

А.Ю. Суковатова, К.Ю. Суковатов, Н.М. Оскорбин

Эмпирические модели зависимости диэлектрических свойств дисперсных почвообразующих минералов от плотности и объемной влажности

A.Yu. Sukovatova, K.Yu. Sukovатов, N.M. Oskorbin

Empirical Models of Depending Dielectric Properties of Disperse Soil Minerals on their Density and Humidity

С использованием улучшенного метода линейной регрессии уточнены регрессионные соотношения между диэлектрическими свойствами и объемной влажностью почвообразующих минералов. Методом множественной линейной регрессии получены линейные регрессионные соотношения между диэлектрическими свойствами, объемной влажностью и плотностью почвообразующих минералов.

Ключевые слова: диэлектрические характеристики, регрессионный анализ данных, множественная линейная регрессия, дисперсные почвообразующие минералы.

Введение. Обработка и интерпретация экспериментальных данных – сложный многоуровневый процесс. Установление эмпирических зависимостей диэлектрических параметров дисперсных почвообразующих минералов, характеризующихся различной степенью связывания влаги, от объемной влажности – важная задача, решение которой необходимо для обработки и интерпретации данных дистанционного зондирования подстилающей поверхности, полученных с использованием радиометрических и радиолокационных приборов микроволнового диапазона [1].

Цель настоящей работы заключается в построении регрессионных моделей зависимости диэлектрических свойств почвообразующих минералов от их влажности с использованием улучшенного варианта линейного метода наименьших квадратов для уточнения полученных в работе [2] регрессионных соотношений, а также в построении регрессионных соотношений между показателями преломления, поглощения, объемной влажностью и плотностью почвообразующих минералов с использованием метода множественной линейной регрессии.

Уточнение регрессионных соотношений. В настоящей работе для уточнения эмпирических соотношений между диэлектрическими параметрами почвообразующих минералов и объемной влажностью используется улучшенный метод линейной регрессии, подробно описанный в работе [3]. Этот метод позволяет учесть величины среднеквадрати-

This paper is devoted to evaluation of regression relations between dielectric properties and humidity of disperse soil minerals based on improved method of least squares (MLS). Using multiple linear regression (MLR) technique the authors obtain linear regression relations between dielectric properties, volume humidity and density of soil minerals.

Key words: dielectric properties, regression analysis of data, MLR, disperse soil minerals.

ческих случайных погрешностей измерения анализируемых параметров в процессе оценки коэффициентов регрессионного уравнения.

Модель 1. Диэлектрические характеристики каолинита $Al_4[Si_4O_{10}][OH]_8$ на частоте 1,11 ГГц для разных значений влажности.

Модель 2. Диэлектрические характеристики $CaCl_2$ на частоте 1,11 ГГц для разных значений влажности.

Модель 3. Диэлектрические характеристики кальция (известкового шпата) $CaCO_3$ на частоте 1,11 ГГц для разных значений влажности.

В таблицах 1, 2 приведены результаты сравнения коэффициентов регрессионных уравнений, полученных с использованием стандартного и модернизированного вариантов линейного метода наименьших квадратов.

Таблица 1

Результаты расчетов зависимости показателя преломления (n) и объемной влажности почвообразующих минералов

№	b_s	b	a_s	a	$db, \%$	$da, \%$
1	1,362	1,337	7,258	7,369	1,90	-1,53
2	1,309	1,304	1,395	1,407	0,36	-0,87
3	1,763	1,759	8,026	8,049	0,22	-0,28

Как видно из таблицы 2, наибольшее относительное отличие между коэффициентами регрессионных моделей составляет 13,5%. Далее для срав-

нения полученных регрессионных моделей был проведен дисперсионный анализ. Результаты дисперсионного анализа приведены в таблицах 3 и 4.

Таблица 2

Результаты расчетов зависимости показателя поглощения (κ) и объемной влажности почвообразующих минералов

№	b_s	b	a_s	a	$db, \%$	$da, \%$
1	0,136	0,120	0,600	0,672	12,40	-12,11
2	-0,036	-0,037	0,261	0,264	-3,36	-1,19
3	-0,010	-0,011	0,353	0,361	-13,54	-2,25

Примечание: a, b – коэффициенты множественной линейной регрессии модели; a_s, b_s – уточненные коэффициенты множественной линейной регрессии модели; $db, \%, da, \%$ – относительная погрешность.

Таблица 3

Результаты дисперсионного анализа для регрессионных соотношений между показателем преломления (n) и объемной влажностью почвообразующих минералов

№	SSA	$SSreg$	$SSres$	$SSregs$	$SSress$	R^2	R_s^2
1	40,21	40,04	1,05	39,01	1,04	0,99	0,97
2	0,73	0,70	0,04	0,69	0,04	0,96	0,95
3	11,08	11,07	0,05	11,02	0,05	0,99	0,99

Примечание: SSA – сумма квадратов относительно среднего; $SSreg, SSregs$ – сумма квадратов относительно регрессии; $SSres, SSress$ – сумма квадратов остатков.

Таблица 4

Результаты дисперсионного анализа для регрессионных соотношений между показателем поглощения (κ) и объемной влажностью почвообразующих минералов

№	SSA	$SSreg$	$SSres$	$SSregs$	$SSress$	R^2	R_s^2
1	0,33	0,32	0,06	0,27	0,05	0,96	0,83
2	0,03	0,02	0,01	0,02	0,01	0,80	0,78
3	0,02	0,02	0,00	0,02	0,00	0,96	0,92

Из данных, приведенных в таблицах 3, 4, следует, что регрессионные модели, полученные с использованием новой модификации линейного метода наименьших квадратов, объясняют изменчивость отклика (в данном случае диэлектрические свойства), обусловленную изменчивостью предиктора (в данном случае объемная влажность), несколько лучше, чем стандартные линейные модели, так как соответствующие этим моделям коэффициенты детерминации выше, чем для обычных линейных моделей.

Построение регрессионных соотношений с использованием множественной линейной регрессии. С использованием метода множественной линейной регрессии [4] были получены регрессионные соотношения между показателями преломления, погло-

щения, объемной влажностью, плотностью почвообразующих минералов и частотой поля.

Модель 4. Диэлектрические характеристики натрита (сода) Na_2CO_3 на частоте 1,11 ГГц для разных значений влажности, плотности и частоты поля.

$$n = (1,450 \pm 0,073) \cdot \rho_p + (0,384 \pm 0,077) \cdot w + (0,007 \pm 0,014) \cdot f + (0,125 \pm 0,087),$$

$$k = (0,524 \pm 0,060) \cdot \rho_p - (0,068 \pm 0,063) \cdot w + (0,010 \pm 0,012) \cdot f - (0,513 \pm 0,071)$$

Модель 5. Диэлектрические характеристики гипса $CaSO_4$ на частоте 1,11 ГГц для разных значений влажности и плотности

$$n = (0,991 \pm 0,152) \cdot \rho_p + (3,160 \pm 0,175) \cdot w + (0,334 \pm 0,170),$$

$$k = (-0,030 \pm 0,033) \cdot \rho_p + (0,311 \pm 0,038) \cdot w + (0,084 \pm 0,037).$$

Модель 6. Диэлектрические характеристики галита (поваренной соли) $NaCl$ на частоте 1,11 ГГц для разных значений влажности и плотности.

$$n = (9,630 \pm 2,870) \cdot \rho_p + (12,283 \pm 6,550) \cdot w - (11,582 \pm 3,952),$$

$$k = (10,825 \pm 3,331) \cdot \rho_p + (13,923 \pm 7,608) \cdot w - (15,045 \pm 4,590).$$

Далее был проведен анализ полученных регрессионных соотношений.

В таблице 5 приведены результаты дисперсионного анализа [4], полученные методом множественной линейной регрессии моделей.

Таблица 5

Результаты дисперсионного анализа для регрессионных соотношений, полученных методом множественной линейной регрессии

№	n				κ			
	SSA	$SSreg$	$SSres$	R^2	SSA	$SSreg$	$SSres$	R^2
4	0,823	0,815	0,007	0,985	0,087	0,082	0,005	0,909
5	7,163	7,073	0,090	0,987	0,040	0,035	0,004	0,879
6	13,101	10,578	2,523	0,752	16,841	13,437	3,405	0,740

Из результатов следует, что регрессионные модели описывают изменчивость отклика (диэлектрические свойства), обусловленную изменчивостью предикторов (объемная влажность, плотность, частота) на 74–98%. Результаты проверки гипотез о существовании связи между анализируемыми параметрами с использованием критерия Фишера [4] показали, что гипотеза не может быть отвергнута с вероятностью не менее 98%. Далее был проведен анализ остатков (табл. 6).

Таблица 6
Результаты анализа остатков
для регрессионных соотношений, полученных
методом множественной линейной регрессии

	<i>n</i>			<i>к</i>		
№	4	5	6	4	5	6
<i>d</i>	1,8	1,1	1,6	2,2	1,6	1,7
<i>R_s</i>	–0,009	0,421	–0,170	–0,090	0,195	–0,209

Результаты оценки статистик Дарбина-Уотсона и коэффициентов сериальной корреляции показывают, что остатки в основном ведут себя как случайная

величина. Таким образом, условия применимости метода наименьших квадратов приближенно выполняются, и нет оснований отклонить полученные регрессионные модели.

Регрессионные соотношения могут быть использованы для обработки и интерпретации результатов дистанционного зондирования, а также решения обратных задач восстановления влагосодержания почв по яркостной температуре.

Авторы благодарны доктору технических наук, профессору Андрею Николаевичу Романову за возможность использовать полученные им в работе [2] экспериментальные данные.

Библиографический список

1. Шутко А.М. СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. – М., 1986.
2. Романов А.Н. Экспериментальные исследования диэлектрических свойств почвообразующих минералов и минеральных солей в микроволновом диапазоне. – Барнаул, 2002.

3. Щелканов Н.Н. Обобщенный метод построения линейной регрессии и его применение для построения непараметрических моделей аэрозольного ослабления // Оптика атмосферы и океана. – 2005. – Т. 18, №1–2.
4. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. – М., 1986. – Т. 1.