



УДК 621.369.9

ОПТИМИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ВЛАЖНОСТИ УЧАСТКОВ ПОЧВЫ С МАКСИМАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ

Г. Р. Бабаева¹¹Национальное Аэрокосмическое Агентство, г. Баку, Азербайджанская Республика

Проанализированы условия определения влажности почвы с максимальной чувствительностью путем регистрации наибольшего значения SMI при проведении дистанционного зондирования земельных участков. Вычислено условие, при котором, сформированный на базе этого индекса целевой функционал достигает максимума. Это, в свою очередь, является признаком регистрации влажности исследуемой почвы с максимальной чувствительностью.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: почва, влагосодержание, оптимизация, чувствительность, эмиссивность.

<https://elibrary.ru/gwhoxz>

1. ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно важная роль влажности почвы в таких отраслях как сельское хозяйство, экология, гидрология. Применительно к гидрологии земельных участков важнейшими показателями влагосодержания почвы являются температура поверхности земли, наличие растительности, объём осадков. Вместе с тем эти показатели достаточно точно могут быть оценены средствами спутникового дистанционного зондирования, что невозможно сказать о влагосодержании почвы [Lakshmi, 2013; Brubaker and Entekhabi, 1996; Delworth and Manabe, 1989; Pielke, 2001; Shukla and Mintz, 1982].

Роль влажности почвы и ее пространственного распределения в изучении таких процессов как порядок распределения поступающей на планету радиационной энергии, образование ветров, формирование планетарного пограничного слоя [Mahfouf et al, 1987; Laccini et al, 1987; Zhang and Anthes, 1982]. Вместе с тем, многие атмосферные процессы воздействуют на показатель влагосодержания почвы что обусловлено цельностью природообразования и существующим энергобалансом на планете. Все вышеуказанное диктует необходимость исследования не только текущих значений влагосодержания почвы, но и возможные условия достижения экстремальных величин этого показателя.

Целью настоящей работы является исследование условий дистанционной спутниковой оценки влагосодержания почвы с максимальной чувствительностью с использованием существующих модельных построений касательно взаимосвязи влагосодержания почвы, поверхностной температуры земли, яркостной температуры на уровне высоты полета спутника, эмиссивности почвы.

Электронная почта авторов для переписки:

Бабаева Гюльшен Рауф тызы, e-mail: asadzade@rambler.ru



Адрес редакции журнала
«Гелиогеофизические исследования»:

ФГБУ «ИПГ»
129128; Россия, Москва
ул. Ростокинская, 9.
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru

<https://elibrary.ru/gwhoxz>

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. ИЗВЕСТНЫЕ МОДЕЛЬНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Вначале дадим краткий обзор существующих модельных построений, касательно влагосодержания почвы и его связи с показателем температуры поверхности земли и существующими вегетационными индексами. Согласно [Potic et al, 2017; Parida et al, 2008; Weng et al, 2004; Zeng et al, 2004] оценка влажности почвы может быть дана с использованием индекса влагосодержания почвы SMI, определяемого как:

$$SMI = \frac{(LST_{max} - LST)}{LST_{max} - LST_{min}}, \quad (1)$$

где LST_{max} и LST_{min} – максимальные и минимальные значения температуры поверхности земли при заданной величине индекса NDVI. Согласно [Potic et al, 2017; Parida et al, 2008] существует следующее статистическое соотношение:

$$LST_{max} = a_1 \cdot NDVI + b_1, \quad (2)$$

$$LST_{min} = a_2 \cdot NDVI + b_2, \quad (3)$$

где a_1, a_2, b_1, b_2 — регрессионные коэффициенты.

Согласно [Weng et al, 2004] с использованием данных термального канала Landsat 5 и Landsat 8 можно вычислить показатель LST по следующей формуле:

$$LST = \frac{T_b}{1 + \left(\frac{\lambda T_b}{C_2}\right) \ln \varepsilon}, \quad (4)$$

где T_b – яркостная температура на уровне высоты полета спутника; λ – длина волны; C_2 – постоянная, равная $C_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2}$ мК и определяемая как:

$$C_2 = \frac{h \cdot C}{s}, \quad (5)$$

где h – постоянная Планка; равная $6,626 \cdot 10^{-34}$ м²кг/с; C – скорость распространения света, равная $2,998 \cdot 10^8$ м/сек; s – постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; ε – эмиссивность поверхности земли; L – спектральная радиация.

Отметим, что в предположении постоянства показателя ε (эмиссивность), на базе (4) была получена следующая формула:

$$T_b = \frac{k_2}{\ln\left(\frac{k_1 \varepsilon}{L} + 1\right)}, \quad (6)$$

где k_1, k_2 – калибрационные коэффициенты, рассчитанные для канала 6 Landsat 5 и каналов 10 и 11 Landsat 8 [Saha et al, 2019].

3. УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МОДЕЛИ

Вместе с тем, как было показано в [Mira et al., 2010], показатель ε нельзя считать постоянной величиной. Эмиссивность ε зависит от длины волны двояким образом в зависимости от выбора части термального диапазона. Так, согласно [Mira et al., 2010], для песочных и глинистых типов почвы в диапазоне длин волн 9,5-12,3 мкм ε растет с увеличением длины волны от 0,94 до 0,985, а в диапазоне 12,3-13 мкм уменьшается от величины 0,985 до значения 0,95.

Таким образом, функция $\varepsilon(\lambda)$ в зависимости от выбора участка термального диапазона может быть аппроксимирована возрастающей или убывающей зависимостью от длины волны (рис. 1).

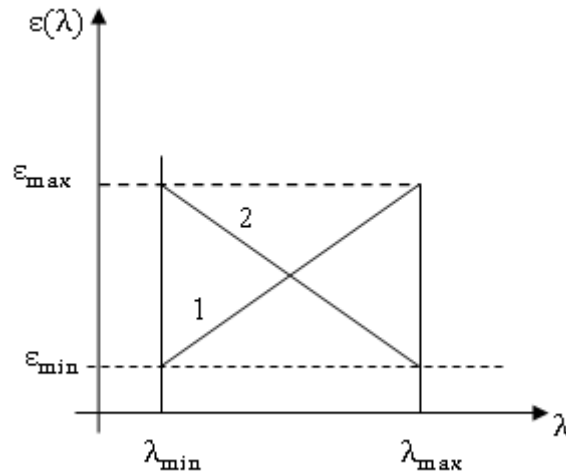


Рис. 1. Модельное представление функциональной зависимости ε от λ в зависимости от выбора диапазона длин волн. Цифрами указаны: 1-диапазон длин волн 9,5-12,3 мкм; 2-диапазон длин волн 12.3-13 мкм

4. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ВЫЯСНЕНИЯ УСЛОВИЯ РЕГИСТРАЦИИ ВЛАЖНОСТИ ЗЕМЕЛЬНЫХ УЧАСТКОВ С МАКСИМАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ

С учетом модели (4) получим:

$$T_b = LST \left(1 + \frac{\lambda T_b}{C_2} \ln \varepsilon \right). \tag{7}$$

Из (7) учитывая $\varepsilon = \varepsilon(\lambda)$ напомним:

$$\frac{T_b}{LST} - 1 = \frac{\lambda T_b(\lambda)}{C_2} \ln \varepsilon(\lambda). \tag{8}$$

Проинтегрируем правые и левые стороны (8) в диапазоне длин волн λ_{min} и λ_{max} . Получим (при $T_b = T_b(\lambda)$):

$$\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \left[\frac{T_b(\lambda)}{LST} - 1 \right] d\lambda = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \frac{\lambda T_b(\lambda)}{C_2} \ln \varepsilon(\lambda) d\lambda. \tag{9}$$

Вычислим левую сторону (9). Имеем ($LST = const$):

$$\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \left[\frac{T_b(\lambda)}{LST} - 1 \right] d\lambda = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \frac{T_b(\lambda)(\lambda_{max} - \lambda_{min})}{LST} d\lambda. \tag{10}$$

Проанализируем правую часть (8). Выясним, каком виде функции $\varepsilon(\lambda)$ функционал F_1 определяемый как:

$$F_1 = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \frac{\lambda T_b(\lambda)}{C_2} \ln \varepsilon(\lambda) d\lambda. \tag{11}$$

может достигнуть экстремального значения. На основании вышерассмотренной модели $\varepsilon(\lambda)$, представленной на рисунке 1 введем следующее интегральное ограничительное условие:

$$\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \varepsilon(\lambda) d\lambda = C; \quad C = const. \quad (12)$$

С учетом выражений (11) и (12) составим задачу безусловной вариационной оптимизации, заключающейся в поиске вида функции $\varepsilon(\lambda)$ при которой функционал F_1 достиг бы экстремального значения. Целевой функционал этой задачи имеет вид:

$$F_2 = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \frac{\lambda T_b(\lambda)}{C_2} \ln \varepsilon(\lambda) d\lambda + \gamma \left[\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \varepsilon(\lambda) d\lambda - C \right], \quad (13)$$

где γ -множитель Лагранжа.

Решение задачи (13) согласно [Эльсгольц, 1974] должно удовлетворить следующему условию:

$$\frac{d \left\{ \frac{\lambda T_b(\lambda)}{C_2} \ln \varepsilon(\lambda) + \gamma \varepsilon(\lambda) \right\}}{d\varepsilon(\lambda)} = 0. \quad (14)$$

Из условия (14) получаем:

$$\frac{\lambda T_b(\lambda)}{C_2 \varepsilon(\lambda)} + \gamma = 0 \quad (15)$$

Из выражения (15) получаем:

$$\varepsilon(\lambda) = - \frac{\lambda T_b(\lambda)}{\gamma C_2}. \quad (16)$$

С учетом (12) и (13) напишем:

$$\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \frac{\lambda T_b(\lambda)}{\gamma C_2} d\lambda = C. \quad (17)$$

Из (17) находим:

$$\gamma \cdot \frac{1}{C C_2} \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \lambda T_b(\lambda) d\lambda. \quad (18)$$

С учетом (13) и (18) получим:

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{\lambda T_b(\lambda) C}{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} T_b(\lambda) d\lambda} \quad (19)$$

Таким образом, λ_{min} при функции эмиссивности $\varepsilon(\lambda)$ в виде (19) достигается экстремум функционалов (13) и (14).

Для определения типа экстремума вычислим вторую производную интегранта в (13) по искомой функции. Результат такого вычисления оказывается отрицательной величиной, что указывает на то, что экстремум является максимумом. Таким образом показано, что при решении (19) функционал (11) достигает максимума.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, задача дистанционного определения влажности почвы с максимальной чувствительностью в данной работе решена путем формирования особого функционала, характеризующего в особых условиях чувствительность проводимых измерений. При этом задача решается вариационным методом, путем определения наилучшего вида функциональной зависимости коэффициента эмиссивности от длины волны, при котором достигается максимальная чувствительность. Вычислено условие, при котором, сформированный целевой функционал достигает максимума, что, в свою очередь, является признаком измерения влажности исследуемой почвы с максимальной чувствительностью.

ЛИТЕРАТУРА

- Эльсгольц Л. Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. М.: Наука, 1974. 432 с.
- Brubaker K. L., Entekhabi D. Analysis of feedback mechanisms in land-atmosphere interaction// Water resources research. Vol. 32. no 5. Pp. 1343-1357. 1996.
- Delworth T., Manabe S. The influence of soil wetness on near-surface atmospheric variability// Journal of climate. Vol. 2. Pp. 1447-1462. 1989.
- Laccini J., Carlson T., Warner T. Sensitivity of the great plains severe storm environment to soil moisture distribution// Monthly weather review. Vol. 115. Pp. 2660-2673. 1987.
- Lakshmi V. Remote sensing of soil moisture// Hindawi Publishing Corporation. Vol. 2013. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/424178>.
- Mahfouf J., Richard E., Mascarat P. The influence of soil and vegetation on Mesoscale circulations// Journal of climate and applied climatology. Vol. 26. Pp. 1483-1495. 1987.
- Mira M.; Valor E., Caselles V., Rubio E., Coll C., Galve J. M., Niclos R., Sanchez J. M., Rafael Boluda R. Soil Moisture Effect on Thermal Infrared (8–13- μ m) Emissivity // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 48, N 5, pp. 2251 – 2260. 2010. DOI: 10.1109/TGRS.2009.2039143
- Parida B. R., Collado W. B., Borah R., Hazarika M. K., Samarakoon L. Detecting drought-prone areas of rice agriculture using a MODIS-driven soil moisture index// Glscli. Remote sens. 2008. 45. 109-129.
- Pielke R. A. Influence of the spatial distribution of vegetation and soils on the prediction of cumulus convective rainfall// Reviews of geophysics. Vol. 39. No. 2. Pp. 151-177. 2001.
- Potic I., Bugarski M., Matic-Varenica J. Soil moisture determination using remote sensing data for the property protection and increase of agriculture production// In proceedings of the 2017 annual world bank conference on land and poverty, Washington, DC USA. 20-24 March 2017.
- Saha A., Patil M., Goyal V. C. Assessment and impact of soil moisture index in agricultural drought estimation using remote sensing and GIS techniques// Proceedings 2019. Doi:10.3390/ECWS-3-05802.
- Shukla J., Mintz Y. Influence of land-surface evapotranspiration on the earth's climate// Science. Vol. 215. No. 4539. Pp. 1498-1501. 1982.
- Weng Q., Lu D., Schubring J. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies// Remote Sens. Environ. 2004. 89. 467-483.
- Zeng Y., Feng Z., Xiang N. Assessment of soil moisture using Landsat ETM+ temperature/vegetation index in semiarid environment// In proceedings of the IGARSS'04 Geoscience and remote sensing symposium Anchorage, AK, USA. 20-24 September 2004.
- Zhang D., Anthes R. A. A high-resolution model of the planetary boundary layer-sensitivity tests and comparisons with SEASAME-79 data// Journal of applied meteorology. Vol. 21. Pp. 1594-1609. 1982.

REMOTE SENSING OF SOIL HUMIDITY FROM SPACE WITH OPTIMAL SENSITIVITY

Babaeva G. R.

Analyzed are the conditions to determine the soil water content from space with optimal sensitivity. Constructed is solution of the variation problem on which the objective functional achieves its maximum possible value for the given infrared wave length. This allows taking the soil water content with maximum possible sensitivity.

KEYWORDS: SOIL, MOISTURE CONTENT, OPTIMIZATION, SENSITIVITY, EMISSIVITY.