

УДК 631.4

Е. Дж.  
Сулейманова

## **Вопросы формирования отражательного сигнала почвы при дистанционном исследовании водонасыщенных ландшафтов**

Национальное Аэрокосмическое Агентство, г.Баку,  
Азербайджанская Республика  
e-mail: [suleymanovaegane1964@gmail.com](mailto:suleymanovaegane1964@gmail.com)

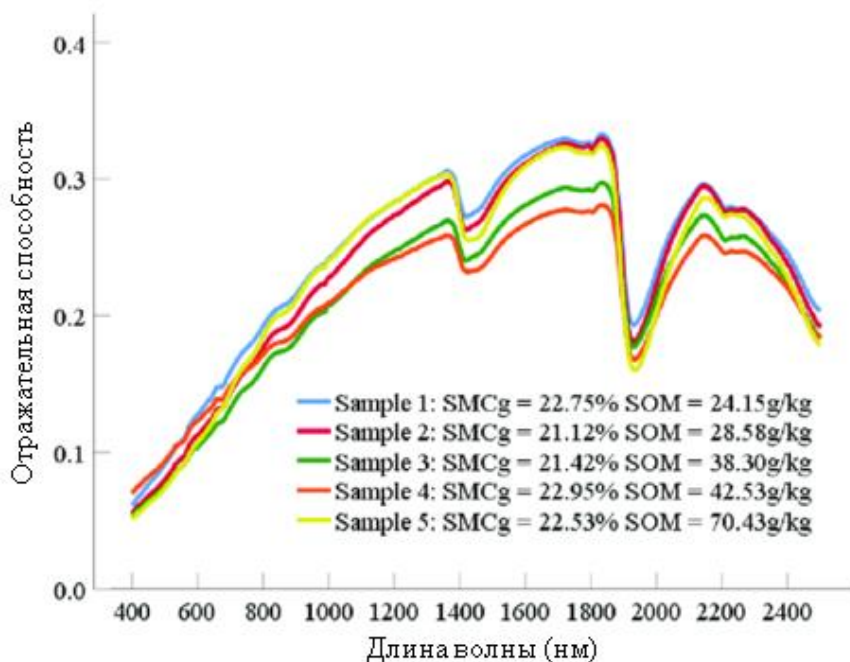
**Аннотация.** Проанализированы вопросы формирования отражательного сигнала почвы при дистанционном зондировании водонасыщенных ландшафтов с учетом влияния имеющихся в почве органических веществ. Исследован вопрос об оптимальной оценке отраженного сигнала от увлажненной почвы на участке, в котором также имеется органическое вещество. Интегральная оценка отраженного сигнала с участка в котором водяной слой и органическое вещество распределены неравномерно, показала, что при некоторой зависимости SOM (содержание органических веществ в почве) от толщины водяного слоя на подучастках исследуемая оценка достигает минимума.

**Ключевые слова:** отражательный спектр, почва, органические вещества, содержание влаги, водообмен.

### **Введение**

Как отмечается в работе [1], влажность почвы является важным фактором в протекании многих процессов, включая рост растительности, биохимию почвы, эрозию почвы, процессы тепло и водообмена между землей и атмосферой. По этой причине точная оценка влагосодержания почвы является важнейшим фактором в понимании и моделировании этих процессов [2]. Вместе с тем, согласно [3], несмотря на широкое применение методов дистанционного зондирования для определения влагосодержания почвы, высокоточное определение этого показателя дистанционными технологиями остается нерешенной проблемой. Согласно [4], влага, содержащаяся в почве, значительно влияет на спектрометрическую информацию, получаемую при проведении спектрометрических измерений содержания органических веществ и солей в почве.

Как отмечается в работе [5], содержание органических веществ в почве (SOM) является одним из факторов, влияющих на формирование отражательного спектра почвы. Это влияние выявляет себя на таких длинах волн как 1400 нм, 1700 нм, 1860 нм, 2150 нм, 2300 нм и 2240 нм [6]. Соответствующие модельно-экспериментальные исследования, проведенные в [5] показали, что указанное влияние достаточно значительно, что иллюстрируют графики, приведенные на рис. 1.



**Рис. 1.** Графики, показывающие влияние SOM на отражательные спектры почвы [5]. Показаны графики спектров отражения для шести образцов почвы с разными значениями SMC и SOM  
*Составлено автором*

Как видно из графиков, приведенных на рис. 1, рост SOM уменьшает отражение с почвы. Целью настоящего исследования является определение характера взаимодействия SOM и SMC при формировании спектра отражения почвы.

### Материалы и методы

С этой целью обратимся к результату работы [5], где исследовано влияние SOM на возможную оценку SMC. Согласно [5], имеет место следующее соотношение:

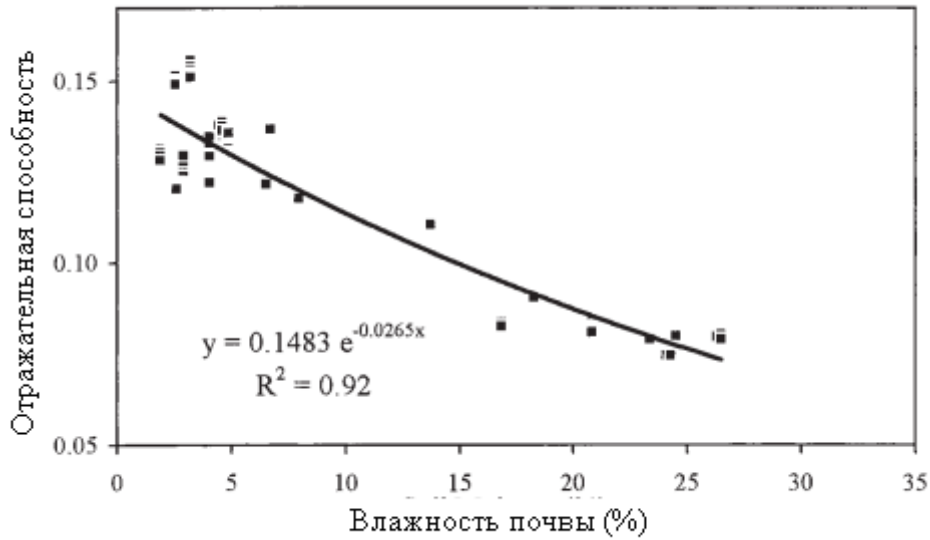
$$SMC = a_1 + a_2 \ln(L \cdot \log(SOM)) \quad (1)$$

где:  $a_1, a_2 = const$ ; (зависят от типа почвы);  $L$ -толщина водяного слоя в почве.

Далее обратимся к результатам экспериментальных исследований, изложенных в [7]. Согласно этой работе, отраженный сигнал со влажной почвы может быть определен с помощью следующего простого выражения:

$$R = d_1 \exp(-d_2 SMC) \quad (2)$$

где:  $d_1, d_2 = const$ , в зависимости от типа почвы. График выражение (2) приведен на рис. 2 [7].



**Рис. 2.** График функции (2) для глинистой почвы  
Составлено автором

С учетом выражений из (1) и (2) получим

$$R = d_1 \cdot \exp[-d_2 \cdot (a_1 + a_2 \ln(L \cdot \log(SOM)))] \quad (3)$$

Выражение (3) представим в виде

$$R = d_1 \cdot \exp(-d_2 \cdot a_1) \cdot \exp(-d_2 \cdot a_2 \ln(-d_2 \cdot a_2 \ln(L \cdot \log(SOM)))) = m_1 \cdot \exp(-m_2 \ln(L \cdot \log(SOM))) \quad (4)$$

где:  $m_1 = d_1 \cdot \exp(-d_2 \cdot a_1)$ ;  $m_2 = d_2 \cdot a_2$ .

Из (4) получим

$$\frac{m_1}{R} = \exp[m_2 \ln(L \cdot \log(SOM))] = \ln[L \cdot \log(SOM)]^{m_2} \quad (5)$$

Из (5) получим

$$\exp \frac{m_1}{R} = [L \cdot \log(SOM)]^{m_2} \quad (6)$$

Из (6) находим

$$R = \sqrt[m_2]{\exp \frac{m_1}{R}} = \exp \frac{m_1}{m_2 R} = L \cdot \log(SOM) \quad (7)$$

Для получения интегрированных оценок отражательного сигнала с почвы с гетерогенными влажностными характеристиками рассмотрим следующую модель увлажненной почвы.

Допускаем, что рассматриваемый участок земли можно разбить на  $n$  число подучастков, в каждом из которых толщина водяного слоя оценивается как  $L_i, i = \overline{1, n}$ . Следовательно, имеем множество

$$L = \{L_i\} \quad (8)$$

в котором также допускается, что элементы  $L_i$  упорядочены т.е.

$$L_i = L_{i-1} + \Delta L; \Delta L = const; L_0 = 0 \quad (9)$$

Также допускается наличие упорядоченного множества

$$SOM = \{SOM_i\} \quad (10)$$

где:  $SOM_i = SOM_{i-1} + \Delta SOM$ ;  $\Delta SOM = const$ ;  $SOM_0 = 0$ .

Далее, введем на рассмотрение дискретную функцию

$$SOM_i = f\{L_i\} \quad (11)$$

Применительно к функции  $f\{L_i\}$  построим следующие суммы:

$$S = \sum_{i=1}^n f\{L_i\} \quad (12)$$

$$F = \sum_{i=1}^n L_i \log f\{L_i\} \quad (13)$$

При этом наложим на сумму (12) следующее ограничительное условие

$$\sum_{i=1}^n f\{L_i\} = C_1 \quad (14)$$

На базе дискретной модели (8)-(10) построим непрерывную модель. По аналогии с (11) и (14) введем на рассмотрение функцию

$$SOM = f(L) \quad (15)$$

а также ограничительное условие

$$\int_0^{L_{max}} f(L)dL = C_2 \quad (16)$$

На базе (7) сформируем следующий целевой функционал

$$\int_0^{L_{max}} L \log(SOM) dSOM \quad (17)$$

На базе (16) и (17) сформируем следующую задачу безусловной вариационной оптимизации

$$F_4 = \int_0^{L_{max}} L \log f(L)dL + \lambda_1 \left[ \int_0^{L_{max}} f(L)dL - C \right] \quad (18)$$

Решение (18) должно удовлетворить условию

$$\frac{d\{L \log f(L) + \lambda f(L)\}}{df(L)} = 0 \quad (19)$$

Из (19) находим

$$\frac{L}{f(L) \ln 2} + \lambda = 0 \quad (20)$$

Из (20) находим

$$f(L) = -\frac{L}{\lambda \ln 2} \quad (21)$$

С учетом (21) и (17) находим

$$-\int_0^{L_{max}} \frac{L}{\lambda \ln 2} dL = -\frac{L_{max}^2}{2 \lambda \ln 2} = C_2 \quad (22)$$

Из (22) получим

$$\lambda = -\frac{L_{max}^2}{2 \ln 2 C_2} \quad (23)$$

С учетом (21) и (23) находим

$$f(L) = \frac{2LC_2}{L_{max}^2} \quad (24)$$

Таким образом при (24)  $R$  достигает минимума, т.к. вторая производная (20) по  $f(L)$  оказывается отрицательной величиной. С учетом (7) и (24) приходим к заключению о том, что интегральная оценка  $z_1$  в виде

$$z_1 = \int_0^{L_{max}} m_2 \sqrt{\exp \frac{m_1}{R}} dL \quad (25)$$

при условии (24) достигает максимума. Следовательно, можно утверждать, что (24) также является условием появления минимума в суммарном отраженном сигнале с исследуемого участка.

### Выводы

Исследован вопрос об оптимальной оценке отраженного сигнала от увлажненной почвы на участке, в котором также имеется органическое вещество. Интегральная оценка отраженного сигнала с участка в котором водяной слой и органическое вещество распределены неравномерно, показала, что при некоторой

зависимости SOM (содержание органических веществ в почве) от толщины водяного слоя на подучастках исследуемая оценка достигает минимума.

### *Литература*

1. Wigneron J. P., Schmugge T., Chanzy A., Calvet J. C., Kerr Y. Use of passive microwave remote sensing to monitor soil moisture// *Agronomic* 18. Pp. 27-43. 1998.
2. Lobell D. B., Asner G. P. Moisture effects on soil reflectance.
3. Li Y., Liu S., Liao Z., He C. Comparison of two methods for estimation of soil water content from measured reflectance.
4. Huang X., Bai T., Guan H., Wei X., Wang Y., Mao X. An improved exponential model considering a spectrally effective moisture threshold for proximal hyperspectral reflectance simulation and soil salinity estimation// *Remote Sens.* 14. 6396. 2022. <https://doi.org/10.3390/rs14246396>.
5. Li T., Mu T., Liu G., Yang X., Zhu G., Shang C. A method of soil moisture content estimation at various soil organic matter conditions based on soil reflectance// *Remote sens.* 14. 2411. <https://doi.org/10.3390/rs1410241>.
6. Sithole N. J., Ncama K., Magwaza L. S. Robust vis-NIRS models for rapid assessment of soil norganic carbon and nitrogen in Feralsols Haplic soils from different tillage management practices// *Comput. Electron. Agric.* 153. Pp. 295-301. 2018.
7. Muller E., Decamps H. Modeling soil moisture-reflectance// *Remote Sensing of environment.* Vol. 76. Pp. 173-180. 2001.

E. J. Suleymanova

### *Suleymanova Issues of formation of a reflective signal of the soil in remote study of water-saturated landscapes*

---

National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan  
e-mail: [suleymanovaegane1964@gmail.com](mailto:suleymanovaegane1964@gmail.com)

**Abstract.** *The issues of formation of a reflective signal of the soil during remote sensing of water-saturated landscapes, taking into account the influence of organic substances present in the soil, are analyzed. The question of the optimal evaluation of the reflected signal from moistened soil in a site in which organic matter is also present is investigated. Integral evaluation of the reflected signal from the area in which the water layer and organic matter are unevenly distributed showed that with some dependence of SOM (organic matter content in the soil) depending on the thickness of the water layer on the sub-stages, the studied estimate reaches a minimum.*

**Keywords:** *reflective spectrum, soil, organic substances, moisture content, water exchange.*

*Поступила в редакцию 31.03.2023 г.*