

УДК 551.467:699.78

НЕСТАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЭФФЕКТИВНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПРИРОДНЫХ СРЕД, УЧИТЫВАЮЩИЕ РАССЕЯНИЕ НА ЧАСТИЦАХ СРЕДЫ

Д. А. Боярский, Н. И. Клиорин, В. Г. Мировский, В. В. Тихонов

Проанализирована возможность учета рассеяния при описании диэлектрической проницаемости природных сред путем использования динамической поляризуемости сферических частиц, составляющих среду. Показано, что предложенный подход пригоден и для многокомпонентных смесей. В качестве примера рассмотрена модель диэлектрических свойств влажного снега. Показано, что при учете эффектов рассеяния и пространственного распределения влаги в снегу существует соответствие между экспериментальными и теоретическими зависимостями диэлектрической проницаемости влажного снега.

Геофизические среды, встречающиеся в природе, в большинстве случаев представляют собой смеси веществ, обладающих различными диэлектрическими свойствами. В приложениях дистанционного зондирования принято рассматривать микроскопически сложные смеси как макроскопически однородные и характеризовать их эффективной диэлектрической проницаемостью. Большинство природных неоднородных сред широко изучалось с этой точки зрения [1 - 3]. Примеры этого — снег, озерный и морской лед, почва, растительный покров и т. д. Во многих случаях одной из составных частей этих смесей является вода, которая делает диэлектрические свойства смеси чувствительными к небольшим изменениям объемных частей компонент из-за того, что диэлектрическая проницаемость воды обычно значительно отличается от диэлектрических проницаемостей других компонент. Для объяснения свойств диэлектрических проницаемостей смесей из известных диэлектрических постоянных и объемных долей компонент ранее было предложено несколько моделей [1 - 5]. В значительной их части реальная среда рассматривается как многофазная смесь погруженных в фоновую среду частиц (с оболочкой и без оболочки) различной формы

и произвольной ориентации [4 - 6]. Однако в рассматриваемых моделях не учитываются потери рассеяния, и анализ ограничивается пределами квазистатического подхода. Таким образом, реализуется низкочастотное решение, пределы применимости которого определяются диапазонами рабочих частот и размерами частиц, составляющих смесь.

Решение обратной задачи дистанционного зондирования природных сред требует описания их диэлектрических свойств в широком диапазоне частот, поскольку получившие в настоящее время широкое применение в практике дистанционного зондирования исследования в высокочастотной части СВЧ диапазона обеспечивают получение существенно новых результатов. Это приводит к тому, что при построении моделей необходим учет эффектов рассеяния в средах, состоящих из жестких плотноупакованных рассеивателей. Практически применимое волновое решение данной задачи в настоящее время не найдено. В связи с этим кажется возможным создание электродинамических моделей, как правило, не имеющих строгого теоретического обоснования, но дающих практически применимые результаты. Эффективность такого подхода была показана нами в работах [7, 8], где был предложен способ учета рассеяния путем использования динамической поляризуемости сферических частиц, составляющих среду. Построенная на основе этого модель $\epsilon_{\text{эфф}} (\epsilon_{\text{эфф}} = \epsilon'_{\text{эфф}} + i \epsilon''_{\text{эфф}})$ статистически однородного слоя сухого снежного покрова правильно описывает диэлектрическую проницаемость снега в высокочастотной части СВЧ диапазона при различных параметрах снежного покрова, поглощение СВЧ излучения в снежной толще, а также поведение мнимой части $\epsilon_{\text{эфф}}$ сухого снега [7, 8]. Для влажного снега одной из составных частей является вода, наличие которой приводит к различию диэлектрических свойств сухого и влажного снега. В данной работе рассмотренный в [7, 8] подход распространен на трехкомпонентные смеси и на основе предложенных моделей эффективной диэлектрической проницаемости смесей сделана попытка описать диэлектрические свойства влажного снега в диапазоне частот выше 15 ГГц.

Рассмотрим среду с диэлектрической проницаемостью ϵ_c , включающую в себя два вида сферических рассеивателей с диэлектрическими проницаемостями ϵ_1 и ϵ_2 . Эффективная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_{\text{эфф}}$ такой среды, согласно модели Поллера - Ван Сантена [1, 5, 14], имеет вид

$$\epsilon_{\text{эфф}} = \epsilon_c \left[1 - \frac{3V_2(\epsilon_2 - \epsilon_c)}{2\epsilon_{\text{эфф}} + \epsilon_2} - \frac{3V_1(\epsilon_1 - \epsilon_c)}{2\epsilon_{\text{эфф}} + \epsilon_1} \right]^{-1}, \quad (1)$$

где V_2 и V_1 - доли объема, занимаемые частицами того или другого вида.

Известно, что $\epsilon_{\text{эфф}}$ среды, состоящей из дискретных "борновских" рассеивателей, записывается в следующем виде [9]:

$$\epsilon_{\text{эфф}} = 1 + \frac{4\pi}{k^2} n \langle f_\omega \rangle, \quad (2)$$

где k - волновой вектор, n - концентрация рассеивателей, f_ω - фазовая функция рассеяния частицы вперед. Угловые скобки означают усреднение по размерам ансамбля рассеивателей. С другой стороны, выражение для $\epsilon_{\text{эфф}}$ может быть представлено в виде [10, 11]

$$\epsilon_{\text{эфф}} \approx 1 + 4\pi n \alpha_d, \quad (3)$$

где α_d - комплексная поляризуемость отдельного рассеивателя. Сравнивая (2) и (3), запишем для "борновской" частицы

$$\alpha_d = \langle f_\omega \rangle / k^2. \quad (4)$$

Для частиц сферической формы f_ω рассчитывается по теории Ми [10, 12, 13].

Распространим этот результат на случай "жестких" сферических рассеивателей, которыми моделируются многие природные среды. Для этого выделим в (1) статические поляризуемости $\alpha_{\text{ст}}$ сферических частиц, входящих в рассматриваемую среду. Согласно [11] статическая поляризуемость сферической частицы имеет вид

$$\alpha_{\text{ст}}^i = \frac{\epsilon_i - \epsilon_c}{\epsilon_i + 2\epsilon_c} r_i^3, \quad (5)$$

где r_i - радиус i -й частицы, а ϵ_i - ее диэлектрическая проницаемость. Преобразовав выражение (1) и учитя (5), получим

$$\epsilon_{\text{эфф}} = \frac{\epsilon_c e_1 e_2}{e_1 e_2 - 3V_2 e_1 (\epsilon_2 + 2\epsilon_c) (\alpha_{\text{ст}}^2/r_2^3) - 3V_1 e_2 (\epsilon_1 + 2\epsilon_c) (\alpha_{\text{ст}}^1/r_1^3)}, \quad (6)$$

где $e_1 = (2\epsilon_{\text{эфф}} + \epsilon_1)$, $e_2 = (2\epsilon_{\text{эфф}} + \epsilon_2)$. Заменим статические поляризуемости частиц на динамические согласно соотношению (4):

$$\epsilon_{\text{эфф}} = \frac{\epsilon_c e_1 e_2}{e_1 e_2 - 4\pi n_1 (\epsilon_2 + 2\epsilon_c) (\langle f_\omega \rangle_1 / k^2) - 4\pi n_2 (\epsilon_1 + 2\epsilon_c) (\langle f_\omega \rangle_2 / k^2)}. \quad (7)$$

и произвольной ориентации [4 - 6]. Однако в рассматриваемых моделях не учитываются потери рассеяния, и анализ ограничивается пределами квазистатического подхода. Таким образом, реализуется низкочастотное решение, пределы применимости которого определяются диапазонами рабочих частот и размерами частиц, составляющих смесь.

Решение обратной задачи дистанционного зондирования природных сред требует описания их диэлектрических свойств в широком диапазоне частот, поскольку получившие в настоящее время широкое применение в практике дистанционного зондирования исследования в высокочастотной части СВЧ диапазона обеспечивают получение существенно новых результатов. Это приводит к тому, что при построении моделей необходим учет эффектов рассеяния в средах, состоящих из жестких плотноупакованных рассеивателей. Практически применимое волновое решение данной задачи в настоящее время не найдено. В связи с этим кажется возможным создание электродинамических моделей, как правило, не имеющих строгого теоретического обоснования, но дающих практически применимые результаты. Эффективность такого подхода была показана нами в работах [7, 8], где был предложен способ учета рассеяния путем использования динамической поляризуемости сферических частиц, составляющих среду. Построенная на основе этого модель $\epsilon_{\text{эфф}}$ ($\epsilon_{\text{эфф}} = \epsilon'_{\text{эфф}} + i \epsilon''_{\text{эфф}}$) статистически однородного слоя сухого снежного покрова правильно описывает диэлектрическую проницаемость снега в высокочастотной части СВЧ диапазона при различных параметрах снежного покрова, поглощение СВЧ излучения в снежной толще, а также поведение мнимой части $\epsilon_{\text{эфф}}$ сухого снега [7, 8]. Для влажного снега одной из составных частей является вода, наличие которой приводит к различию диэлектрических свойств сухого и влажного снега. В данной работе рассмотренный в [7, 8] подход распространен на трехкомпонентные смеси и на основе предложенных моделей эффективной диэлектрической проницаемости смесей сделана попытка описать диэлектрические свойства влажного снега в диапазоне частот выше 15 ГГц.

Рассмотрим среду с диэлектрической проницаемостью ϵ_c , включающую в себя два вида сферических рассеивателей с диэлектрическими проницаемостями ϵ_1 и ϵ_2 . Эффективная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_{\text{эфф}}$ такой среды, согласно модели Поллера - Ван Сантена [1, 5, 14], имеет вид

$$\epsilon_{\text{эфф}} = \epsilon_c \left[1 - \frac{3V_2(\epsilon_2 - \epsilon_c)}{2\epsilon_{\text{эфф}} + \epsilon_2} - \frac{3V_1(\epsilon_1 - \epsilon_c)}{2\epsilon_{\text{эфф}} + \epsilon_1} \right]^{-1}, \quad (1)$$

Полученная нами формула (7) является общим выражением, описывающим эффективную диэлектрическую проницаемость среды, включающей два вида сферических частиц разных размеров, с учетом рассеяния.

Аналогичным образом рассмотрим другую трехкомпонентную смесь, которая состоит из фоновой однородной среды (ϵ_3), включающей в себя сферические частицы (ϵ_1), покрытые оболочкой (ϵ_2). Следуя [2, 4], примем в качестве элементарного рассеивателя структуру, состоящую из сферической частицы радиусом R_1 , покрытую оболочкой с внешним радиусом R_2 . Этот рассеиватель окружен слоем фоновой среды с эффективным радиусом R_3 . Эффективная диэлектрическая проницаемость такой смеси имеет вид [4]

$$\epsilon_{\text{эфф}} = \frac{3[(R_2/R_3)^3(\epsilon_2 - \epsilon_3)(2\epsilon_2 + \epsilon_1) - (R_1/R_3)^3(\epsilon_2 - \epsilon_1)(2\epsilon_2 + \epsilon_3)]D + 1}{D = [(2\epsilon_3 + \epsilon_2)(2\epsilon_2 + \epsilon_1) - (R_1/R_2)^3(\epsilon_2 - \epsilon_3)(\epsilon_2 - \epsilon_1) - (R_2/R_3)^3(\epsilon_2 - \epsilon_3)(2\epsilon_2 + \epsilon_1) + (R_1/R_3)^3(\epsilon_2 - \epsilon_1)(2\epsilon_2 + \epsilon_3)]^{-1}} \quad (8)$$

Статическая поляризуемость сферической частицы с оболочкой выглядит следующим образом [13]:

$$\alpha_{\text{ст}} = \frac{(\epsilon_2 - \epsilon_3)(2\epsilon_2 + \epsilon_1) + (R_1/R_2)^3(\epsilon_1 - \epsilon_2)(2\epsilon_2 + \epsilon_3)}{(2\epsilon_3 + \epsilon_2)(2\epsilon_2 + \epsilon_1) + 2(R_1/R_2)^3(\epsilon_1 - \epsilon_2)(\epsilon_2 - \epsilon_3)} R^3. \quad (9)$$

Тогда, заменив $\alpha_{\text{ст}}$ на α_d и проведя усреднение по размерам частиц, получим выражение для $\epsilon_{\text{эфф}}$ среды, состоящей из сферических частиц разных размеров с оболочкой, с учетом рассеяния:

$$\epsilon_{\text{эфф}} = \int_0^\infty \frac{2f_\omega/k_0^2 + R^3}{R^3 - f_\omega/k_0^2} \varphi(r) dr, \quad (10)$$

где f_ω и R_3 являются функциями r , а $\varphi(r)$ - нормированная функция распределения частиц по размерам.

Исследуем применимость предложенных выше моделей эффективной

дизэлектрической проницаемости к реальной среде. Интересным примером рассеивающей двухкомпонентной смеси является влажный снег. Однако для правильного описания $\epsilon_{\text{эфф}}$ влажного снега необходим учет пространственного распределения водной компоненты. Как отмечено в работах [15, 16], этот вопрос в настоящее время достаточно хорошо исследован только в двух предельных случаях: при низких, $W_v < 5\%$, и высоких, $W_v = 100\%$, влажностях. Здесь и далее W_v есть объемная влажность снежного покрова. В связи с этим нами проведены оценки влагоудерживающей способности ледяных зерен и распределения воды по воздушным порам. Поскольку эти оценки относятся скорее к гляциологии, чем к радиофизике, приведем лишь их результаты.

При низких влажностях вода находится в пленочной фазе и, согласно оценкам, полностью обволакивает ледяное зерно, а толщина пленки воды на всей поверхности зерна практически постоянна. При $W_v > 5\%$ влага в снегу, по-видимому, существует в капельной фазе. Очевидно, что размер капель определяется размером снежных пор, причем с точки зрения электродинамики важно, поры каких размеров заполняются влагой в первую очередь, а для учета распределения водяных капель по размерам необходимо оценить их минимальный и максимальный размер. Из энергетических соображений ясно, что по мере роста влажности заполнение пор водой начинается с наиболее крупных, поскольку при этом суммарная поверхностная энергия водяных капель минимальна. Будем считать, что вода заполняет все снежные поры, размер которых $r > r_{\min}$, где r_{\min} - минимальный размер пор, заполненных водой, а максимальный размер водяной капли $r_{\max} \approx 0,14$ см определяется капиллярной постоянной воды по льду. Минимальный размер находим из интегрального уравнения, связывающего пористость снега, концентрацию пор, распределение пор по размерам и влажность:

$$W_v = \frac{4}{3\pi N_p} \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \varphi(r) r^3 dr,$$

где N_p - концентрация пор. Будем считать, что распределения пор и ледяных зерен по размерам подчиняются во влажном снегу логарифмически нормальному распределению [15, 17], а концентрация ледяных зерен N_d - порядка концентрации пор, причем поры практически полностью заполняются водой, поскольку поверхностная энергия границы раздела воздух - лед существенно больше энергии границ раздела лед - вода и вода - воздух. Для нахождения среднего радиуса пор связем

параметры распределения пор с параметрами ледяных зерен и пористостью сухого снега:

$$\Phi = 4/3\pi N_{\text{п}} \int_0^{\infty} \varphi(r) r^3 dr,$$

где $\Phi = 1 - \rho_{\text{cc}}/\rho_{\text{л}}$ - пористость сухого снега, ρ_{cc} - плотность сухого снега, $\rho_{\text{л}}$ плотность льда. Концентрация пор находится из следующего выражения:

$$1 - \Phi = 4/3\pi N_{\text{л}} \int_0^{\infty} \varphi(r) r^3 dr, \quad N_{\text{п}} = N_{\text{л}}.$$

Таким образом, если известны влажность и плотность снега, средний радиус ледяных зерен и дисперсия их размеров, можно найти параметры, определяющие состояние влаги в снегу, а затем и диэлектрическую проницаемость влажного снега.

Мы моделировали влажный снег однородной воздушной средой с $\epsilon_3 = \epsilon_c = 1$, содержащей либо сферические ледяные зерна, покрытые пленкой воды, либо сферические включения льда и воды. Соответственно в наших формулах индекс 1 обозначает лед, а индекс 2 - воду. При низкой влажности снега $W_v < 5\%$ эффективная диэлектрическая проницаемость определялась из оболочечной модели (10), где R_1 - радиус ледяного зерна, а R_2 и R_3 вычислялись по следующим формулам [4]:

$$R_2 = R_1 \left(1 + \frac{\rho_{\text{л}} W_m}{1-W_m} \right)^{1/3}, \quad R_3 = R_1 (\rho_{\text{л}}/\rho_c)^{1/3} \left(1 + \frac{W_m}{1-W_m} \right)^{1/3},$$

ρ_c - плотность снега ($\rho_c = \rho_{\text{cc}} + \rho_B W_v$), $W_m = W_v \rho_B / \rho_c$ - массовая влажность снега, ρ_B - плотность воды. При влажностях снега $W_v > 5\%$ эффективная диэлектрическая проницаемость определялась по капельной модели (7). Вычисления проводились при плотностях сухого снега 0,1 - 0,5 г/см³, средний радиус ледяных зерен брался в соответствии с плотностью сухого снега [18, 19] 0,02 - 0,06 см, дисперсия размеров ледяных зерен составляла 30% [21]. Рассчитанные по нашим моделям значения $\epsilon_{\text{эфф}}$ сравнивались с экспериментальными результатами по определению диэлектрической проницаемости влажного снега на частотах от 1 до 37 ГГц [1, 3] (рис. 1-4). Чтобы не загромождать рисунки, экспериментальные значения (звездочки) приведены без соответствующих

погрешностей измерений, которые для действительной части $\epsilon_{\text{эфф}}$ были не более 4% во всем диапазоне частот и влажностей снега, а для мнимой части $\epsilon_{\text{эфф}}$ на частотах ≤ 18 ГГц ошибки измерений составляли 10 - 70%, в зависимости от влажности снега, и не более 8% на частотах 18 - 37 ГГц.

На рис. 1 представлены зависимости действительной а) и мнимой б) частей диэлектрической проницаемости снега от частоты электромагнитного излучения, вычисленные по оболочечной (пунктирная линия) и капельной (сплошная линия) моделям при $\rho_{cc} = 0,24 \text{ г/см}^3$ и $W_v = 2\%$. Как видно из рисунка, действительная часть эффективной диэлектрической проницаемости снега при его малых влажностях, вычисленная по оболочечной модели, хорошо согласуется с экспериментальными данными.

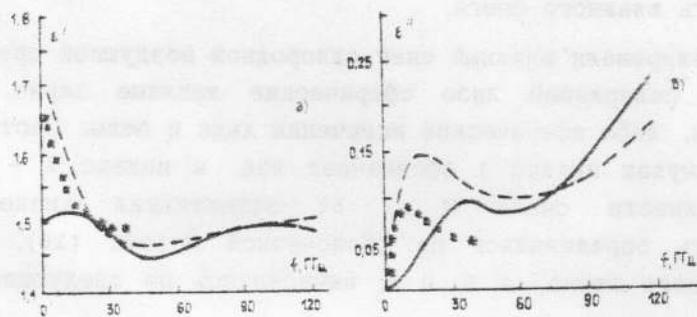


Рис. 1

Частотные зависимости действительной и мнимой частей $\epsilon_{\text{эфф}}$ снега при $\rho_{cc} = 0,24 \text{ г/см}^3$ и $W_v = 8\%$, полученные по капельной модели с учетом рассеяния (сплошная линия) и в ее статическом пределе (пунктирная линия), сравниваются с экспериментальными значениями на рис. 2. На примере капельной модели отметим, что при частотах $f \rightarrow 0$ динамическая поляризуемость стремится к своему статическому пределу $\alpha_d \rightarrow \alpha_{\text{ст}}$ и, следовательно, $\epsilon_d \rightarrow \epsilon_{\text{ст}}$.

Итак, как видно из рис. 2, капельная модель хорошо описывает экспериментальные результаты на частотах $f > 15$ ГГц. Расхождения между экспериментальными данными и значениями $\epsilon_{\text{эфф}}$, определенными по капельной модели, на частотах $f \leq 15$ ГГц (рис. 2), а также несовпадение экспериментальных и теоретических частотных зависимостей мнимых частей $\epsilon_{\text{эфф}}$ при низких влажностях (рис. 1)

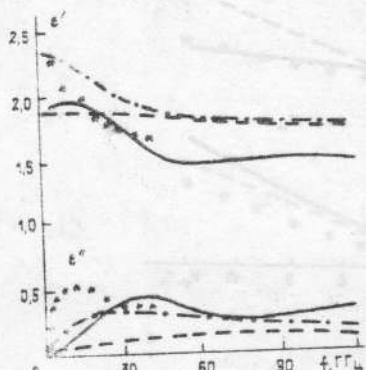


Рис. 2.

объясняются, на наш взгляд, отличием реальной формы частиц от сферической. Возможно, более строгий учет формы рассеивателей, например моделирование их случайно ориентированными частицами эллипсоидальной формы, устранит имеющиеся расхождения, так как усредненное полное сечение случайно ориентированных эллипсоидов существенно отличается от полного сечения сфер при малых значениях дифракционного параметра $2\pi r/\lambda$.

[20]. Отметим, что статические модели правильно описывают диэлектрическую проницаемость влажного снега на частотах 1 - 5 ГГц при соответствующем выборе формы эллипсоидов, которыми моделируются частицы среды. Однако на более высоких частотах эффективная диэлектрическая проницаемость, определенная по этим моделям, существенно отличается от экспериментальных результатов. Этот факт демонстрирует рис. 2, где приведена частотная зависимость $\epsilon_{\text{эфф}}$, вычисленная по модели Польдера - Ван Сантена [5] (штрихпунктирная линия).

На рис. 3, 4 представлены зависимости действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости снега от влажности снежного покрова при эквивалентной плотности сухого снега $0,2 \text{ г}/\text{см}^3$ и $0,4 \text{ г}/\text{см}^3$ соответственно. Из приведенных зависимостей видно, что оболочечная модель (пунктирная линия) хорошо описывает зависимость эффективной диэлектрической проницаемости снега от влажности при $w_v < 5\%$. Зависимость $\epsilon_{\text{эфф}}$, полученная по капельной модели, совпадает с экспериментальными результатами во всем диапазоне влажностей снега при низких плотностях снежного покрова. Однако соответствие несколько ухудшается при увеличении плотности снежного покрова. Это, по-видимому, связано с ограниченностью предложенного нами способа включения эффектов рассеяния в значение эффективной диэлектрической проницаемости среды, при увеличении плотности упаковки рассеивателей.

Таким образом, показано, что возможен учет рассеяния при описании диэлектрической проницаемости природных сред путем использования динамической поляризуемости сферических частиц.

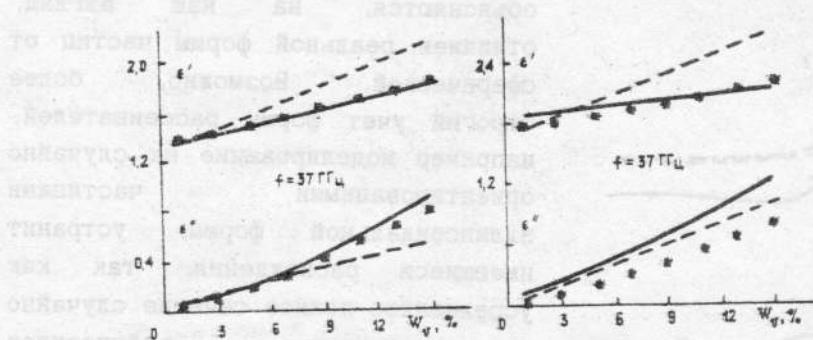


Рис. 3.4.

составляющих среду. Предложенный нами подход пригоден и для многокомпонентных смесей. На примере проведенного нами моделирования диэлектрических свойств влажного снега показано соответствие рассчитанных зависимостей диэлектрической проницаемости влажного снега экспериментальным результатам при учете эффектов рассеяния и пространственного распределения влаги в снегу. Отметим, что оболочечная модель согласуется с экспериментом при влажностях снежного покрова, не превышающих 5%. При влажностях, больших 5%, хорошее согласие с экспериментом на частотах $f > 15$ ГГц показывает капельная модель, основанная на модифицированной формуле Полдера - Ван Сантина (7). Отличительной особенностью предложенных моделей является отсутствие подгоночных параметров и учет физико-механических характеристик (плотность, средний размер ледяных зерен, дисперсия размеров ледяных зерен) среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hallikainen M.T. et al. //IEEE Trans. Ant. Prop. 1986. V.34. N 11. P.1329.
2. Tinga W.R., Voss W.A.G. //J.Appl. Phys. 1973. V.44. N 9. P.3897.
3. Sihvola A.H. et al. //J. Glaciology. 1985. V.31. N 108. P.163.
4. Tiuri M., Schultz H. NASA Workshop on the Microwave Remote Sens. of Snowpack Prop. Ft.Collins. Colorado. 20 - 22 May. 1980. P.225.
5. Colbeck S.C. NASA Workshop on the Microwave Remote Sens. of Snowpack Prop. Ft.Collins. Colorado. 20 - 22 May. 1980. P.21.

6. Sihvola A.H., Kong J.A. //IEEE Trans. geosci Remote Sensing. 1988. V.26. N 4. P.420.
7. Дмитриев В.В., Клиорин Н.И., Мировский В.Г., Эткин В.С. //Изв. вузов. Радиофизика. 1990. Т.33. N 9. С.1020.
8. Боярский Д.А., Дмитриев В.В., Клиорин Н.И., Мировский В.Г. // Изв. вузов. Радиофизика. 1991. Т.34. N 8. С.859.
9. Апресян Л.А., Кравцов Ю.А. Теория переноса излучения. - М.:Наука, 1983. - 216 с.
10. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. - М.:Наука, 1973. - 720 с.
11. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. - М.:Наука, 1982. - 621 с.
12. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. - М.:Мир, 1981. - 597 с.
13. Борен К., Кафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. - М.:Мир, 1986. - 664 с.
14. Polder D., Van Santen J.H. //Physica. 1946. V.12. N 5. P.257.
15. Colbeck S.C. //Physics. Chemistry. Hydrology. NATO ASI Series. Ser. C. V.211. P.1.
16. Colbeck S.C. //Water Resources Research. 1986. V.22. N 9. P.59.
17. Математический энциклопедический словарь. - М.: Советская энциклопедия, 1988. - 845 с.
18. Красс М.С., Мерзликин В.Г. Радиационная теплофизика снега и льда. - Л.:Гидрометеоиздат, 1990. - 260 с.
19. Кузьмин П.П. Физические свойства снежного покрова. - Л.: Гидрометеоиздат, 1957. - 179 с.
20. Asano S., Sato M. //J.Appl. Opt. 1980. V.19. N 6. P.962.
21. Коломыш Э.Г. Структура и режим снежной толщи западносибирской тайги. - Л.:Наука, 1971. - 174 с.

Московский педагогический
государственный университет
им. В. И. Ленина

Поступила в редакцию
14 июня 1991 г

QUASI-STATIC MODELS OF THE EFFECTIVE DIELECTRIC PERMITTIVITY
OF GEOPHYSICAL MEDIA TAKING INTO ACCOUNT
A SCATTERING BY INCLUSION PARTICLES

D. A. Boyarskij, N. I. Kliorin, V. G. Mirovskij, V. V. Tikhonov

In this paper an attempt is made to incorporate the scattering losses in the effective permittivity of the media consisting of the discrete scatterers immersed in a host material. The inclusion particles are assumed to be spherical. The results are applicable to general multiphase mixtures, and the scattering spheres of the different phases can have different size and size distribution. The results are applied to calculating the complex effective permittivity of wet snow. The prediction of the model seems to agree with the experimental data if the scattering losses and the distribution of liquid water in the pore space have been taken into account.