N.H., Leenaars J.G.B., Ribeiro E., Wheeler I., Mantel S., Kempen B. SoilGrids250m Global gridded soil information based on 665 machine learning / Edited by B. Bond-Lamberty. *PLoS One.* 2017. Vol. 12(2). e0169748. doi:10.1371/journal.pone.0169748
- Hengl T., Nussbaum M., Wright M.N., Heuvelink G.B.M., Gräler B. Random forest as a generic framework for predictive modeling of spatial and spatio-temporal variables // *Peer J.* 2018. Vol. 6. e5518. doi:10.7717/peerj.5518,
- Lakshmi V. Remote sensing of soil moisture// Hindawi Publishing Corporation. Vol. 2013. ID 424178. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/424178>
- Rahmati M., Oskouei M.M., Nyshabouri M.R., Walker J.P., Fakherifard A., Ahmadi A., Mousavi S.B. Soil moisture derivation using triangle method in the lighvan watershed, north western Iran // *Journal of Soil Science and Plant Nutrition.* 2015. Vol. 15 (1). pp. 167–178.
- Wang L., Qu J.J. Satellite remote sensing applications fo surface soil moisture monitoring: a review// *Front. Earth Sci.* 2009. Vol. 3 (2). pp. 237–247.
- Zhang D., Zhou G. Estimation of soil moisture from optical and thermal remote sensing: a review// *Sensors.* 2016. 16(8): 1308.