

# Спектроскопические параметры влажных лесотундровых почв в СВЧ-диапазоне

П.П. Бобров<sup>1</sup>, В.Л. Миронов<sup>1</sup>, В.Н. Мандрыгина<sup>1</sup>, Т.А. Беляева<sup>2</sup>, А.П. Бобров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН*

*660036, Красноярск, Академгородок*

*E-mail: [rsdvm@ksc.krasn.ru](mailto:rsdvm@ksc.krasn.ru)*

<sup>2</sup>*Омский государственный педагогический университет*

*644099, Омск, наб. Тухачевского, 14*

*E-mail: [bobrov@omgpu.omsk.edu](mailto:bobrov@omgpu.omsk.edu)*

В данной работе представлены диэлектрические данные для некоторых типов почв лесотундровой зоны, расположенной в 64° с.ш. и 100° в.д., вблизи города Тура в Восточной Сибири. Измерения были проведены в микроволновом диапазоне частот от 0,3 до 14 ГГц при температуре 24°C. По результатам проведенных измерений с помощью обобщенной рефракционной диэлектрической модели [1, 2] были найдены комплексные диэлектрические проницаемости (КДП) связанной и свободной воды, на основе которых были рассчитаны спектроскопические параметры Дебая. Проведенный анализ почв тундры показал, что максимальное количество связанной воды  $W_t$  и значение ее КДП меньше, чем у почв сельскохозяйственных зон Сибири [3-5], вследствие того что содержание глины и гумуса в тундровых почвах значительно ниже, чем в почвах Западной Сибири. Полученные результаты являются вкладом в диэлектрическую базу данных почв Северного приполярного региона, которая является необходимым элементом при разработке моделей дистанционного зондирования и получения алгоритмов восстановления необходимых параметров.

## Введение

Дистанционное зондирование лесных областей в Сибири является в последнее время объектом исследования нескольких крупномасштабных международных программ [5]. В то же самое время диэлектрические характеристики почв, особенно в северной части лесотундры, еще недостаточно изучены для создания соответствующих моделей излучения и рассеяния радарных сигналов и алгоритмов восстановления радарных данных дистанционного зондирования. С использованием данных диэлектрических измерений некоторых лесотундровых почв на основе обобщенной рефракционной модели [1] были рассчитаны спектральные диэлектрические параметры для каждого типа почв. В качестве этих параметров были найдены значения действительной и мнимой частей КДП для сухих почв ( $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ), объемная доля максимального содержания связанной воды  $W_t$ . В предположении о справедливости модели Дебая для связанной воды были определены статическая диэлектрическая проницаемость (ДП)  $\epsilon_0$ , время релаксации  $\tau$  и проводимость  $\sigma$  связанной воды.

## Описание эксперимента

Для получения экспериментальных данных были выбраны 4 почвенных образца, взятых из разных разрезов и уровней почвенного профиля возле г.Тура (64° с.ш. и 100° в.д.): 1) два образца тиксотропного криозема с содержанием глины 23,97 % (легкосуглинистая почва) и 15,94 % (супесчаная почва) и содержанием гумуса 3,25 % и 1,16 %, соответственно; 2) образец гомогенного криозема, содержащего 13,8 % глины (супесчаная почва) и 2,27% гумуса; 3) рыхлопесчаный гранузем с содержанием 4,01 % глины и 0,284 % гумуса. Засоленность образцов составила менее 0,04%. Измерения проводились в диапазоне частот от 0,3 до 14 ГГц при температуре (24±2) °С.

Перед проведением измерений почвенный образец увлажнялся, помещался в контейнер и выдерживался в течение некоторого времени для более равномерного распределения влаги. При влажностях, больших чем  $W_t$ , это время составляло не менее 2 часов, при меньших значениях влажности не менее суток.

Диэлектрическая проницаемость образцов определялась по измеренным значениям коэффициента отражения  $R$  и прохождения  $T$  слоя почвы, помещенной в отрезок коаксиальной (диапазон частот 0,3 ÷ 5 ГГц)

или волноводной (диапазон частот  $6 \div 14$  ГГц) линии. Для достижения более высокой точности при различной влажности почвы использовались образцы разной длины, такой, чтобы ослабление проходящей волны не превышало 10-15 дБ. При этом на частотных зависимостях R и T наблюдаются максимумы и минимумы, а точность измерения диэлектрической проницаемости приближается к точности фазовых методов [6]. По данным измерений КДП были построены зависимости действительной части комплексного показателя преломления ( $n = \text{Re} \sqrt{\varepsilon}$ ) и нормализованного коэффициента ослабления ( $k = \text{Im} \sqrt{\varepsilon}$ ) как функций от влажности для всего диапазона частот. На рисунке 1 представлены такие зависимости всех четырех образцов для частоты 7,5 ГГц. Весь диапазон влажности можно разделить на два участка: при значениях влажности до значений  $W_t$  (переходной влажности) – участок с преобладанием в почве связанной воды и при значениях  $W > W_t$  – участок с преобладанием свободной воды. Наклоны линий, аппроксимирующих экспериментальные данные обоих участков, отличаются друг от друга.

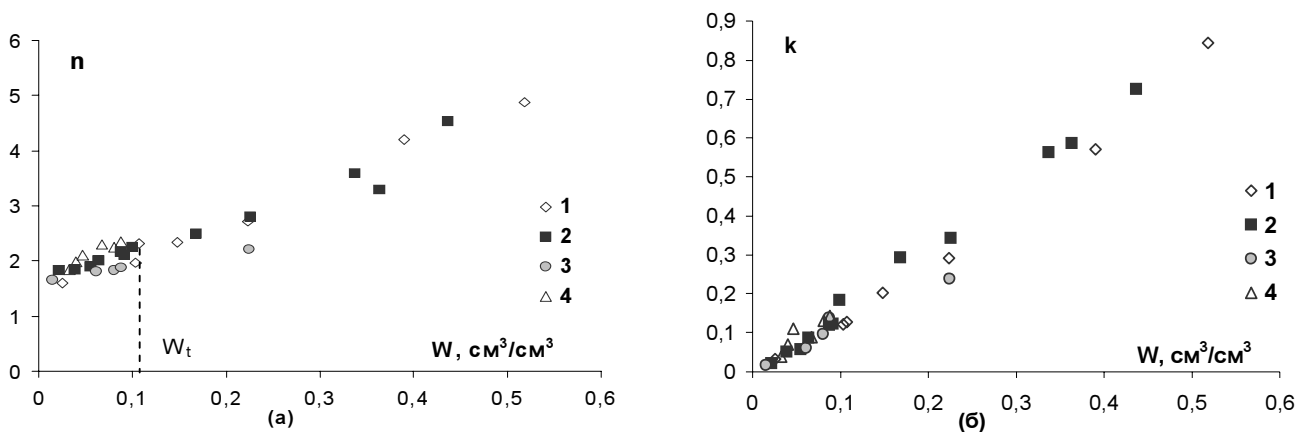


Рис. 1. Зависимости действительной (а) и мнимой (б) частей комплексного показателя преломления от влажности на частоте 7,5 ГГц для разных типов почв: 1, 2 – тиксотропный криозем с содержанием глины 24,0 % и 15,9%, соответственно, 3 – гомогенный криозем с содержанием глины 13,8% и 4 – рыхлопесчаный гранузем с содержанием глины 4,0%

### Методика оценки спектроскопических параметров

Поскольку изменения плотности почв с различной влажностью приводят к изменениям значений КДП, для определения диэлектрических параметров связанной и свободной воды и их количественного содержания была применена модифицированная рефракционная диэлектрическая модель [2]:

$$\begin{aligned} (\sqrt{\varepsilon_s(W)} - \sqrt{\varepsilon_a})D(W) &= (\sqrt{\varepsilon_m} - \sqrt{\varepsilon_a})\rho_{cd}(W) / \rho_m + (\sqrt{\varepsilon_b} - \sqrt{\varepsilon_a})W, & W < W_t & \quad (1) \\ (\sqrt{\varepsilon_s(W)} - \sqrt{\varepsilon_a})D(W) &= (\sqrt{\varepsilon_m} - \sqrt{\varepsilon_a})\rho_{cd}(W) / \rho_m + (\sqrt{\varepsilon_b} - \sqrt{\varepsilon_a})W_t + (\sqrt{\varepsilon_u} - \sqrt{\varepsilon_a})(W - W_t), & W \geq W_t & \quad (2) \end{aligned}$$

где  $\varepsilon_s, \varepsilon_a, \varepsilon_m, \varepsilon_b, \varepsilon_u$  – комплексные диэлектрические проницаемости почвенной смеси, воздуха, почвенного монолита, связанной и свободной воды, соответственно;  $W$  – объемная влажность почвы,  $W_t$  – максимальная объемная влажность, при которой вся вода находится в связанном состоянии. Функция  $D(W)$  определяется из следующего уравнения [2]:

$$D(W) = [1 + W\rho_w / \rho_{cd}(W)] [\rho_{cd}(W) / \rho_{cw}(W)] \quad (3)$$

где  $\rho_w, \rho_{cw}(W)$  и  $\rho_{cd}(W)$  – значения плотности воды, влажной и сухой почвы, соответственно.

Проведенное сравнение экспериментальных данных исследуемых почв с данными, полученными с помощью модели, представленной в [8], показало, что для образцов 1, 2 и 3 модель [8] дает завышенные значения  $\varepsilon$  (рис.2), поскольку вышеуказанная модель не принимает во внимание влияние связанной воды, считая всю воду свободной. И только для образца 4 модель дает хорошее согласие с экспериментом, поскольку этот образец представляет собой песок, в котором, как известно, почти вся вода находится в свободном состоянии (рис.3).

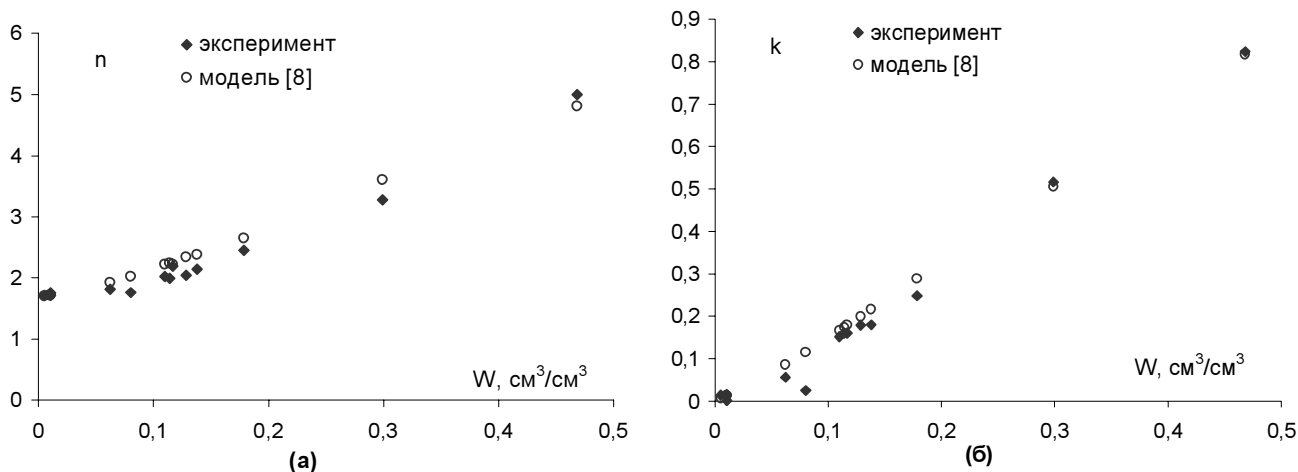


Рис. 2. Экспериментальные и модельные [8] зависимости действительной (а) и мнимой (б) частей комплексного показателя преломления от влажности почвенного образца №1 на частоте 12,5 ГГц

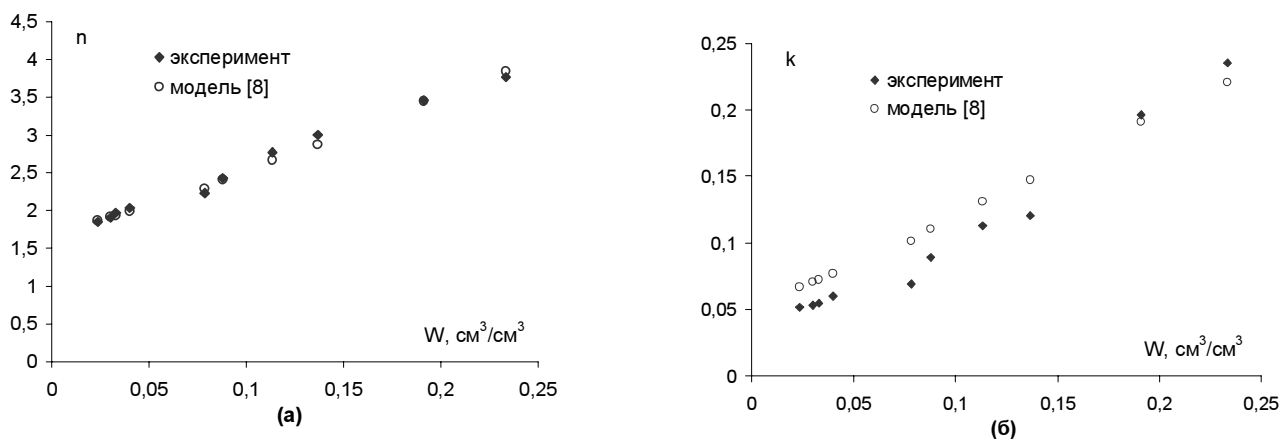


Рис. 3. Экспериментальные и модельные [8] зависимости действительной (а) и мнимой (б) частей комплексного показателя преломления от влажности почвенного образца №4 на частоте 3,5 ГГц

В обобщенной рефракционной модели, представленной формулами (1) - (3), влажностный диапазон разбивается на два участка. Для расчета ДП связанной воды (при влажности почвенного образца менее значений  $W_t$ ) используется формула (1). Когда значения влажности почвенного образца принимали значения больше значений  $W_t$ , расчет диэлектрических параметров свободной воды производился по формуле (2). Как видно из данных представленных на рис. 3 и рис. 4, обобщенная рефракционная модель гораздо лучше соответствует эксперименту, чем модель, приведенная в [8].

Проведенные с помощью модели (1) – (3) расчеты диэлектрических параметров указаны в таблице 1 для каждого типа почвы. В таблице представлены средние значения полученных данных в диапазоне частот 1 - 3 ГГц. В указанном диапазоне частот изменения значений действительной  $\epsilon'_a$ ,  $\epsilon'_b$  и мнимой  $\epsilon''_a$ ,  $\epsilon''_b$  частей КДП, соответственно, свободной и связанной воды не превышает погрешности измерений. Н и С - это процентное содержание гумуса и глины в почве.

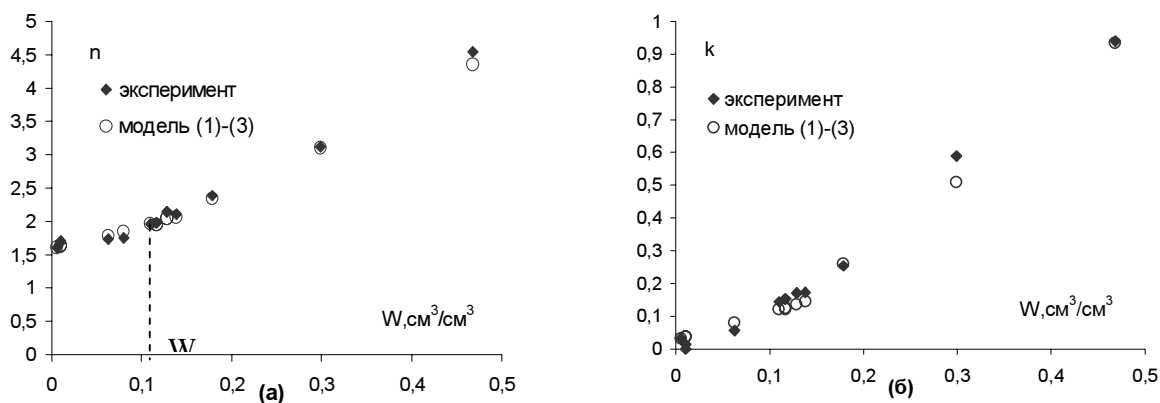


Рис. 4. Экспериментальные и модельные (1)-(3) зависимости действительной (а) и мнимой (б) частей комплексного показателя преломления от влажности почвенного образца №1 на частоте 14 ГГц

Таблица 1. Электрофизические параметры модели (1) – (3) исследуемых почвенных образцов

	H, %	C, %	$\rho_{cd}$	Твердая фаза почвы			Связанная вода		$W'_b$ , г/г	Свободная вода	
				$\rho_m$	$\epsilon'_m$	$\epsilon''_m$	$\epsilon'_b$	$\epsilon''_b$		$\epsilon'_u$	$\epsilon''_u$
1	3,25	23,97	1,31	2,50	4,97	0,02	35,13	24,53	0,12	73,78	38,94
2	1,16	15,94	1,43	2,25	5,22	0,22	23,31	17,18	0,06	62,44	34,39
3	2,27	13,80	1,20	2,52	4,82	0,40	45,92	7,61	0,07	88,54	21,82
4	0,28	4,01	1,53	2,60	5,05	0,41	69,42	5,16	0,02	93,99	14,12

Анализируя данные таблицы 1, следует отметить, что значения  $\epsilon'_m$  и  $\epsilon''_m$  (как компоненты минерального состава почвы) всех представленных почвенных образцов имеют незначительные отличия, что говорит об их близком минеральном составе. В то же время данные, относящиеся к связанной воде, существенно зависят от типа указанных почв.

Максимальное содержание связанной влаги в почве  $W'_t$  в таблице 1, имеющее размерность (г/г), представлено как отношение массы воды к массе почвы (весовая влажность). В формулах (1) - (3)  $W'_t$  представлено как объемное содержание максимального количества связанной воды, которое связано с вышеуказанной  $W'_t$  соотношением:  $W'_t = W_t / \rho_{cd}$ , где  $\rho_{cd}$  – плотность сухого сложения почвы. Значения  $W'_t$  в представленной таблице 1 изменяются от 0,02 до 0,12 г/г. При этом значения действительной части КДП  $\epsilon'_b$  связанной воды имеют тенденцию к уменьшению по мере увеличения значений  $W'_t$

В работе [9] была предложена эмпирическая формула для оценки значений  $W'_t$  как функции процентного содержания глины и гумуса. Эта формула основана на диэлектрических данных сельскохозяйственных почв Западной Сибири и имеет следующий вид:

$$W'_t = (0,22 \pm 0,03) \cdot C + (1,25 \pm 0,21) \cdot H \quad (4)$$

Здесь H, C – содержание гумуса и глины в почвенных образцах.

Ошибка вычисления максимального количества связанной воды по формуле (4), по сравнению с данными, представленными в таблице 1, оказались менее 10 % в диапазоне  $W'_t > 0,06$  и увеличиваются до 30 % при меньших значениях  $W'_t$ .

Для изучения частотной зависимости ДП влажной почвы была использована методика получения параметров Дебая, предложенная в [2, 3]. Для связанной и свободной почвенной влаги были определены значения проводимости  $\sigma$ , время релаксации  $\tau$  и статическая диэлектрическая постоянная  $\epsilon_0$ , оптическая ДП была принята 4,9 как в [2]. По результатам проведенных диэлектрических измерений в диапазоне частот от 0,3 до 14 ГГц с использованием формул (1) – (3) были вычислены ДП связанной и свободной воды. Затем

производился расчет параметров модели Дебая при наилучшем соответствии рассчитанных данных ДП связанной и свободной воды формулам Дебая, записанным для двух частот [1]:

$$\sigma = 2\pi\epsilon_r f_1 \frac{\epsilon_1'' - \epsilon_2'' \frac{f_1}{f_2} \frac{\epsilon_1' - \epsilon_\infty}{\epsilon_2' - \epsilon_\infty}}{1 - \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2 \frac{\epsilon_1' - \epsilon_\infty}{\epsilon_2' - \epsilon_\infty}}, \quad \tau = \frac{\epsilon_q' - \frac{\sigma}{2\pi\epsilon_r f_q}}{2\pi f_q (\epsilon_q' - \epsilon_\infty)}, \quad \epsilon_{0q} = \epsilon_\infty + (\epsilon_q' - \epsilon_\infty) \left(1 + (2\pi f_q \tau)^2\right)$$

где  $\epsilon_1' = \epsilon'(f_1)$ ,  $\epsilon_2' = \epsilon'(f_2)$ ,  $\epsilon_1'' = \epsilon''(f_1)$ ,  $\epsilon_2'' = \epsilon''(f_2)$ ,  $\epsilon_r$  – ДП вакуума, индекс q – принимает значения 1 или 2 в соответствии с выбранной частотой. Средние значения КДП связанной почвенной влаги, найденные как функции частоты по релаксационной модели Дебая для некоторых пар частот (0,4; 0,8; 1,5; 4; 10 ГГц), приведены в таблице 2.

Результаты вычислений, рассчитанных с помощью модели Дебая с использованием данных таблицы 2, показаны на рисунке 5, также как и значения действительной и мнимой части КДП связанной почвенной влаги, полученных непосредственно через применение формул (1) и (2) в качестве экспериментальных точек. Как можно заметить, согласование экспериментальных точек с модельными данными ухудшается с увеличением частоты, что можно объяснить либо повышенной погрешностью измерений, либо тем, что на этих частотах модель Дебая работает хуже, чем на более низких частотах.

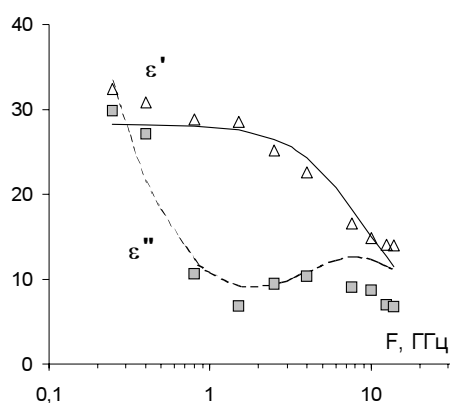


Рис. 5. Частотная зависимость экспериментальных и модельных значений действительной и мнимой частей КДП связанной воды для почвенного образца №1: 1, 2 – модельные зависимости Дебая; 3, 4 – значения ДП связанной воды, вычисленные по формулам (1) – (3) на основании экспериментальных данных ДП почвенных образцов

Таблица 2. Проводимость, время релаксации и статическая диэлектрическая проницаемость связанной и свободной воды для исследуемых типов почв

Тип почвы	Связанная вода			Свободная вода		
	$\sigma$ (си-менс/м)	$\tau$ , пс	$\epsilon_0$	$\sigma$ (си-менс/м)	$\tau$ , пс	$\epsilon_0$
1	0,72	16,17	28,23	2,05	7,82	76,63
2	0,96	11,89	24,49	1,91	7,69	64,08
3	1,37	12,97	23,55	0,82	3,69	82,52
4	1,25	14,99	77,08	1,59	7,11	93,42

Анализируя данные таблицы 2, можно отметить тот факт, что релаксационные параметры Дебая для связанной и свободной почвенной влаги заметно зависят от типа почвы.

## Заключение

Результаты этого исследования, проведенного в Северном приполярном регионе, представляют собой первичную оценку спектроскопических параметров почвенной влаги и являются вкладом в электрофизическую базу данных почв. Полученные результаты могут быть использованы при разработке алгоритмов и информационных технологий аэрокосмического мониторинга литосферы в зоне вечной мерзлоты.

Работа выполнена по программе Роснаука: "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники на 2002 – 2006 годы" (госконтракт № 02.434.11.7018).

## Литература

1. *V. L. Mironov, M. C. Dobson, V. H. Kaupp, S. A. Komarov, and V. N. Kleshchenko.* Generalized refractive mixing dielectric model for moist soils // Proceedings of IGARSS'02. Toronto. 2002. Vol. VI. P. 3556-3558.
2. *V. L. Mironov, P. P. Bobrov, and V. N. Mandrygina.* Bound Water Spectroscopy for the Soils with Varying Mineralogy // Proceedings of IGARSS'04. Anchorage. 2004. Vol. V. P. 3478 - 3480.
3. *V. L. Mironov, and P. P. Bobrov.* Soil Dielectric Spectroscopic Parameters Dependence on Humus Content // Proceedings of IGARSS'03. Toulouse. 2003. Vol. II. P. 1106-1108.
4. *V. L. Mironov.* Spectral Dielectric Properties of Moist Soils in The Microwave Band // Proceedings of IGARSS'04. Anchorage. 2004. Vol. V. P. 3474 - 3477.
5. *J. L'Hermitte, T. Le Toan, M. Grippa and A. Bouvet* Monitoring the Siberian Boreal Forest Using ENVISAT/ASAR Data: First Analysis Results // Proceedings of IGARSS'04. Anchorage. 2004. Vol. VII. P. 4586 – 4589.
6. *Бобров П.П., Галеев О.В.* Исследование метода определения диэлектрической проницаемости почв по модулям коэффициентов отражения и прохождения // Естественные науки и экология. Межвуз. сб. трудов. Вып.6. Омск. 2001. С. 7-10.
7. *A.H. Shivola, E. Alanen.* Studies of mixing formulae in the complex plane //IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. Vol. 29. № 4. 1991. P. 679-687.
8. *M. C. Dobson, F. T. Ulaby, M. Hallikainen, M.A.El-Rayes* Microwave dielectric behavior of wet soil. Part II: dielectric mixing models //IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. Vol. GE-23. №1. 1985. P. 35-45.
9. *Беляева Т.А. , Бобров А.П. , Бобров П.П. , Галеев О.В. , Мандрыгина В.Н.* Определение параметров моделей диэлектрической проницаемости почв с различной плотностью и различным содержанием гумуса по данным экспериментальных измерений в частотном диапазоне 0,1-20 ГГц // Исследование Земли из космоса, 2003. №5. С. 28-34.