

Влияние размеров и формы частиц влажных кварцевых порошков и песчано-глинистых смесей на процессы диэлектрической релаксации в диапазоне частот 10 кГц -20 ГГц.

Бобров Павел Петрович^{1,2}, Крошка Елена Сергеевна^{1,2}, Родионова Ольга Васильевна¹

¹Научно-исследовательская лаборатория диэлькометрии и петрофизики ОмГПУ

²ИРФЭ ОНЦ СО РАН

Метод диэлектрической спектроскопии обладает высокими потенциальными возможностями при исследовании свойств пород, содержащих воду или углеводороды [1]. На комплексную диэлектрическую проницаемость песков и песчаных почв в широком частотном диапазоне влияют размеры частиц, соленость и доля насыщающего образец раствора [2], [3].

Влияние формы частиц ранее исследовалось при рассмотрении моделей диэлектрических смесей, справедливых, как показали наши исследования [4], только на частотах выше 1–3 ГГц.

Целью работы является установление связи КДП образцов с размером и формой частиц в диапазоне частот от 10 кГц до 20 ГГц.

[1] Энос М. И., Бобров П. П., Мирное В. Л., Ренин А. В. // *Геология и геофизика*. 2011. Т. 52. № 9. С. 1302.
[2] Bobrov P. P., Bebueva T. A., Kroska E. S., Rodionova O. Y. // *Eurasian Soil Science*. 2019. Vol. 52. № 7. P. 822.
[3] Bobrov P. P., Bebueva T. A., Kroska E. S. // *J. Appl. Geophys.* 2018. Vol. 159. P. 616.
[4] Bobrov P. P., Bebueva T. A., Kroska E. S., Rodionova O. Y. // *Техника радиосвязи*. 2021. Вып. 1 (48). С. 95.

Были исследованы:

- порошки кварцевых гранул почти сферической формы (образец № 1)
- речной песок (образец № 2)
- порошки кварцевых гранул обломочной формы (образец № 3)

Таблица 1. Размеры частиц исследованных фракций образцов.

Образцы	Размеры частиц, мкм							
	220-300	150-180	90-100	74-90	63-74	45-63	30-45	2-9
№ 1	+	+	+	+	+	+	+	+
№ 2			+	+	+	+	+	
№ 3	+	+	+	+	+	+		

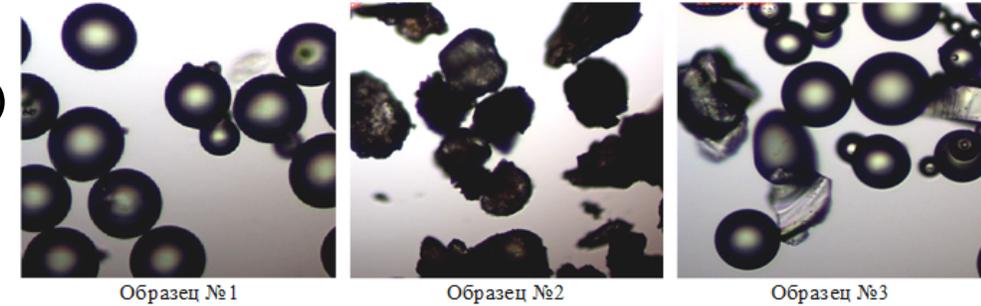


Рис. 1. Форма исследуемых образцов

- песок и порошки кварцевых гранул при добавлении небольшого количества бентонитовой глины (5% и 10% по массе)

Таблица 2. Физические характеристики образцов песчано-глинистых смесей.

№	Состав песчаной фракции	Средний размер частиц, мкм	Массовая доля глины 5%		Массовая доля глины 10%	
			Плотность сухого сложения, г/см ³	Пористость	Плотность сухого сложения, г/см ³	Пористость
2.1	Фракция песка	130±18	1.35-1.48	0.43-0.48	1.22-1.42	0.45-0.53
2.2	Кварцевые гранулы 70-110	118 ± 12	1.27-1.37	0.47-0.51	1.37-1.44	0.47-0.45
2.3	Кварцевые гранулы 0-20	5.3 ± 0.5	1.12-1.32	0.49-0.54	1.20-1.27	0.51-0.54

Анализатор импеданса
E4990A
Keysight Technologies

Векторный измеритель
параметров цепей ZNB20
Rohde & Schwarz

Измерение комплексного импеданса

Измерение комплексного коэффициента передачи

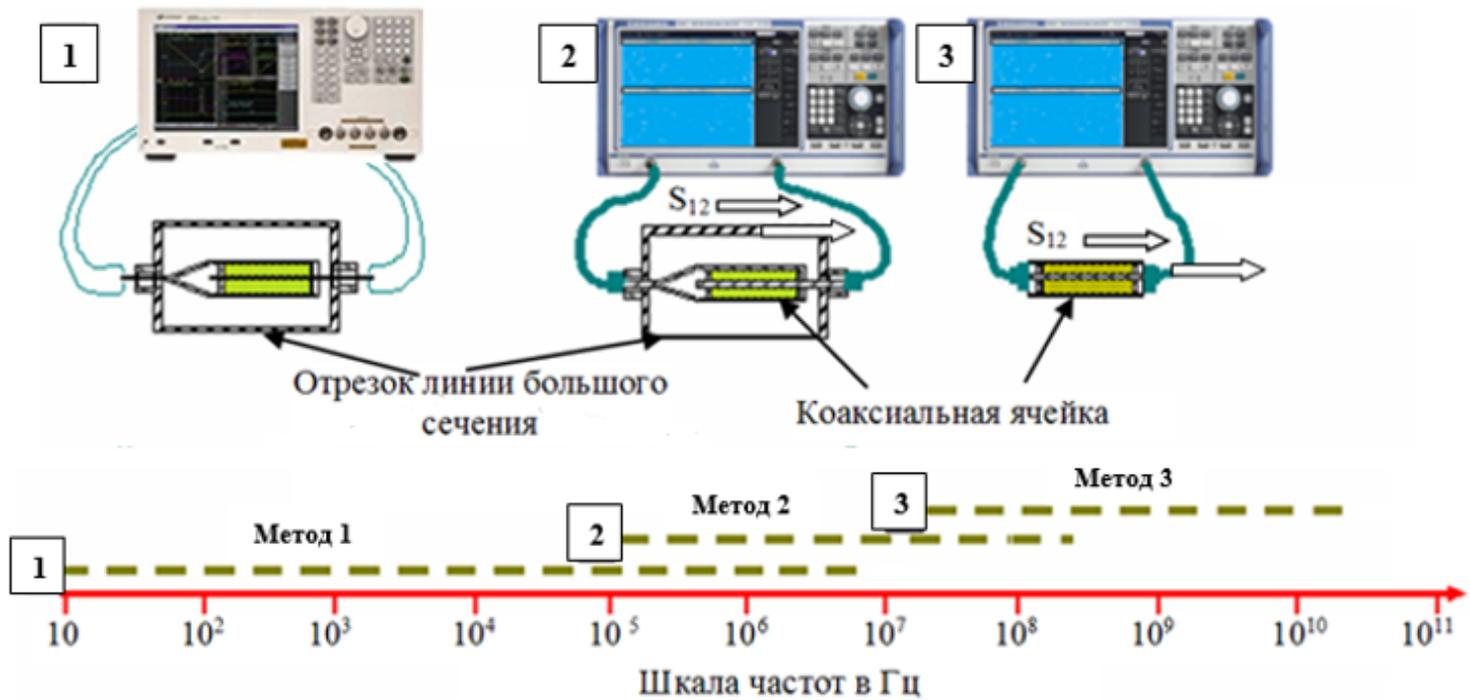
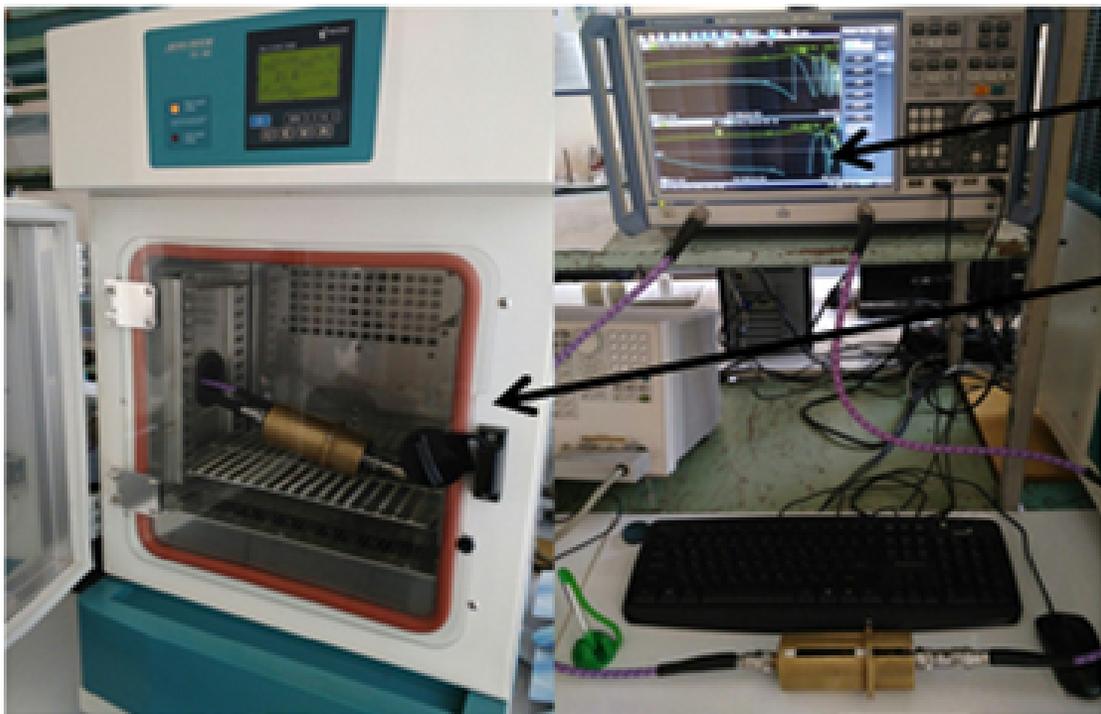


Рис. 2. Схема измерений в широкой полосе частот



1

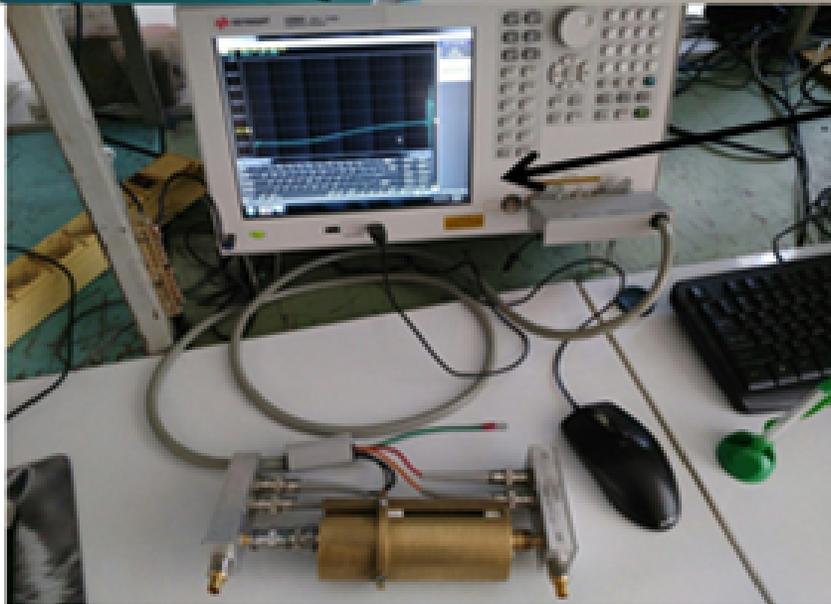
2

Рис. 3. Вид экспериментальной установки и измерительной ячейки.

1 – измеритель параметров цепей ZNB20;

2 – климатическая камера TH-ME-25;

3 – анализатор импеданса E4990A от 20 Гц до 10МГц Keysight Technologies.



3



На частотах ниже 1 ГГц КДП образцов можно описать тремя релаксационными процессами, обусловленными эффектами Максвелла-Вагнера. Как показала практика, низкочастотный и высокочастотный процессы можно моделировать формулой Дебая, а среднечастотный – формулой Коула-Коула.

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - i\varepsilon'' = \varepsilon_{BC}^* + \frac{\Delta\varepsilon_{S1}}{1 + (i\omega\tau_1)} + \frac{\Delta\varepsilon_{S2}}{1 + (i\omega\tau_2)^{(1-\alpha_2)}} + \frac{\Delta\varepsilon_{S3}}{1 + (i\omega\tau_3)} - i \frac{\sigma_0}{\omega\varepsilon_0}$$

где ε_{BC}^* – высокочастотная КДП образца (на частотах выше 1 ГГц, где релаксационные процессы в песчаных породах практически не влияют на КДП), определяемая по рефракционной модели смеси;

$\Delta\varepsilon_{S1}$, $\Delta\varepsilon_{S2}$ и $\Delta\varepsilon_{S3}$ – интенсивности (в зарубежной литературе используют термин strengths) первого, второго и третьего релаксационных процессов, соответственно;

τ_1 , τ_2 и τ_3 – времена релаксации;

α_2 – коэффициент распределения времен релаксации второго релаксационного процесса;

$\omega = 2\pi f$, где f – частота;

σ_0 – низкочастотная удельная проводимость образца почвы, $\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая постоянная; $i^2 = -1$.

Результаты диэлектрических измерений.

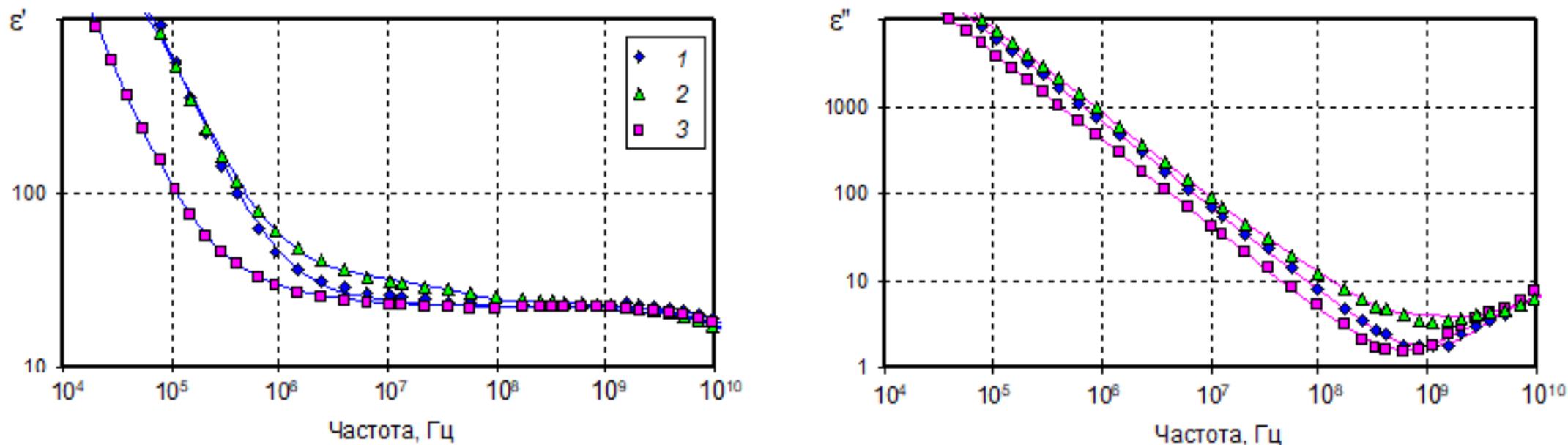


Рис. 4. Частотные зависимости КДП образцов с размерами частиц 63-74 мкм при насыщении солевым раствором с УЭП 0,1 См/м.

Значения объёмной доли раствора в образцах: №1 – 0,356; №2 – 0,368; №3 – 0,367.

Значения плотности в г/см³: №1 – 1,47; №2 – 1,29; №3 – 1,47

- порошки кварцевых гранул почти сферической формы (образец № 1)
- речной песок (образец № 2)
- порошки кварцевых гранул обломочной формы (образец № 3)

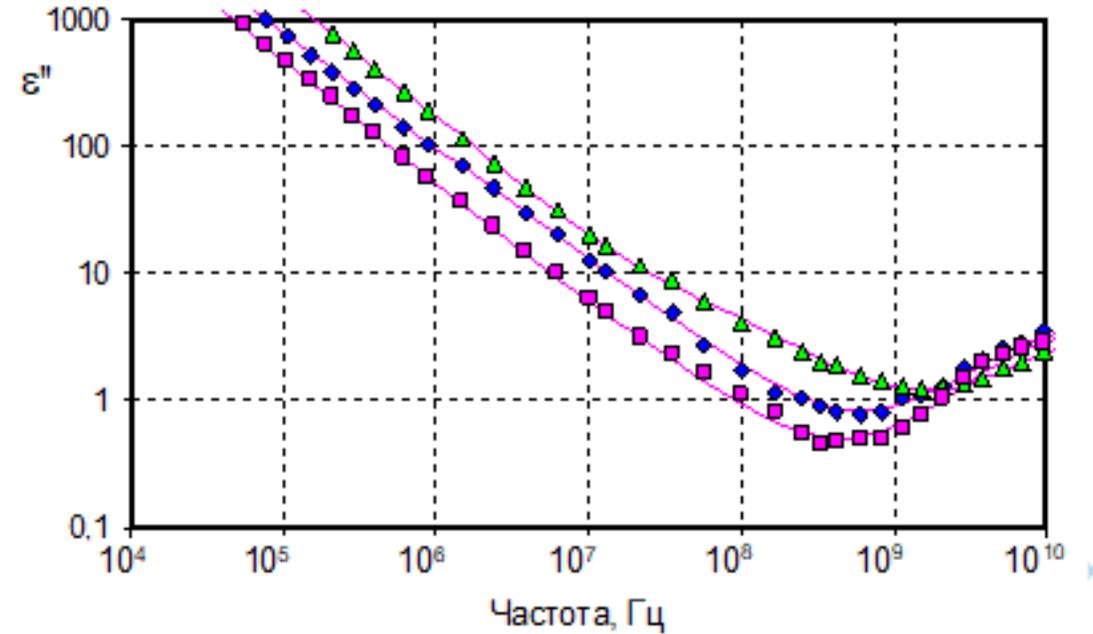
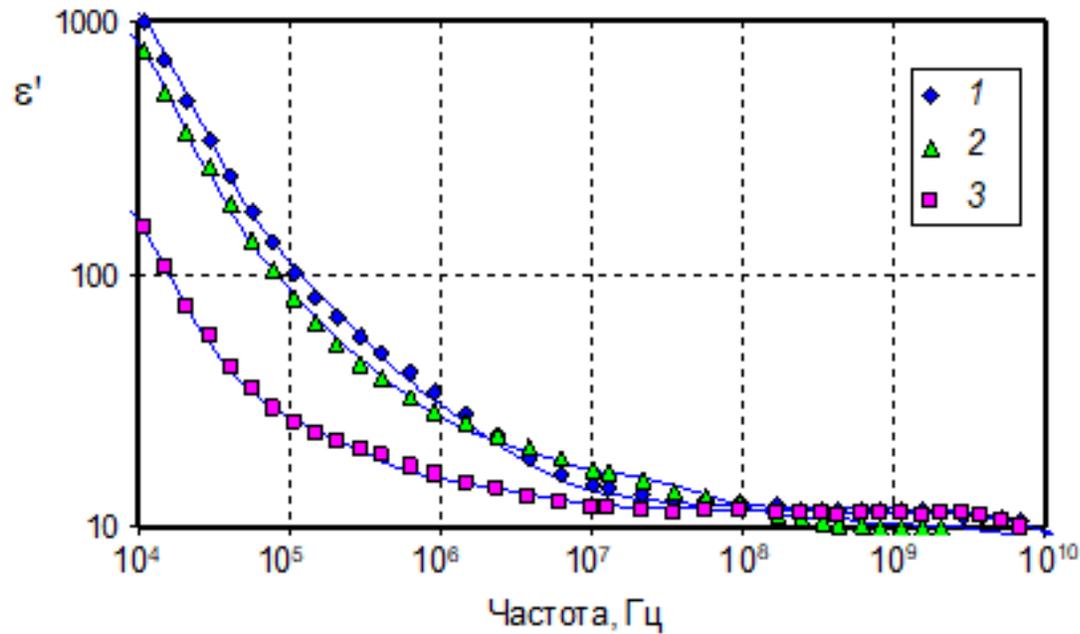
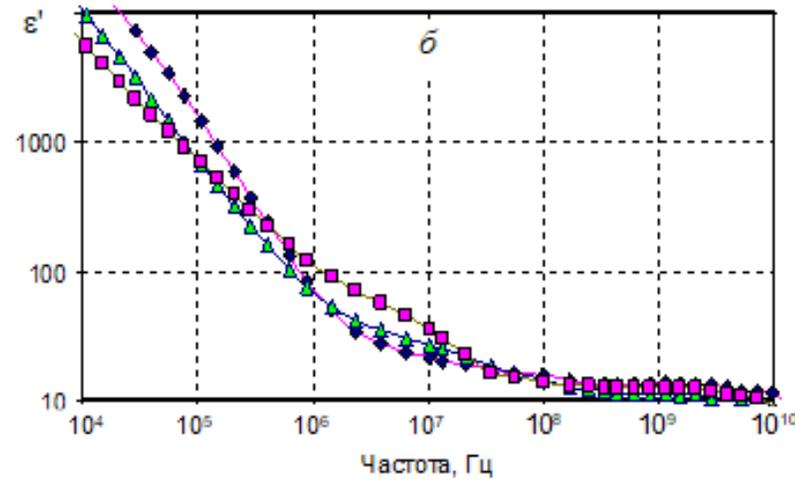
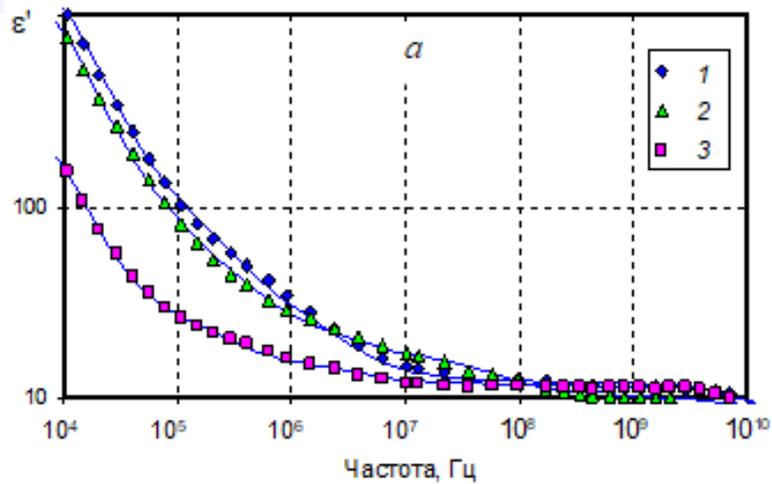


Рис. 5. Частотные зависимости КДП образцов с размерами частиц 63-74 мкм при насыщении солевым раствором с УЭП 0,1 См/м.

Значения объёмной доли раствора в образцах: №1 – 0,193; №2 – 0,190; №3 – 0,196.

Значения плотности в г/см³: №1 – 1,41; №2 – 1,45; №3 – 1,42

- порошки кварцевых гранул почти сферической формы (образец № 1)
- речной песок (образец № 2)
- порошки кварцевых гранул обломочной формы (образец № 3)



- порошки кварцевых гранул почти сферической формы (образец № 1)
- речной песок (образец № 2)
- порошки кварцевых гранул обломочной формы (образец № 3)

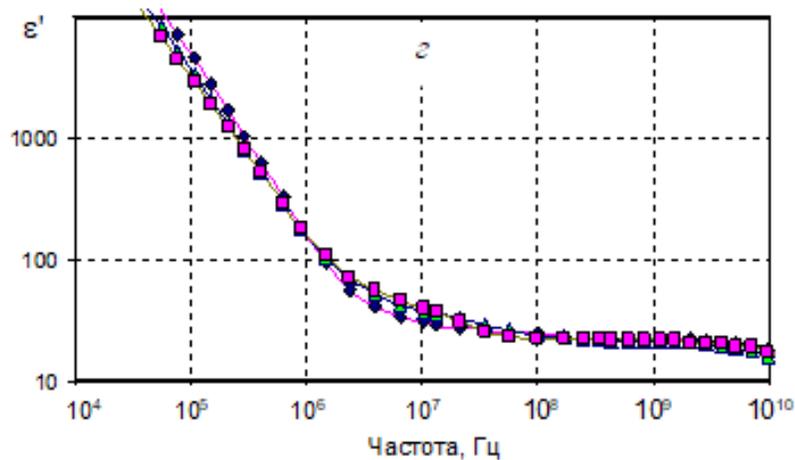
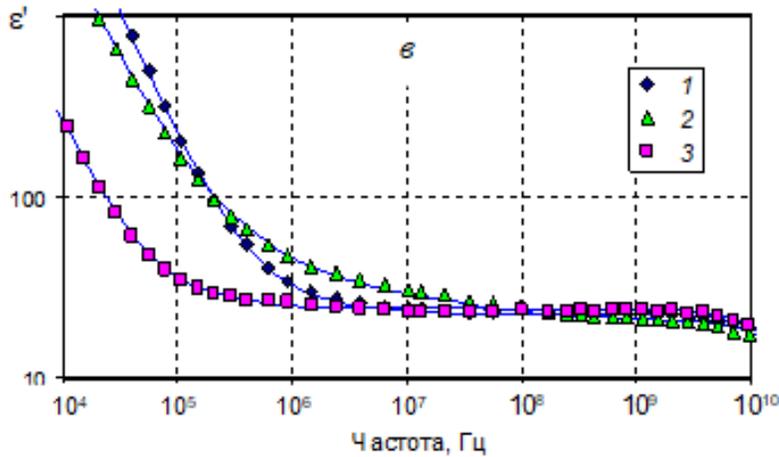


Рис. 6. Частотные зависимости действительной части ε' КДП образцов с размерами частиц 63-74 мкм при насыщении:

- (а) дистиллированной водой (б) раствором с УЭП 0,77 См/м (доля раствора 0,190-0,212)
 (в) дистиллированная вода (г) раствор соли с УЭП 0,77 См/м (доля раствора 0,347-0,368)

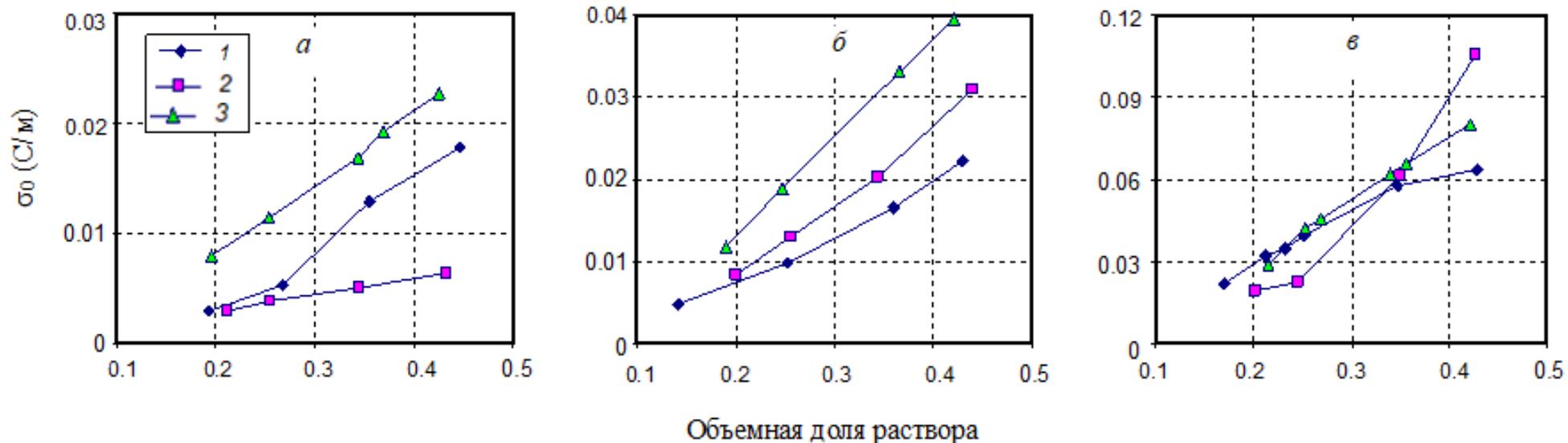


Рис. 7. Удельная электропроводность образцов №1, №2, №3 с размером частиц 63-74 мкм при насыщении раствором с УЭП:

(а) - 0,001 См/м (дистиллированная вода);

(б) - 0,1 См/м;

(в) - 0,77 См/м.

- кварцевые гранулы почти сферической формы (образец № 1)
- порошки кварцевые гранулы обломочной формы (образец № 2)
- речной песок (образец № 3)

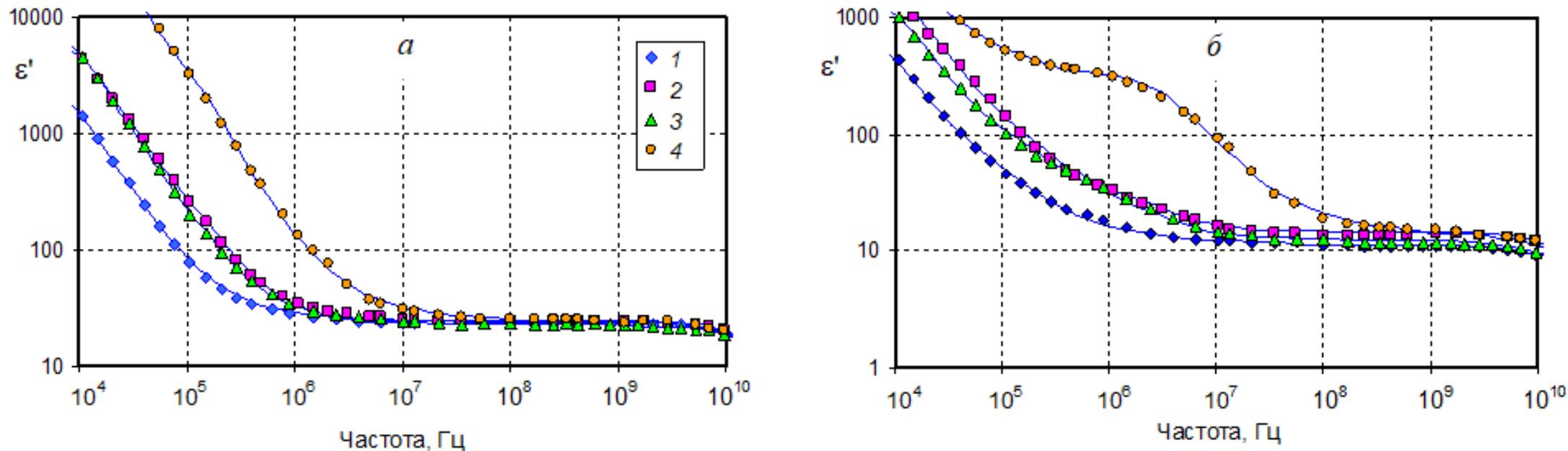


Рис. 8. Частотные зависимости действительной части КДП образца № 1 (кварцевые гранулы почти сферической формы) с разными размерами частиц при насыщении дистиллированной водой в объемных долях:

(а) 0,347–0,359

(б) 0,192–0,206

Размеры частиц в мкм: 1 – 150-180; 2 – 90-100; 3 – 63-74; 4 – 2-9

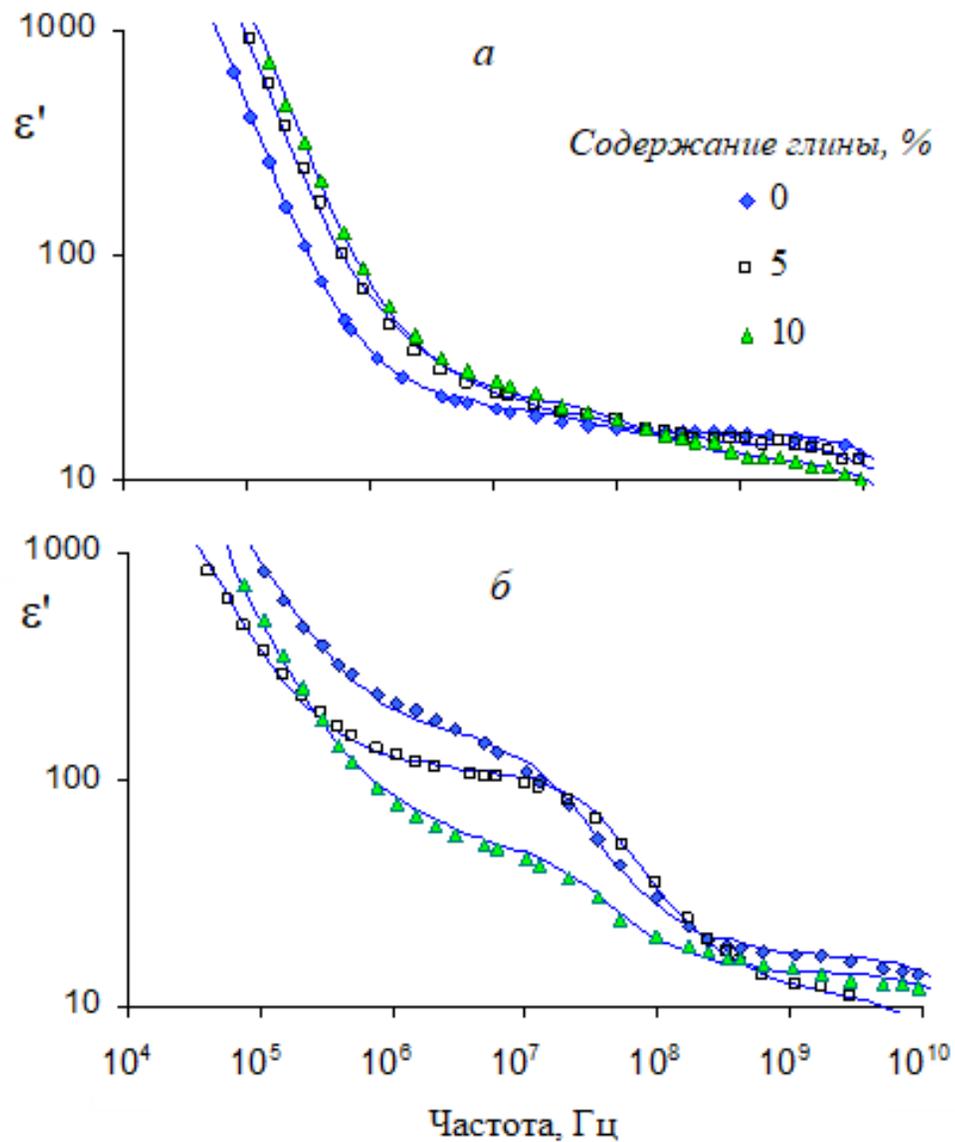


Рис. 9. Частотные зависимости действительной части ϵ' КДП образцов при насыщении раствором с УЭП 0,212 См/м.

(а) 2.1 песок со средним размером 130 мкм
 (б) 2.3 кварцевые гранулы 0-20 со средним размером 5,3 мкм

Доля солевого раствора 0,257-0,265

Выводы

- Показано, что форма частиц влияет на КДП в низкочастотной части диапазона только при небольшой доле раствора и слабой его концентрации. При полном насыщении образцов раствором и его высокой концентрации, а также во всех случаях на частотах выше 100 МГц влияние формы частиц невелико.
- В среднечастотной части диапазона (от единиц до десятков мегагерц) в образце кварцевых гранул с мелкими частицами наблюдается сильный релаксационный процесс, приводящий к значительному возрастанию действительной части КДП. Более слабое возрастание наблюдается в образцах песка с более крупными частицами.
- В высокочастотном диапазоне влияние формы и размеров частиц проявляется очень слабо.
- Добавление глины к песчаной фракции приводит к увеличению значений ε' на низких частотах, а на высоких – к их уменьшению. В образцах с крупными размерами частиц приводит к небольшому возрастанию интенсивности третьего релаксационного процесса. Добавление глины к песчаной фракции с мелкими частицами, наоборот, приводит к уменьшению интенсивности третьего релаксационного процесса.



Спасибо за внимание!

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК:

- [1] Эпов М. И., Бобров П. П., Миронов В. Л., Репин А. В. // Геология и геофизика, 2011. Т. 52. № 9. С. 1302.
- [2] Bobrov P. P., Belyaeva T. A., Kroshka E. S., Rodionova O. V. // Eurasian Soil Science. 2019. Vol. 52. №. 7. P. 822.
- [3] Bobrov P. P., Belyaeva T. A., Kroshka E. S. // J. Appl. Geophys. 2018. Vol. 159. P. 616.
- [4] Bobrov P. P., Belyaeva T. A., Kroshka E. S., Rodionova O. V. // Техника радиосвязи. 2021. Вып. 1 (48). С. 95.
- [5] Bobrov P. P., Repin A. V., Rodionova O. V. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2015. Vol. 53. № 5. P. 2366.