

Формирование радиоизлучения почвы в модели глобального крупномасштабного радиотеплового излучения Земли в дециметровом диапазоне

А.А. Мильшин, А.Г. Гранков, Н.К. Шелобанова

*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова Российской академии наук,
141190, Фрязино Московской области, пл. Акад. Введенского, 1,
e-mails: amilshin@list.ru; agrankov@inbox.ru; nadezhda@ms.ire.rssi.ru*

Представлены модель комплексной диэлектрической проницаемости и радиационная модель радиоизлучения почв в дециметровом диапазоне длин волн. Рассмотрены спектральные особенности радиоизлучения почв на локальных и глобальных масштабах.

Ключевые слова: модель радиоизлучения Земли, дециметровый диапазон, диэлектрические и радиационные характеристики почв, глобальное моделирование радиоизлучения почв.

Введение

В конце 1990-х и начале 2000-х гг. в ИРЭ РАН разрабатывалась многослойная модель глобального крупномасштабного радиотеплового излучения Земли (МГРИЗ) в дециметровом диапазоне радиоволн (10...100 см) (Grankov, Milshin, 1997; Мильшин и др., 1998; Галкин и др., 2007; *Golovachev et al.*, 2010). Модель базируется на теоретических и экспериментальных исследованиях радиотеплового излучения водной поверхности, суши, растительного покрова, тропосферы, ионосферы и космического радиоизлучения, выполненных в ИРЭ РАН в течение последних 30 лет. Эти исследования осуществлялись на локальных пространственно-временных масштабах в диапазоне 18...30 см. Модель впервые позволяет исследовать механизм формирования радиотеплового излучения Земли в диапазоне длин волн 10...100 см и учитывает вклад в глобальное радиоизлучение Земли различных природных сред: водной поверхности, почв и растительных покровов различных типов, тропосферы, ионосферы и космического радиоизлучения. Данная модель позволяет оптимизировать выбор новых спектральных областей перспективных спутниковых радиометров L- и P-диапазонов, оценить потенциал их использования в климатологических задачах. В настоящей работе рассматривается радиационная модель излучения почв и спектральные особенности формирования радиоизлучения почв в дециметровом диапазоне (Гранков и др., 2011).

1. Модель диэлектрической проницаемости почв

Почва является сложной гетерогенной средой, состоящей из твердой, жидкой и газообразной фаз. Соотношение фаз различно для разных типов почв и их вертикальной стратификации. Вопросы моделирования комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) увлажнённых почв изучались ранее достаточно подробно. В качестве таких моделей использовались аппроксимации экспериментальных данных или различные формулы для расчёта КДП смесей диэлектриков. Использование первого подхода приводит к большим трудностям, связанным с отсутствием достаточного количества экспериментальных данных в широком спектральном участке и необходимостью экстраполяции полученных приближений в область значений почвенных параметров, данные о которых отсутствуют. Второй подход представляется более перспективным, так как позволяет при помощи формул смесей ди-

электриков рассчитать эффективные значения КДП влажных почв с учетом ограничений на использование тех или иных формул. Реутов Е.А. (1985) на основе анализа тринадцати формул для статистических смесей и матричных систем и результатов сравнения расчетных и экспериментальных данных сделал заключение, что рефракционная модель диэлектрической проницаемости почвы (РМ) или формула Бирчака является лучшей в СВЧ-диапазоне. В общем случае эта модель описывается выражением: $\sum \sqrt{\varepsilon_i} \cdot W_i = \sqrt{\varepsilon_c}$, где ε_c — КДП смеси; ε_i, W_i — КДП и объемные содержания компонент смеси. К недостаткам модели следует отнести отсутствие учета связанной воды, а также более низкие значения мнимой части КДП почвы по сравнению с экспериментальными данными на волнах больше 20 см с использованием КДП пресной воды.

В работе (Миронов и др., 1994) на основании рефракционной модели для 3-компонентной смеси была предложена модифицированная рефракционная модель КДП почв (МРМ), учитывающая связанную воду:

$$\sqrt{\varepsilon_{SM}} = \sqrt{\varepsilon_B} + (\sqrt{\varepsilon_{bw}} - 1)W \text{ для } W \leq W_p,$$

$$\sqrt{\varepsilon_{SM}} = \sqrt{\varepsilon_B} + (\sqrt{\varepsilon_{bw}} - 1)W_t + (\sqrt{\varepsilon_{fw}} - 1)(W - W_t) \text{ для } W > W_p,$$

где $\sqrt{\varepsilon_B} = 1 + \frac{\rho_B}{\rho_S}(\sqrt{\varepsilon_S} - 1)$, $\sqrt{\varepsilon_S} = N_{bw}$, $\sqrt{\varepsilon_B} = N_B$ — комплексный показатель преломления

твердых частиц почвы и сухой смеси ($W = 0$); $\sqrt{\varepsilon_{fw}} = N_{fw}$, $\sqrt{\varepsilon_{bw}} = N_{bw}$ — комплексный показатель преломления свободной и связанной воды; W_t — это влажность, соответствующая переходу от преобладающего влияния связанной влаги к преобладающему влиянию свободной влаги.

На рис. 1 представлена зависимость расчетных (РМ) и экспериментальных значений КДП почв от объемной влажности на длине волны 30 см.

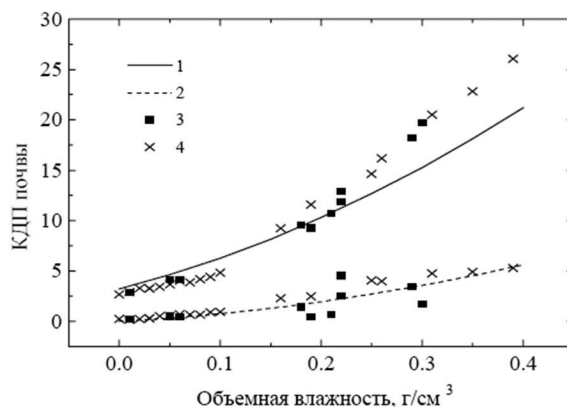


Рис. 1. Зависимость рассчитанных по рефракционной формуле (при плотности почвы $\rho_B = 1,6 \text{ г/см}^3$, $S = 8 \text{ г/л}$) значений ε'_{SM} (1), ε''_{SM} (2) почвы от объемной влажности на длине волны 30 см; экспериментальные данные (Мандрыгина, 2004): 3 — песок, 4 — суглинок

На рис. 2 представлена зависимость расчетных и экспериментальных значений ε'_{SM} , ε''_{SM} почвы от объемной влажности на длине волне 109 см с использованием РМ и МРМ. Расчеты с использованием РМ дают хорошее совпадение с экспериментом для ε'_{SM} , ε''_{SM} в диапазоне влажности $0 \dots 0,15 \text{ г/см}^3$, для больших значений влажности расчетные значения идут на графике ниже экспериментальных данных. Использовались две МРМ — с моделью связанной воды с модификацией параметров Дебая и эмпирической моделью связанной воды. Последняя модель, как следует из рисунка, существенно лучше согласуется с экспериментальными данными и лучше чем РМ описывает влажностную зависимость ε''_{SM} .

Учет текстуры почвы осуществляется посредством параметризации весовой переходной влажности W_t (Мандрыгина, 2004) по результатам обработки экспериментальных данных о

ε'_{SM} , ε''_{SM} , ρ_B , W различных типов почв в диапазоне частот $0,27 \dots 13,5$ ГГц: $W'_i = AC + BH$, где C — относительное весовое содержание глины (в г/г); H — относительное весовое содержание гумуса (в г/г); $A = 0,22 \pm 0,03$ и $B = 1,25 \pm 0,21$ — численные коэффициенты.

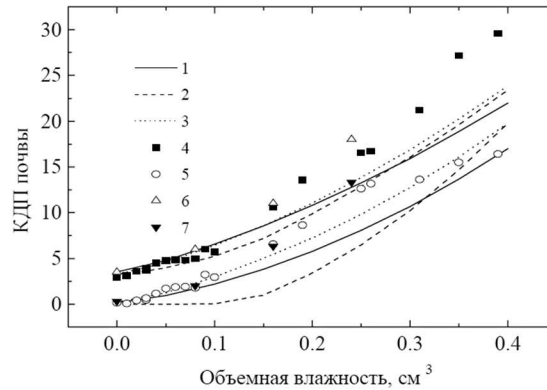


Рис. 2. Зависимость расчетных ($\rho_B = 1,6$ г/см³, $S = 8$ г/л) и экспериментальных значений ε'_{SM} (верхние кривые) и ε''_{SM} почвы от объемной влажности на длине волны 109 см: 1 — РМ; 2 — МРМ, глина 35 %, модель связанной воды с модификацией параметров Дебая; 3 — МРМ, глина 35 %, эмпирическая модель связанной воды. Эксперимент (Мандрыгина, 2004): 4 — ε'_{SM} ; 5 — ε''_{SM} , суглинок; 6 — ε'_{SM} ; 7 — ε''_{SM} , песок

2. Радиационные характеристики почв

При моделировании радиационных характеристик неоднородно увлажненных почв наиболее часто используют модели слоисто неоднородных сред, диэлектрические и температурные свойства которых однородны в горизонтальном направлении и меняются лишь по вертикали. Разбивая среду на достаточно большое количество однородно тонких слоев при дискретном изменении КДП от слоя к слою можно применить рекуррентную процедуру с коэффициентом отражения от двухслойной среды (Райзер, Черный, 1994):

$$R_{j-1, j-2} = \frac{r_{j-1, j-2} + r_{j, j-1} \exp(-i2\delta)}{1 + r_{j-1, j-2} \cdot r_{j, j-1} \exp(-i2\delta)},$$

где $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} h \sqrt{\varepsilon_{j-1} - \sin^2 \theta}$; h — толщина слоя; θ — угол падения волны от вертикали; $r_{j, j-1}$ — френелевский коэффициент отражения от границ раздела сред j и $j-1$.

В модели глобального радиоизлучения Земли с пространственным разрешением по долготе и широте $4 \times 5^\circ$ входные температурно-влажностные параметры задаются с пространственным разрешением $2,5 \times 2,5^\circ$ и временным разрешением один месяц для верхнего слоя 10 см и метрового нижнего слоя. Поэтому для исследований была выбрана двухслойная модель влажности почвы с толщиной верхнего плоского слоя 10 см. На рис. 3 представлены расчетные радиационно-влажностные зависимости почвы с использованием двухслойной модели среды на волнах 10; 50; 100 см. Спектральный контраст коэффициента излучения $\Delta\chi_S(\lambda) = (1 - |R|^2)$ достигает 0,17 для глины и 0,12 для песка.

В дистанционном зондировании большое значение имеет толщина скин-слоя почвенной среды, которая определяется по формуле для однородной среды. Толщина скин-слоя определяется как величина обратная коэффициенту поглощения:

$$l_w^e(\lambda) = \frac{1}{\gamma_w(\lambda)},$$

где $\gamma_w(\lambda) = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{0,5 \sqrt{(\varepsilon'_w)^2 + (\varepsilon''_w)^2} - \varepsilon'_w}$.

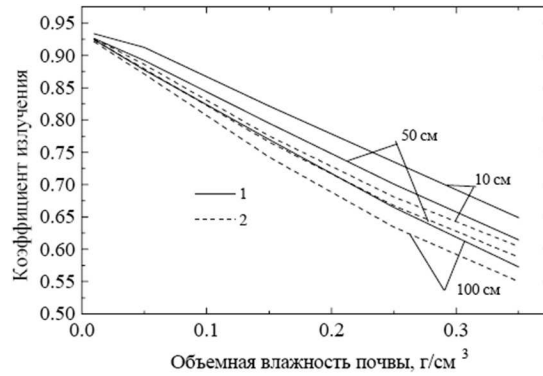


Рис. 3. Радиационно-влажностная зависимость почвы. Расчет для двухслойной модели на длинах волн 10; 50; 100 см. Первый слой — толщина 10 см, $\rho V = 1,4 \text{ г/см}^3$; второй слой — $\rho V = 1,6 \text{ г/см}^3$, влажность W на 0,05 г/см^3 выше, чем в первом. 1 — глина 35 %, гумус 6,6 %; 2 — песок

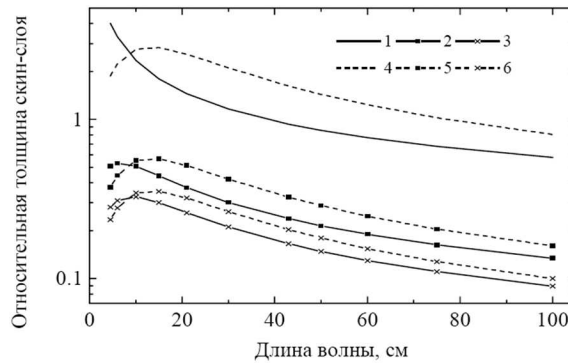


Рис. 4. Спектральная зависимость относительной толщины скин-слоя для почвы различной влажности: 1 — $W = 0,05 \text{ г/см}^3$, $\rho V = 1,6 \text{ г/см}^3$, глина 35 %; 2 — $W = 0,25 \text{ г/см}^3$, $\rho V = 1,6 \text{ г/см}^3$, глина 35 %; 3 — $W = 0,4 \text{ г/см}^3$, $\rho V = 1,6 \text{ г/см}^3$, глина 35 %; 4 — $W = 0,05 \text{ г/см}^3$, $\rho V = 1,4 \text{ г/см}^3$, песок; 5 — $W = 0,25 \text{ г/см}^3$, $\rho V = 1,4 \text{ г/см}^3$, песок; 6 — $W = 0,4 \text{ г/см}^3$, $\rho V = 1,4 \text{ г/см}^3$, песок

На рис. 4 представлена спектральная зависимость относительной толщины скин-слоя для песчаной и суглинистой почвы различной влажности. При одинаковой влажности толщина скин-слоя у песка больше, чем у глины. При малых значениях влажности величина $l_{SM}^e(\lambda)$ составляет $(1 \dots 3)\lambda$, для влажности $0,25 \dots 0,4 \text{ г/см}^3$ $l_{SM}^e(\lambda) \approx (0,2 \dots 0,6)\lambda$. Спектральную зависимость толщины скин-слоя при влажности более $0,05 \dots 0,4 \text{ г/см}^3$ можно оценить с помощью формулы:

$$l_{SM}^e(\lambda) \approx (9 \dots 1,5)\sqrt{\lambda} .$$

Наиболее эффективным инструментом исследования спектральных особенностей радиотеплового излучения природных сред является анализ чувствительности радиационных полей к вариациям параметров среды. Спектральные оценки чувствительности яркостной температуры (ЯТ) почвы к вариациям влажности неоднородно увлажненной почвы $dT_{SM}^{BT}(\lambda)/dW$, иллюстрирует рис. 5. Чувствительность является функцией влажности, проходящей через максимум, частотная дисперсия слабо выражена. Спектральные чувствительности к солёности, температуре и плотности почв по величине существенно меньше $dT_{SM}^{BT}(\lambda)/dW$, но имеют выраженные спектральные различия. На графике W — влажность в слое 10 см, соответственно, W_2 — влажность в нижнем слое.

Влияние температуры и влажности почвы на спектральные зависимости чувствительности ЯТ почвы к вариациям температуры почвы $dT_{SM}^{BT}(\lambda)/dt$ иллюстрирует рис. 6. Спектральная крутизна растет с увеличением влажности и в меньшей степени растет с увеличением температуры.

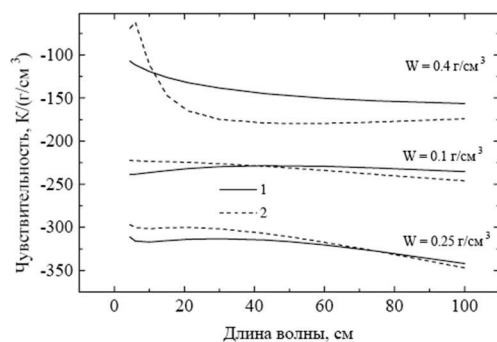


Рис. 5. Спектральные оценки чувствительности ЯТ почвы к вариациям влажности неоднородно увлажненной почвы. 1 – глина 35 %, 2 – песок. $W2 = W + 0,1 \text{ г/см}^3$

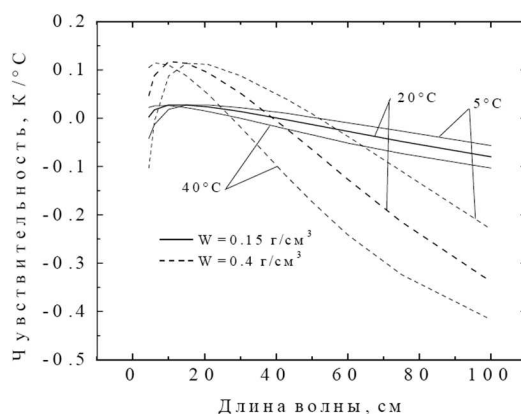


Рис. 6. Спектральные оценки чувствительности ЯТ почвы к вариациям температуры однородно увлажненной почвы (глина 35 %, гумус 6,6 %) при влажности 0,15 и 0,4 г/см³

3. Глобальное моделирование радиоизлучения почв

МГРИЗ использует разделение суши на 12 типов. Наиболее подходящим для анализа излучения собственно почв в данной работе является 8 тип суши в модели — широколиственные листопадные кусты, растущие одиночно и участками, поскольку экранирующее влияние этого типа растительности мало. В МГРИЗ учитывается семь типов почв в зависимости от процентного содержания песка, глины и органики, за основу взята классификация типов почв по схеме, полученные в FAO/UNESCO с разрешением $1 \times 1^\circ$. Почвенная модель представляет двухслойную структуру, с толщиной верхнего слоя 10 см и нижнего 100 см и более. Считается, что органика содержится только в верхнем слое. Плотность почвы считается постоянной по глубине. Среднемесячная температура и объемная влажность почв берутся из данных реанализа NCEP/NCAR с разрешением $2,5 \times 2,5^\circ$ (Kalnay et al., 1996). Температура считается постоянной по глубине, влажность различается по слоям 0...10 см и 10...100 см.

Моделирование сезонной динамики спектров радиотеплового излучения было выполнено для 8-го типа суши. Результаты моделирования представлены на рис. 7. Сезонные вариации находятся в пределах 3,1 (100 см) – 3,7 (50 см) К, спектральный контраст составляет $\Delta T_{100-50}^{BT} = 10,5 \dots 13,1 \text{ К}$, нарастание величины ЯТ по месяцам следующее: 9 – 8 – 7 – 5 – 6. Спектральные зависимости для остальных типов суши будут представлены полиномом вида: $T_{\Sigma 1}^{BT} = a + b1 \cdot \lambda + b2 \cdot \lambda^2$.

Моделирование глобального радиоизлучения собственно почв (без учета растительности) было выполнено на длинах волн 10; 15; 21; 30; 43; 50; 60; 75; 100 см. Пример распределения ЯТ почвы на длинах волн 21 и 75 см представлен на рис. 8. Вариации ЯТ почвы на

длине волны 21 см составляют 158...252 К, а на длине волны 75 см — 154...245 К; спектральный контраст — $\Delta T_{21-75}^{BT} = 2,7...13,4$ К. Отметим существенные вариации пространственного распределения ЯТ почв.

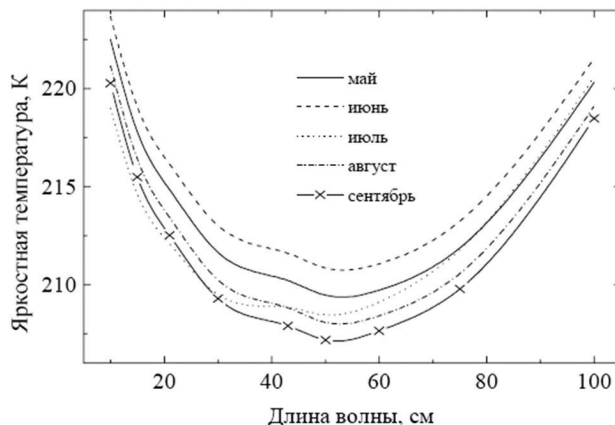


Рис. 7. Сезонная динамика спектров радиотеплового излучения широколиственных листопадных кустов, растущих одиночно и участками

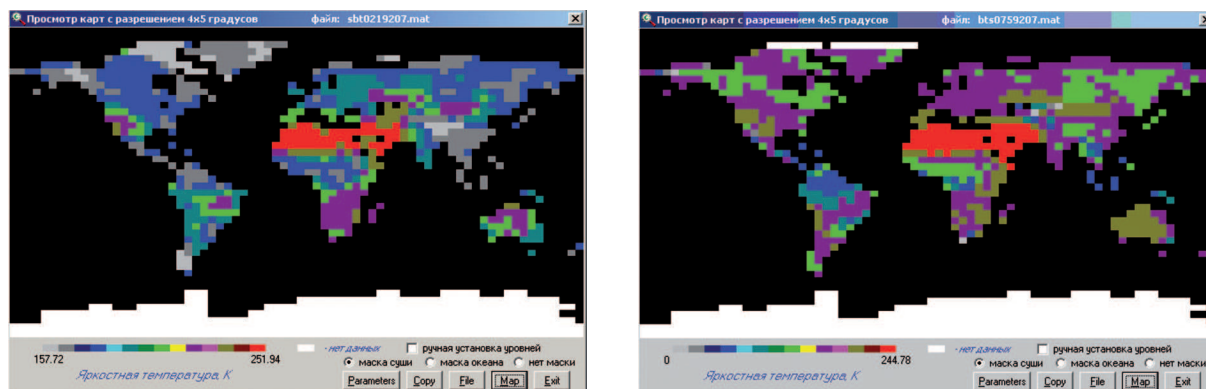


Рис. 8. Пространственное распределение ЯТ почвы по данным моделирования на длинах волн 21 (слева) и 75 см (справа) в июле 1992 г.

Заключение

Выполненный сравнительный анализ применения в дециметровом диапазоне рефракционной модели и модифицированной рефракционной модели КДП для различных типов почв показал преимущество последней. МРМ лучше соответствует экспериментальным данным в длинноволновом участке спектра и позволяет учитывать текстуру почв.

В рамках двухслойной радиационной модели почв рассмотрены спектральные зависимости радиационно-влажностной характеристики почвы, чувствительности ЯТ почвы к вариациям влажности и температуры и относительной толщины скин-слоя. Спектральная особенность заключается в монотонном снижении величины перечисленных параметров с увеличением длины волны. Основными факторами, определяющими поведение спектральных зависимостей радиационных характеристик, являются влажность, температура, плотность и состав почв. Механизм формирования излучения почвы в длинноволновом участке спектра хорошо согласуется с известным и изученным ранее механизмом в участке спектра 18...30 см.

Моделирование сезонной динамики ЯТ почв на глобальных масштабах выявило в спектральной зависимости ЯТ наличие экстремума в области 45...55 см. Пространственные вариации крупномасштабного радиотеплового излучения почв суши Земли значительны и контрасты ЯТ достигают 90...95 К на длинах волн 21 и 75 см.

Литература

1. Галкин Ю.С., Гранков А.Г., Мильшин А.А., Шмаленюк А.С. Моделирование ослабления радиоволн лесным пологом в глобальной модели радиоизлучения земной поверхности в L- и P-диапазонах // Вестник Московского государственного университета леса. Лесной вестник. 2007. Вып. 2 (51). С. 90–99.
2. Гранков А.Г., Бузенкова Е.А., Мильшин А.А., Шелобанова Н.К. Формирование радиоизлучения почвы в модели глобального крупномасштабного радиотеплового излучения Земли в дециметровом диапазоне // Сб. докл. 23-й Всерос. науч. конф. «Распространение радиоволн». Йошкар-Ола. 2011. Т. 3. С. 187–190.
3. Мандрыгина В.Н. Диэлектрическая проницаемость почв с различным содержанием гумуса и влияние на нее гидрофобных и гидрофильных загрязнителей: Дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.03. Омск, 2004. 165 с.
4. Мильшин А.А., Гранков А.Г., Шелобанова Н.К. Глобальная модель радиотеплового излучения земной поверхности в L- и P-участках СВЧ-диапазона // Тр. 53-й Науч. сессии РНТОРЭС им. А.С. Попова. М., 1998. С. 75–76.
5. Миронов В.Л., Комаров С.А., Рычкова Н.В., Клеценко В.Н. Изучение диэлектрических свойств влажных почвогрунтов в СВЧ-диапазоне // Исслед. Земли из космоса. 1994. № 4. С. 18–24.
6. Райзер В.Ю., Черный И.В. Микроволновая диагностика поверхностного слоя океана. СПб.: Гидрометеиздат. 1994. 231 с.
7. Реутов Е.А. СВЧ-радиационные характеристики неоднородно увлажненных почвогрунтов: Дис. ... канд. технич. наук: 01.04.03. М., 1985. 159 с.
8. Grankov A.G., Milshin A.A. Modeling microwave emission of land surface at L-, P-bands in the frame of the general circulation model // Annales de Geophysique. Suppl. 2 to V. 15. Pt. 2. 1997. P. 276.
9. Golovachev S.P., Grankov A.G., Milshin A.A., Shelobanova N.K. Modeling of global-large scale natural microwave Earth radiation in decimeter wavelength scale // Proc. Microwave Signatures 2010 Specialist Symposium on Microwave Remote Sensing of the Earth, Oceans, and Atmosphere. Florence, 2010. 8 p.
10. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds R., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Jenne R., Joseph D. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project // Bul. American Meteorological Society. 1996.

Microwave Emission of Soils at the Model of the Global-Large Scale Natural Microwave Earth Radiation in A Decimeter Band

A.A. Milshin, A.G. Grankov, N.K. Shelobanova

*Fryazino Branch of the Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics, RAS
141190, Fryazino, Moscow region, Vvedenskii sq., 1,
e-mails: amilshin@list.ru; agrankov@inbox.ru; nadezhda@ms.ire.rssi.ru*

The model of complex dielectric permittivity and a soil emission model in a decimeter band are submitted. Spectral features of a radio emission of soils on local and global scales are considered.

Keywords: microwave Earth radiation model, decimeter band, dielectric and emission characteristics of soil, global modeling of soil emission.