

Введение

В настоящее время все более актуальными становятся научные и практические задачи, связанные с исследованием и рациональным использованием природных ресурсов, контролем и охраной состояния природных сред, изучением процессов взаимного влияния атмосферы, океана и суши. Большое место в этих исследованиях занимает изучение твердой поверхности Земли. Информация о ее состоянии используется для решения обширного круга задач, связанных с изучением глобальных природных процессов, метеорологией, гидрологией, геологией, строительством, сельским хозяйством, экологией и т. п. [1].

Широкое применение в этих исследованиях находят методы дистанционного зондирования, позволяющие исследовать природную среду на расстоянии, без непосредственного контакта с ней. В основе этих методов лежит анализ собственного или рассеянного средой электромагнитного излучения. Регистрируемое приемной аппаратурой электромагнитное излучение содержит информацию о большинстве важных характеристиках среды. Для твердой земной поверхности (почвы, горные породы, пески, песчаники и т. п.) такими характеристиками являются: влажность, плотность, структурный и минеральный состав и т. д. Все они, в той или иной мере, оказывают влияние на процесс взаимодействия излучения со средой, поскольку определяют электродинамические свойства самой среды [2]. Особенно большие возможности для получения такого рода информации открывают микроволновые методы дистанционного зондирования [3]. Однако интерпретация микроволновых дистанционных данных сложна и неоднозначна, ввиду отсутствия эффективной теории взаимодействия электромагнитного излучения с гетерогенными средами. В настоящее время эта проблема, как правило, решается с помощью создания различных калибровочных соотношений между радиофизическими или диэлектри-

ческими характеристиками и физическими параметрами исследуемой среды, которые носят частный и региональный характер [2–4].

Таким образом, для решения практических задач дистанционного зондирования возникает необходимость дальнейшего экспериментального и теоретического исследования процессов взаимодействия микроволнового излучения с гетерогенными средами.

В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований коэффициента пропускания гетерогенной среды (песчаник) в диапазоне 0,05–0,3 см, а также рассмотрена возможность теоретического описания взаимодействия микроволнового излучения с такой средой.

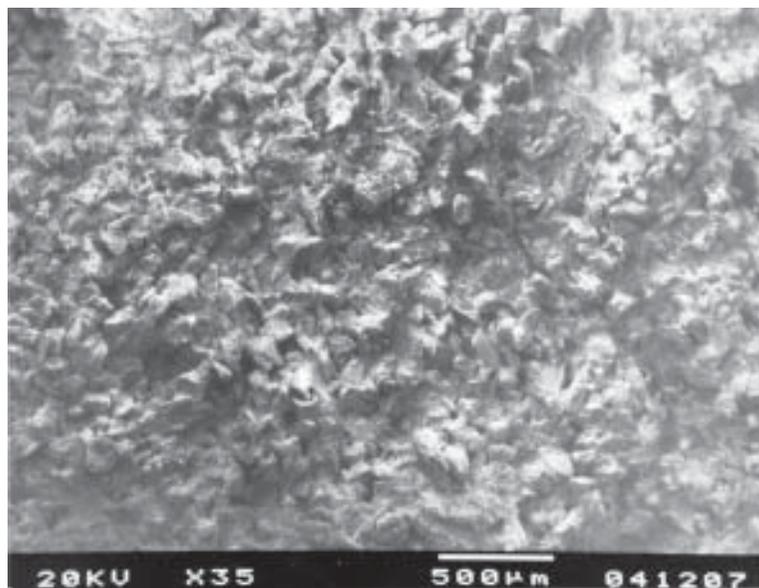


Рис. 1. Изображение материала образца песчаника, увеличение 350^x

Исследования проводились с кернами песчаника. Керны имели цилиндрическую форму с диаметром в основании 3 см и высотой 0,5–3 см, их плотность — в пределах от 1,6 до 2 г/см³. Перед проведением спектральных измерений коэффициента пропускания

кернов проводился анализ их структурных характеристик и химического состава. Фотоснимок поверхности керна песчаника, полученный на сканирующем электронном микроскопе JSMT-330 с увеличением 350^x, приведен на рис. 1. Для того чтобы исключить влияние влажности образцов при проведении измерений, образцы породы высушивались в муфельной печи при температуре 110 °С.

Анализ структурных характеристик и химического состава кернов песчаника

Анализ морфометрических характеристик кристаллитов кернов, а также их минерального состава проводился с помощью анализатора изображений «Видео-Мастер» и бинокля МБС-10. Основной принцип работы прибора — автоматическое выделение заданных объектов на анализируемом изображении и измерение их метрических параметров. Принципиальное устройство анализатора и упрощенная функциональная схема его работы приведены на рис. 2.

Изображение сцены, находящейся в поле зрения системы ввода, поступает на фокусирующую (оптическую) систему 1 и далее — на оптоэлектронный преобразователь 2 (ПЗС-матрицу), где происходит преобразование электромагнитного излучения в электрический видеосигнал. Сигнал поступает на блок аналого-цифрового преобразователя 3, где формируется окончательная совокупность сигналов цифрового изображения. Далее по кабельному вводу эта совокупность сигналов поступает в собственно анализатор изображений — на центральный процессор 4, который направляет полученные сигналы в видеопамять 5, где осуществляется окончательное формирование цифровой видеоматрицы исходного 256-градационного изображения. После формирования этого исходного изображения центральный процессор 4 осуществляет его обработку. По заданным яркостным характеристикам на исходном изображении выделяются объекты-участки, далее программа осуществляет измерение их метрических параметров и окончательную обработку результатов измерений. Все этапы обработки и анализа через системы ввода-вывода 6 могут быть выведены на дисплей 7 для контроля и коррекции процесса. После полученные резуль-

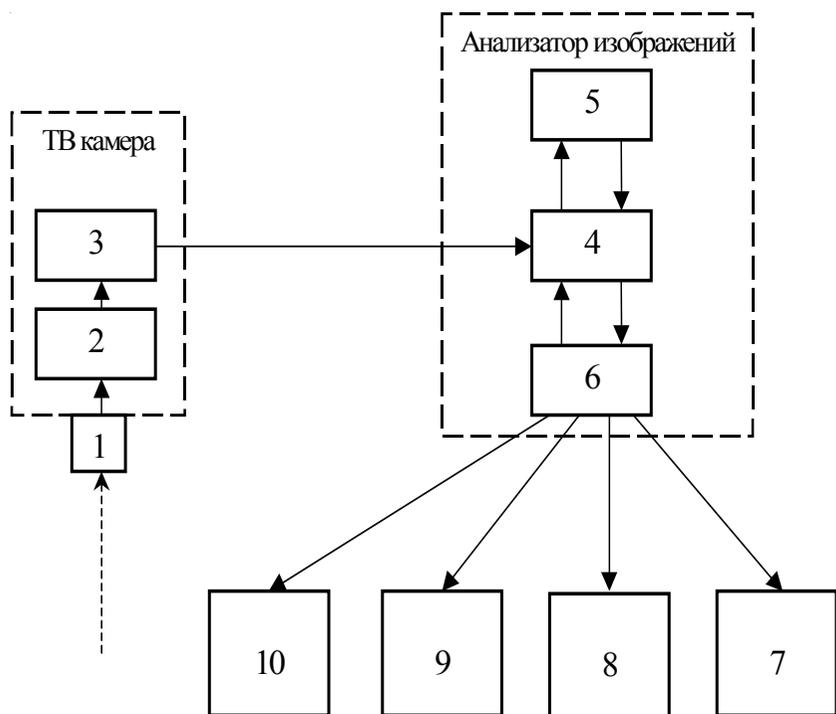


Рис. 2. Функциональная схема анализатора изображений «Видео-Мастер»:
 1 — фокусирующая (оптическая) система; 2 — детектор (ПЗС-матрица);
 3 — аналого-цифровой преобразователь (АЦП) сигнала; 4 — центральный процессор; 5 — видеопамять; 6 — системы ввода-вывода; 7 — дисплей;
 8 — клавиатура; 9 — магнитный носитель; 10 — принтер

таты через специальные блоки ввода-вывода информации 6 выводятся на дисплей 7, бумажный носитель (принтер 10) или магнитный носитель 9 в заданном формате (таблицы, графики, распечатки изображений, файлы записи данных).

Для определения морфометрических характеристик кристаллитов кернов, а также их минерального состава были приготовлены минералогические препараты — шлифы с покровными стеклами. Для получения границ кристаллитов съемка изображений производилась в поляризованном свете, при скрещенных николях. На полученных изображениях (рис. 3) операторами черно-

белых изображений были выделены границы зерен. Затем с помощью яркостной сегментации последовательно выделялись участки определенной яркости, соответствующие отдельным кристаллитам. В заключение производились обсчет морфометрических параметров выделенных объектов и статистическая обработка результатов. По результатам обработки были построены гистограммы распределения размеров кристаллитов, образующих керны (рис. 4). Необходимо отметить, что по своему гранулометрическому составу имевшиеся образцы песчаников приблизительно идентичны. Помимо этого был проведен анализ и построены гистограммы распределения кристаллитов по значению удлиненности (отношение длины кристаллита к ширине) — рис. 5, и по значению фактора формы (отношение площади кристаллита по внешнему контуру к площади круга с равновеликим периметром) — рис. 6. Исходя из этих данных был сделан вывод, что форма большинства кристаллитов, слагающих исследуемые образцы, приближается к сфероидальной.

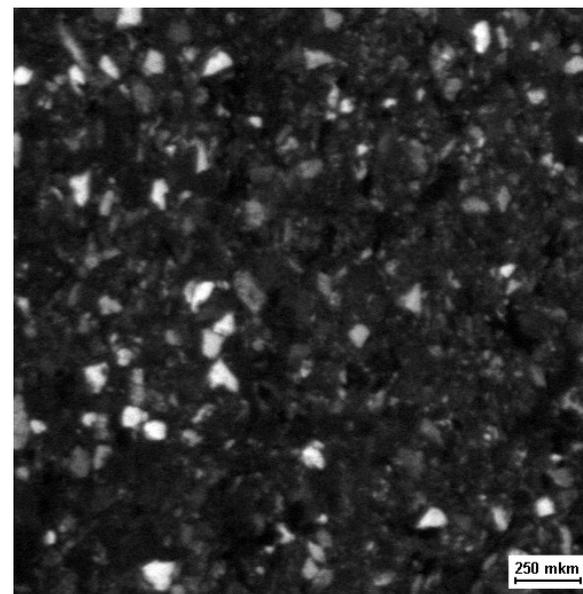


Рис. 3. Изображение материала образца под бинокляром в поляризованном свете

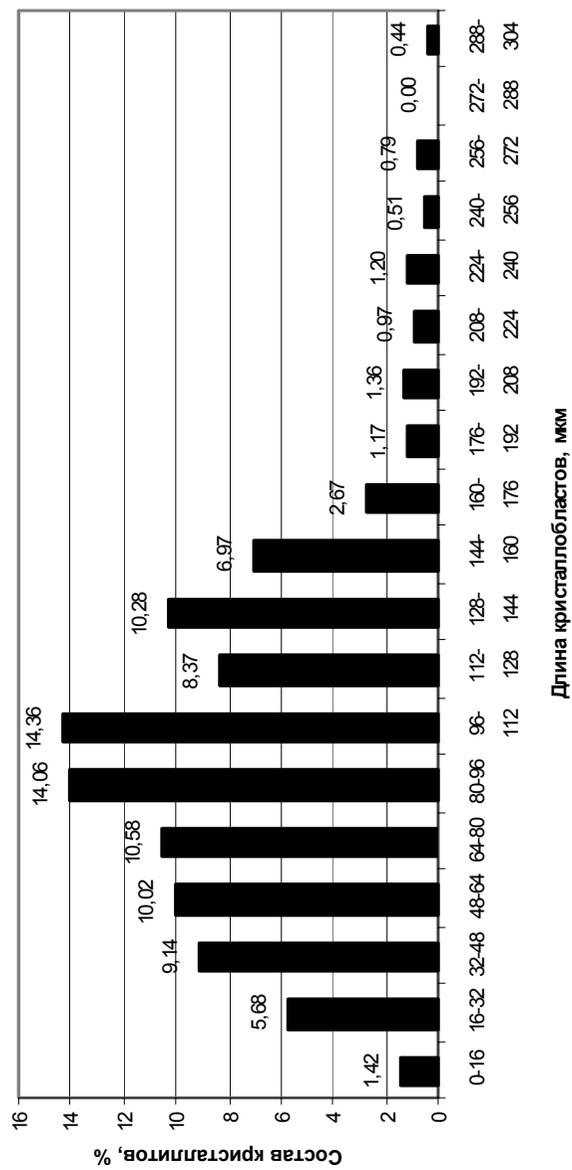


Рис. 4. Гистограмма распределения кристаллитов по размеру

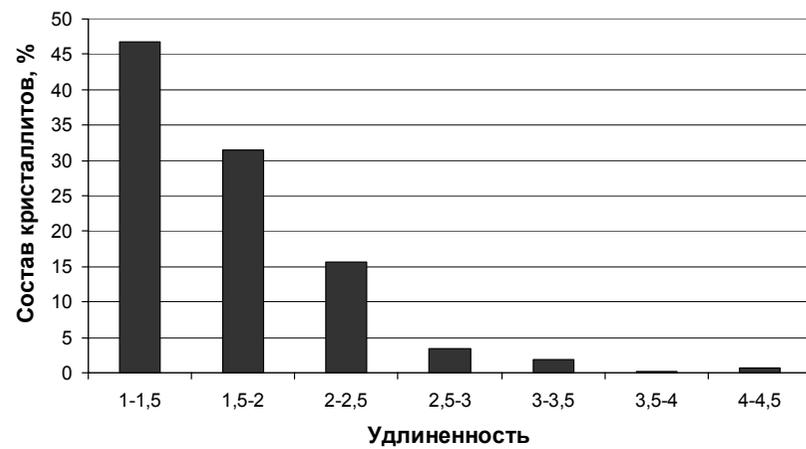


Рис. 5. Гистограмма распределения кристаллитов по значению удлиненности

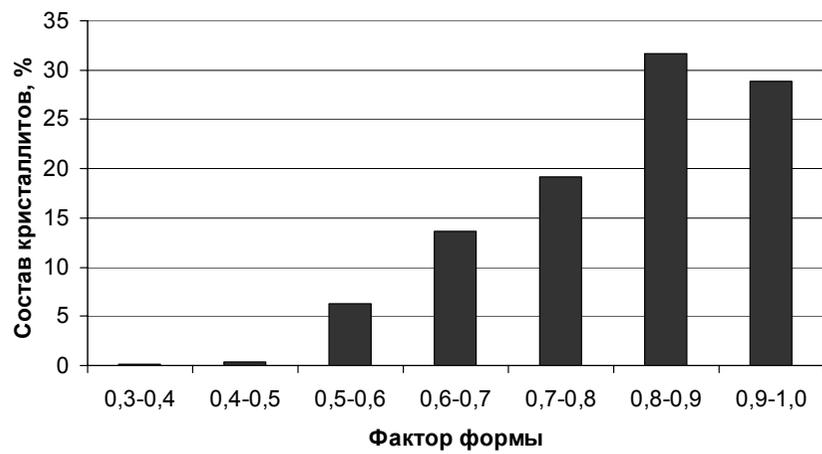


Рис. 6. Гистограмма распределения кристаллитов по значению фактора формы

Оценка минерального состава кернов показала, что они сходны между собой и на 80–85% состоят из кварца и полевого шпата. Типичный минеральный состав исследуемых образцов представлен в таблице.

Типичный минеральный состав кернов песчаника

Минерал	Содержание, %
Кварц	55
Полевой шпат	30
Слюды (серицит)	8
Пирит	7

Измерение коэффициента пропускания

В соответствии с полученными гистограммами размеров кристаллитов кернов (см. рис. 4), для спектральных измерений коэффициента пропускания был выбран субмиллиметровый диапазон длин волн. В этом диапазоне коэффициент пропускания должен иметь ярко выраженную спектральную зависимость, так как размеры кристаллитов становятся сравнимы с длиной волны излучения. Для измерения коэффициента пропускания образца в субмиллиметровом диапазоне длин волн использовался субмиллиметровый спектрометр, собранный на лампах обратной волны — ЛОВ (рис. 7).

Электромагнитное излучение от лампы обратной волны распространялось в свободном пространстве и фокусировалось при помощи линзы на приемник — ячейку Галлея (приемный элемент оптико-акустического преобразователя — ОАП). Излучение модулировалось механическим прерывателем с частотой 20 Гц. ОАП измерял в режиме синхронного детектирования. Измерение пропускания производилось следующим образом: сначала измерялся сигнал излучения ЛОВ U_1 , затем перед модулятором ставилась кассета с образцом и снова измеряется сигнал U_2 . Коэффициент пропускания определялся как:

$$P = \frac{U_2}{U_1}. \quad (1)$$

Измерения проводились в диапазоне длин волн $\lambda = 0,05 \div 0,3$ см. В эксперименте удавалось измерять значения P от 10^{-11} до 1.

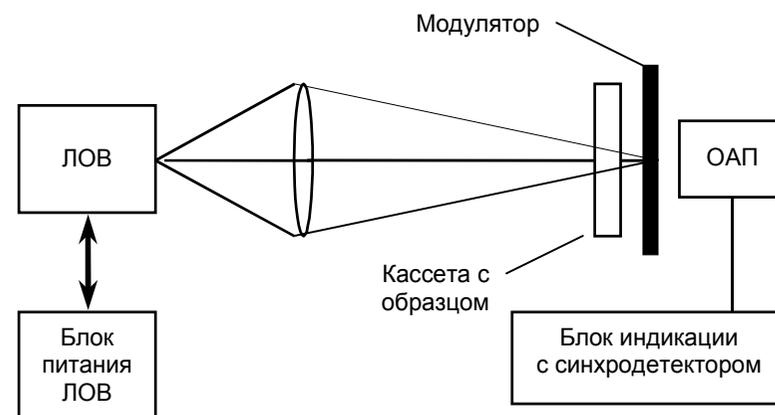


Рис. 7. Блок-схема субмиллиметрового спектрометра

Электродинамическая модель спектральной зависимости коэффициента пропускания песчаника

Для построения электродинамической модели коэффициента пропускания слоя гетерогенной среды была рассмотрена следующая задача.

Пусть на плоскопараллельный слой вещества, находящийся в вакууме, под углом $\theta = 0^\circ$, падает плоская электромагнитная волна с интенсивностью I_0 . Тогда интенсивность излучения, прошедшего сквозь слой, определяется следующим соотношением [5,6]:

$$I = TS^2 I_0, \quad (2)$$

где T — коэффициент пропускания слоя, S — потери излучения из-за шероховатости границ. Тогда, в соответствии с (2), коэффициент пропускания слоя вещества P с учетом шероховатости на границах будет:

$$P = TS^2. \quad (3)$$

Потери излучения, связанные с шероховатостью границ слоя, рассчитывались по модели, предложенной в [5]:

$$S = \exp\left(- (2ks)^2\right), \quad (4)$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, s — среднеквадратичное отклонение шероховатостей на границах образца.

Согласно [6] коэффициент пропускания слоя вещества с учетом многократного отражения на границах для случая нормального падения излучения, имеет вид:

$$T = \frac{\left(1 - 2\operatorname{Re}(r^2) + |r^2|^2\right)\exp(-\tau n'')}{1 - 2|r^2|\exp(-\tau n'')\sin\left(\tau n' + \operatorname{arctg}\left(\frac{\operatorname{Re}(r^2)}{-\operatorname{Im}(r^2)}\right)\right) + |r^2|^2\exp(-2\tau n'')}, \quad (5)$$

где $r = \frac{1 - \hat{n}}{1 + \hat{n}}$, $\tau = \frac{4\pi}{\lambda}h$, h — толщина слоя, $\hat{n} = n' + jn''$ — комплексный показатель преломления вещества.

Для определения T из выражения (5) необходимо знать комплексный показатель преломления вещества, образующего слой, который можно найти из следующих выражений:

$$\begin{cases} n' = \operatorname{Re}\left(\sqrt{\varepsilon_{\text{эф}}}\right) \\ n'' = \operatorname{Im}\left(\sqrt{\varepsilon_{\text{эф}}}\right), \end{cases} \quad (6)$$

где n' , n'' — действительная и мнимая части показателя преломления вещества, а $\varepsilon_{\text{эф}}$ — эффективная диэлектрическая проницаемость вещества.

В выбранном диапазоне измерений дифракционный параметр кристаллитов песчаника имеет величину $\sim 0,1-1,0$. Величина дифракционного параметра показывает, что при описании распространения электромагнитного излучения в песчанике необходимо учитывать рассеяние излучения на структурных неоднородностях (частицах) среды [7]. Для нахождения эффективной диэлектрической проницаемости песчаника была использована модель эффективной диэлектрической проницаемости среды, состоящей из дискретных рассеивателей, предложенная в [8–10]. Согласно этой модели, исследуемая среда представляется смесью сферических частиц N разных фракций, имеющих комплексную диэлектрическую проницаемость ε_j , находящихся в сплошной среде с комплексной диэлектрической проницаемостью ε_0 . Эффективная диэлектрическая проницаемость такой среды, согласно этой модели и [8–10], определяется из следующего выражения:

$$\varepsilon_{\text{эф}} = \varepsilon_0 \left(1 - \sum_{j=1}^N \frac{4\pi n_j (\varepsilon_j + 2\varepsilon_0) \langle f_{\omega} \rangle_j}{k^2} \right)^{-1}, \quad (7)$$

где n_j — концентрация частиц j -й фракции, а $\langle f_{\omega} \rangle_j$ — усредненная по размерам частиц амплитуда рассеяния вперед частицы j -й фракции, рассчитанная по теории Ми [4, 6, 7].

Для дисперсных природных сред, таких как снег и почвогрунты, типичным распределением размеров частиц является логарифмически-нормальное распределение [11, 12]. Функция логарифмически-нормального распределения имеет следующий вид:

$$\varphi(d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma d} \exp\left(-\frac{(\ln(d)-a)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (8)$$

где $-\infty < a < +\infty$, $\sigma^2 > 0$ — параметры, представляющие собой первый и второй моменты распределения $\ln(d)$. Параметры a и σ можно связать со средним диаметром частиц $\langle d \rangle$ и относительной дисперсией их размеров D , выраженной в долях, следующим образом [12]:

$$\begin{cases} a = \ln(\langle d \rangle) - \frac{\sigma^2}{2} \\ \sigma = [\ln(1 + D^2)]^{1/2}. \end{cases} \quad (9)$$

Поскольку величина логарифмически нормальной функции быстро спадает при удалении аргумента от среднего значения (график функции имеет колоколообразный вид), пределы интегрирования при усреднении f_ω можно записать от 0 до $+\infty$:

$$\langle f_\omega \rangle = \int_0^{+\infty} f_\omega \varphi(d) dd. \quad (10)$$

Как уже отмечалось выше, минеральный состав исследуемых песчаников практически идентичен (85 % кварца и полевого шпата) (см. таблицу). Диэлектрические характеристики этих минералов в рассматриваемом диапазоне длин волн (0,05–0,3 см) схожи между собой [13, 14]. Помимо кварца и полевого шпата (см. таблицу), исследуемые образцы породы на 15 % состоят из слюды, а также сульфидов (пирит) и гидроксидов. Их диэлектрические свойства также схожи между собой, однако значительно отличаются от диэлектрических свойств кварца и полевого шпата [13, 14]. В соответствии с этим, а также следуя [8–10], среда песчаников моделировалась как смесь сферических частиц двух фракций — кварца и слюды, находящихся в воздухе. Эффективная диэлектрическая проницаемость такой среды, согласно (7), запишется в следующем виде:

$$\varepsilon_{эф}^{-1} = 1 - \frac{4\pi n_1(\varepsilon_1 + 2) \frac{\langle f_\omega \rangle_1}{k^2}}{2\varepsilon_{эф} + \varepsilon_1} - \frac{4\pi n_2(\varepsilon_2 + 2) \frac{\langle f_\omega \rangle_2}{k^2}}{2\varepsilon_{эф} + \varepsilon_2}, \quad (11)$$

где n_1 и n_2 — концентрации частиц двух фракций: кварца и слюды; ε^1 и ε^2 — диэлектрические проницаемости частиц кварца и слюды; $\langle f_\omega \rangle_1$ и $\langle f_\omega \rangle_2$ — усредненные по размерам частиц амплитуды рассеяния вперед частицы кварца и слюды, рассчитанные по теории Ми [4, 6, 7].

В предлагаемой модели среда представляется смесью сферических частиц, однако приведенные выше исследования структуры кернов песчаников показали, что большинство частиц имеет форму отличную от сферической. Как показано в [7], несферические частицы вблизи направления вперед рассеивают излучение аналогично шарам равного сечения. В соответствии с этим, распределения размеров кристаллитов кернов (см. рис. 4) пересчитывались в распределения для сферических частиц. Пересчет производился на основе данных значений удлиненности (см. рис. 5) и фактора формы (см. рис. 6) кристаллитов песчаника. Одна из пересчитанных гистограмм представлена на рис. 8. Там же построена логарифмически нормальная зависимость по которой проводились усреднения параметров модели. Средний диаметр частиц и их дисперсия в логарифмически-нормальном распределении брались в соответствии с полученными гистограммами. Как видно из рис. 8 логарифмически нормальное распределение с такими параметрами хорошо аппроксимирует пересчитанную гистограмму.

Рассчитанные по предложенной модели значения коэффициента пропускания кернов песчаника сопоставлялись с данными, полученными в ходе эксперимента. Как видно из рис. 9, теоретическая зависимость хорошо соответствует экспериментальным данным. При вычислениях использовались реальные структурные параметры песчаников.

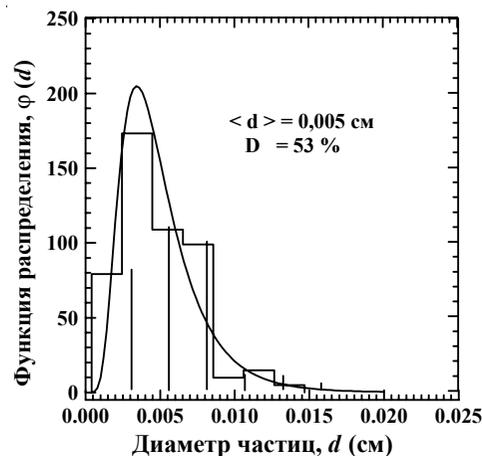


Рис. 8. Гистограмма и логарифмически нормальная функция распределения размеров частиц образца песчаника

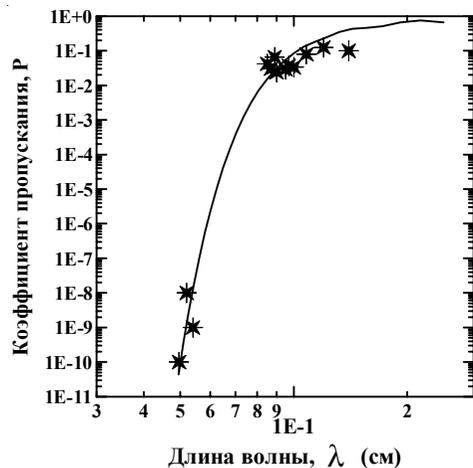


Рис. 9. Экспериментальная (*) и рассчитанная по модели частотные зависимости коэффициента пропускания исследуемого образца

Заключение

Проведенные расчеты коэффициента пропускания кернов песчаника, на основе предложенной модели, хорошо согласуются с экспериментальными данными в рассмотренном диапазоне длин волн. Это согласие было достигнуто благодаря учету в модели структурных особенностей среды и эффектов рассеяния электромагнитного излучения на частицах среды.

Таким образом, предложенная модель $\epsilon_{эф}$, может быть использована для описания распространения электромагнитного излучения в гетерогенных средах, а также для интерпретации данных дистанционного зондирования природных дисперсных сред.

Авторы благодарны Н.Ю. Комаровой за помощь при оформлении работы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ — гранты № 01-02-16055, № 02-02-16119, № 03-05-64374.

Литература

1. Антонов В.В., Арманд Н.А., Бобылев Л.П. и др. Космические исследования Земли как экологической системы и воздействие человека на эту систему (программа ЭКОС: Версия 2). Препринт ИКИ РАН. Пр-1907. М., 1995. 72 с.
2. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли. М.: Мир, 1988, 352 с.
3. Шутко А.М. СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. М.: Наука, 1986. 189с.
4. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. М.: Мир, 1981. 597 с.
5. Choudhury B.J., Schmugge T.J., Chang A., Newton R.W. Effect of Surface Roughness on the Microwave Emission From Soils // J. of Geophys. Research. 1979. V. 84. N. C9. P. 5699–5706.
6. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
7. Борн К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986. 664 с.

8. *Боярский Д.А., Тихонов В.В.* Модель эффективной диэлектрической проницаемости влажных и мерзлых почв в сверхвысоко-частотном диапазоне // Радиотехника и электроника. 1995. Т. 40. № 6. С. 914–917.

9. *Boyarskii D.A., Tikhonov V.V., Kleorin N.I., Mirovskii V.G.* Inclusion of scattering losses in the models of the effective permittivity of dielectric mixtures and applications to wet snow // J. of Electromagnetic Waves and Applications. 1994. V. 8. N. 11. P. 1395–1410.

10. *Boyarskii D.A., Tikhonov V.V., Komarova N.Yu.* Model of Dielectric Constant of Bound Water in Soil for Applications of Microwave Remote Sensing // Progress In Electromagnetics Research, PIER 35. 2001. P. 251–270.

11. Геологический словарь. М.: Недра, 1978. 942 с.

12. Математический энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия, 1988. 845 с.

13. Справочник физических констант горных пород / Под ред. С. Кларка. М.: Мир, 1969. 544 с.

14. *Золотарев В.М., Морозов В.Н., Смирнова Е.В.* Оптические постоянные природных и технических сред. Л.: Химия, 1984. 243 с.

Содержание

Введение	1
Анализ структурных характеристик и химического состава кернов песчаника	3
Измерение коэффициента пропускания	8
Электродинамическая модель спектральной зависимости коэффи- циента пропускания песчаника	9
Заключение	15
Литература	15