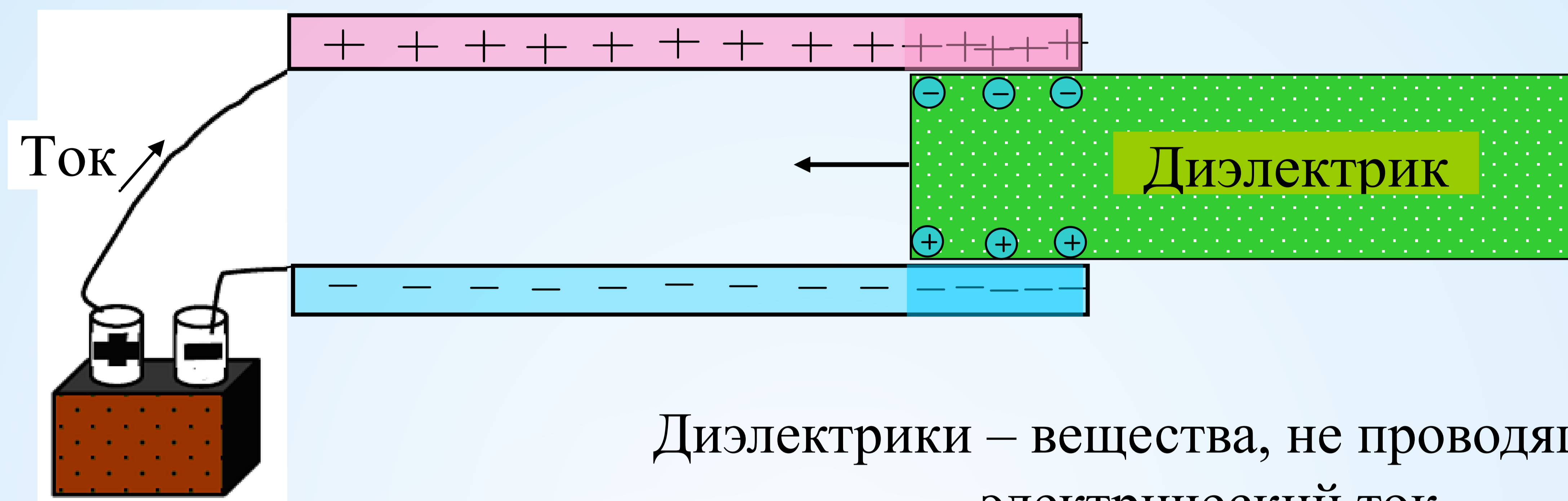


# Диэлектрическая релаксация во влажных почвах и пористых породах

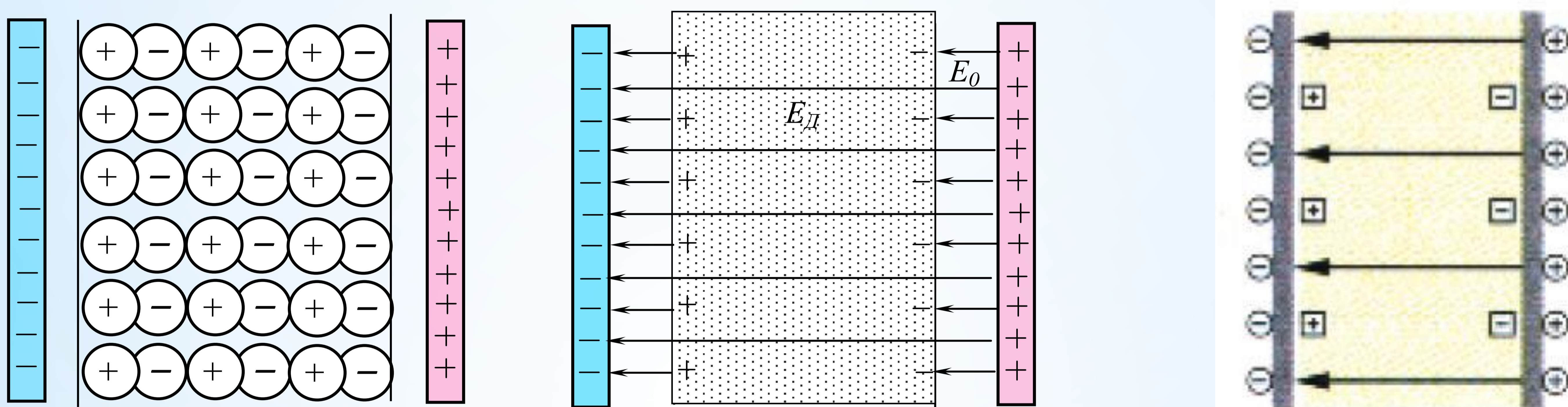
д.ф.-м.н., проф. Бобров П.П.



# \* Диэлектрическая проницаемость



Диэлектрики – вещества, не проводящие электрический ток



Поляризация диэлектриков

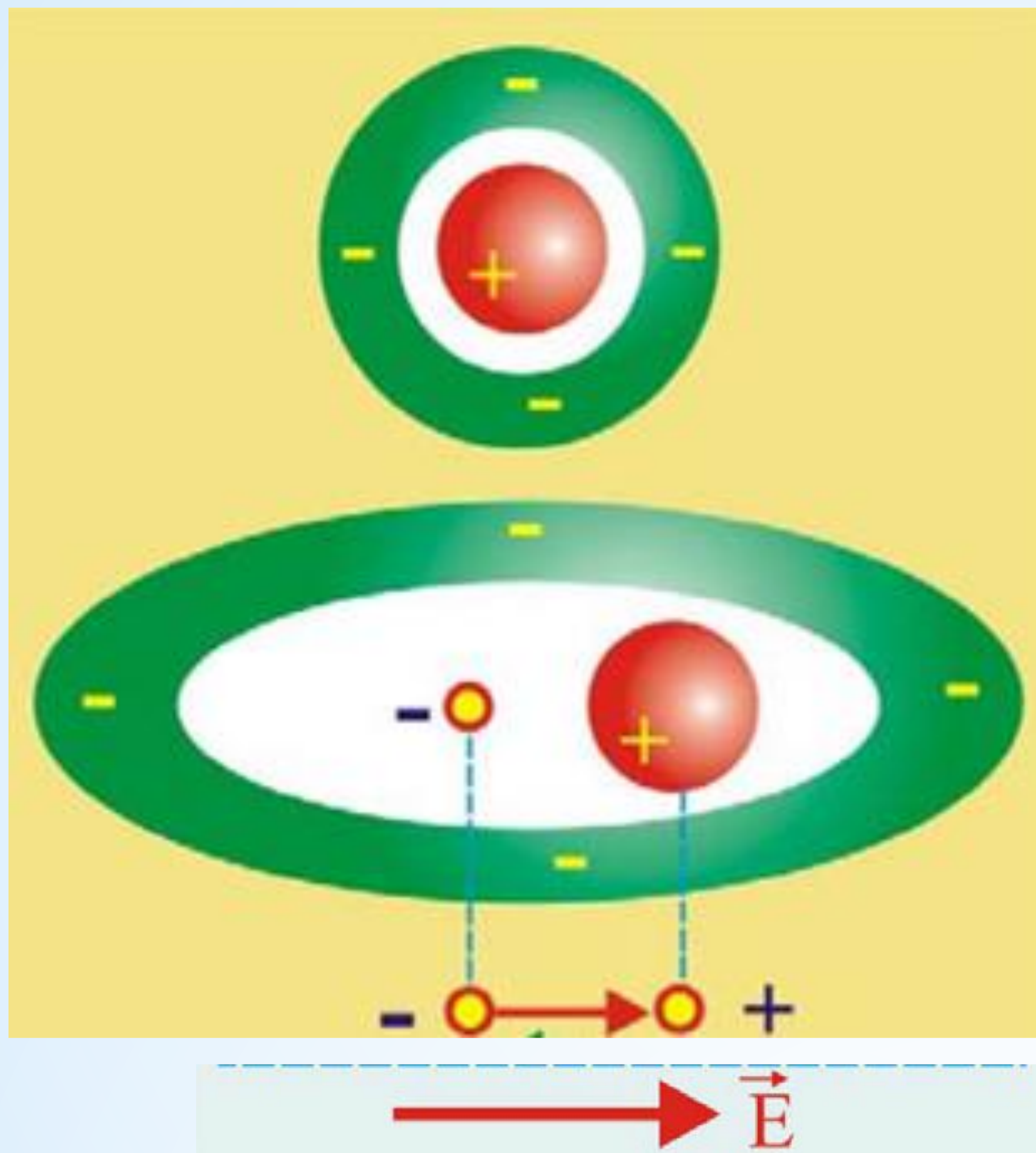
При заполнении конденсатора диэлектриком его емкость увеличивается

$$\frac{C_D}{C_0} = \epsilon$$



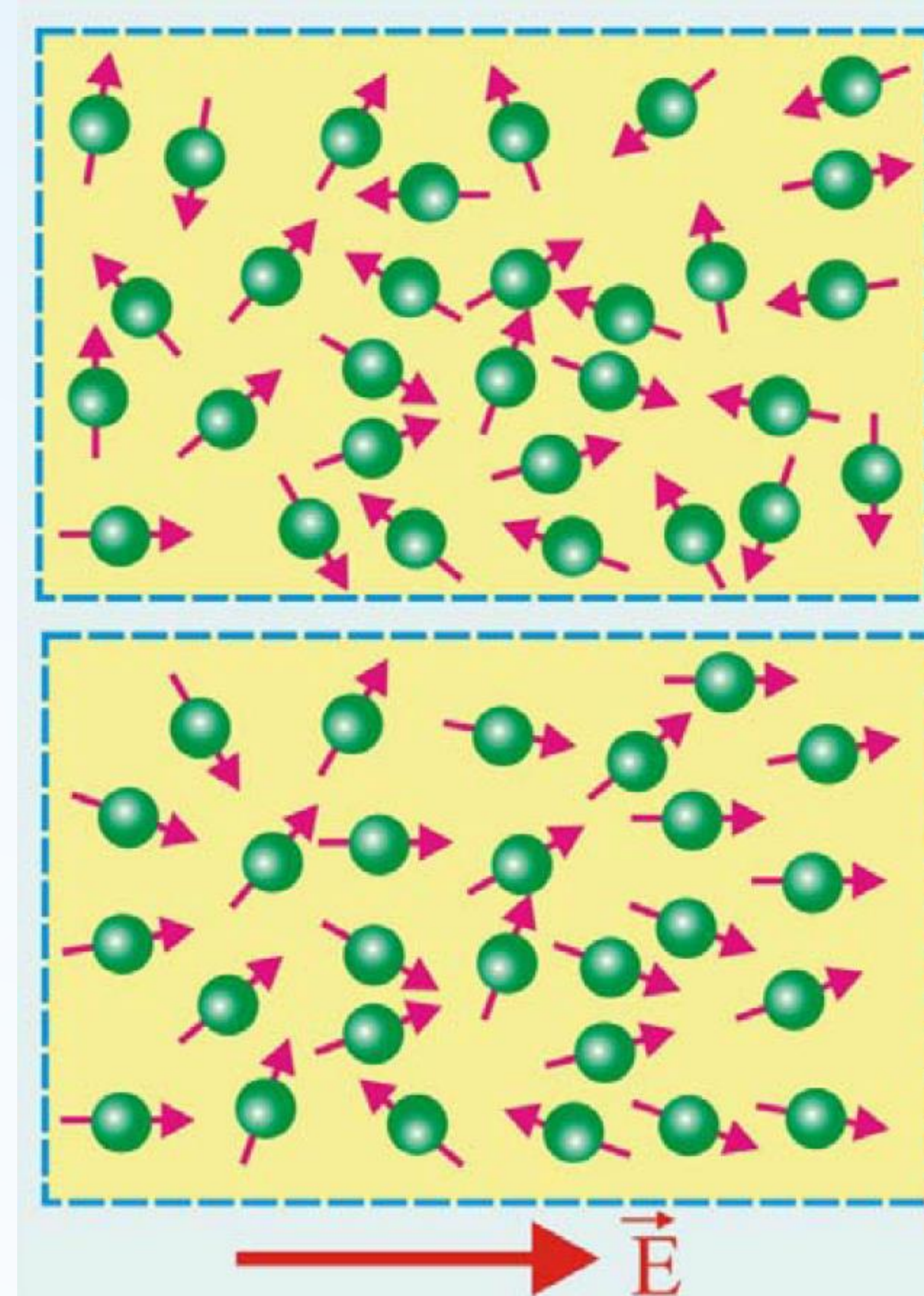
# \* Поляризация диэлектриков

Неполярные молекулы

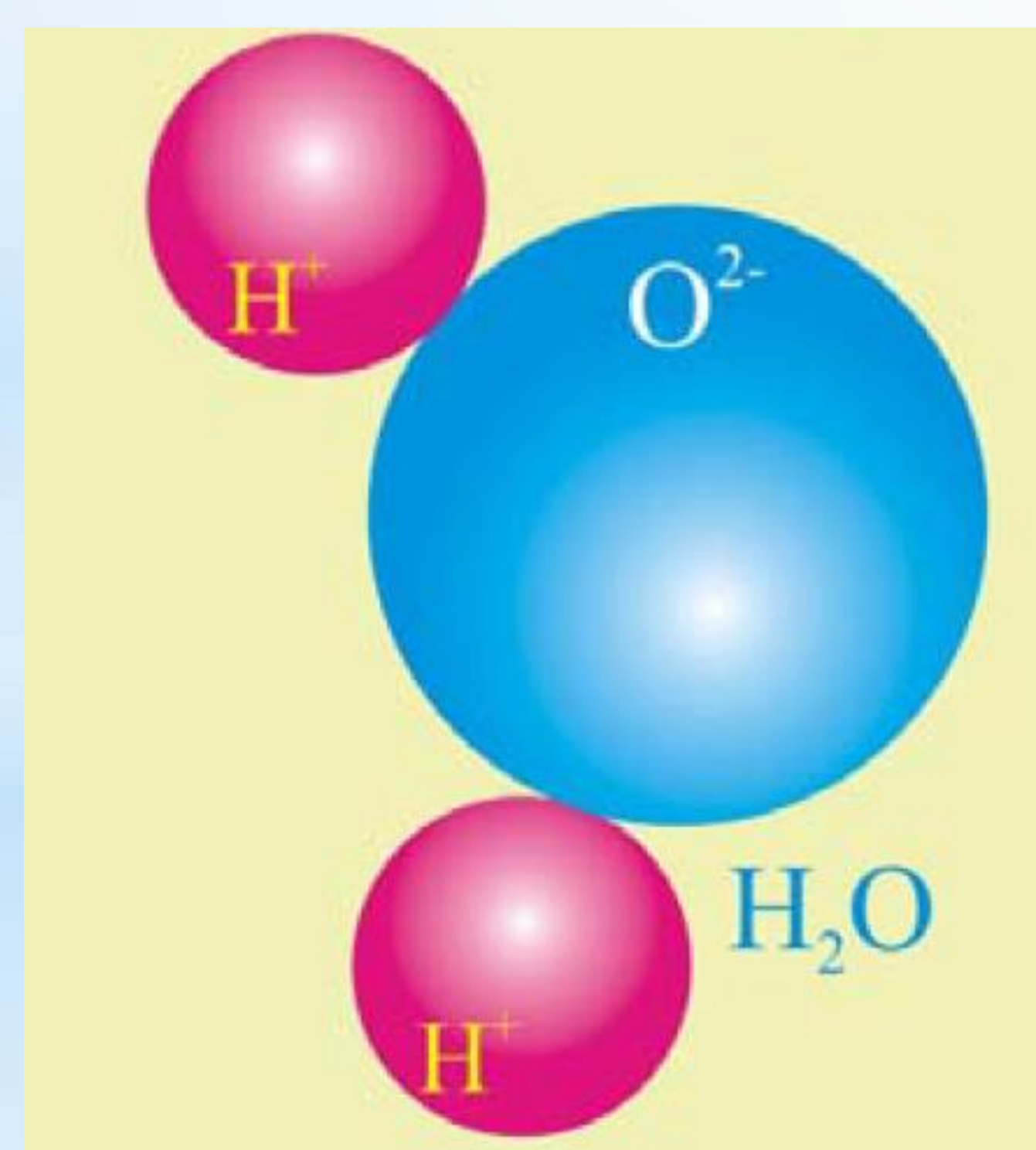


Электронная поляризация  
Время релаксации  $\sim 10^{-15}$ с

Полярные молекулы



Ориентационная поляризация  
Время релаксации молекул  
воды  $\sim 10^{-11}$ с



Молекула воды

Время релаксации это  
время, в течение  
которого поляризация  
почти исчезает после  
снятия электрического  
поля (точнее  
уменьшается в 2,71 раза)



## Полярные диэлектрики в переменном поле



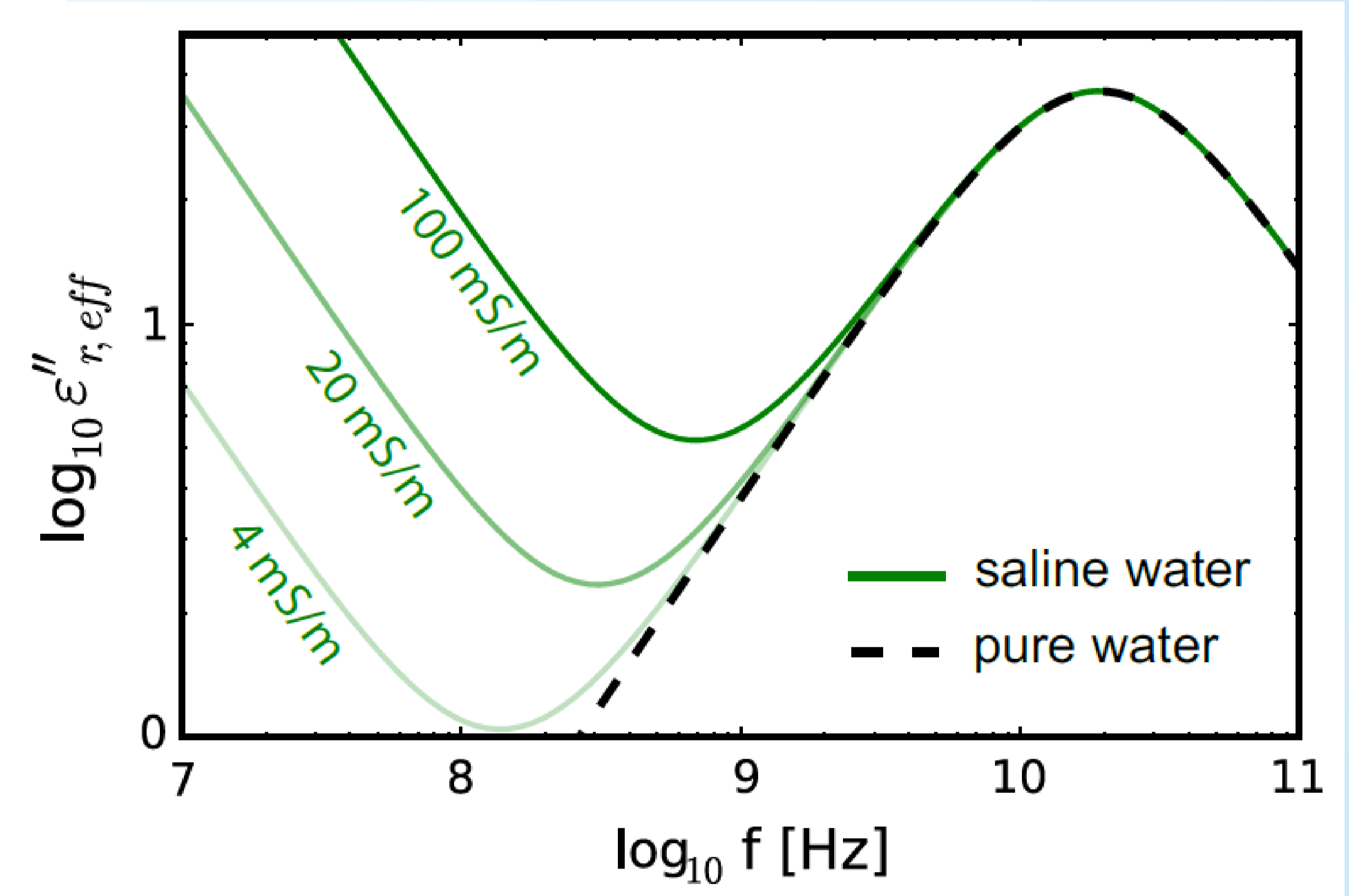
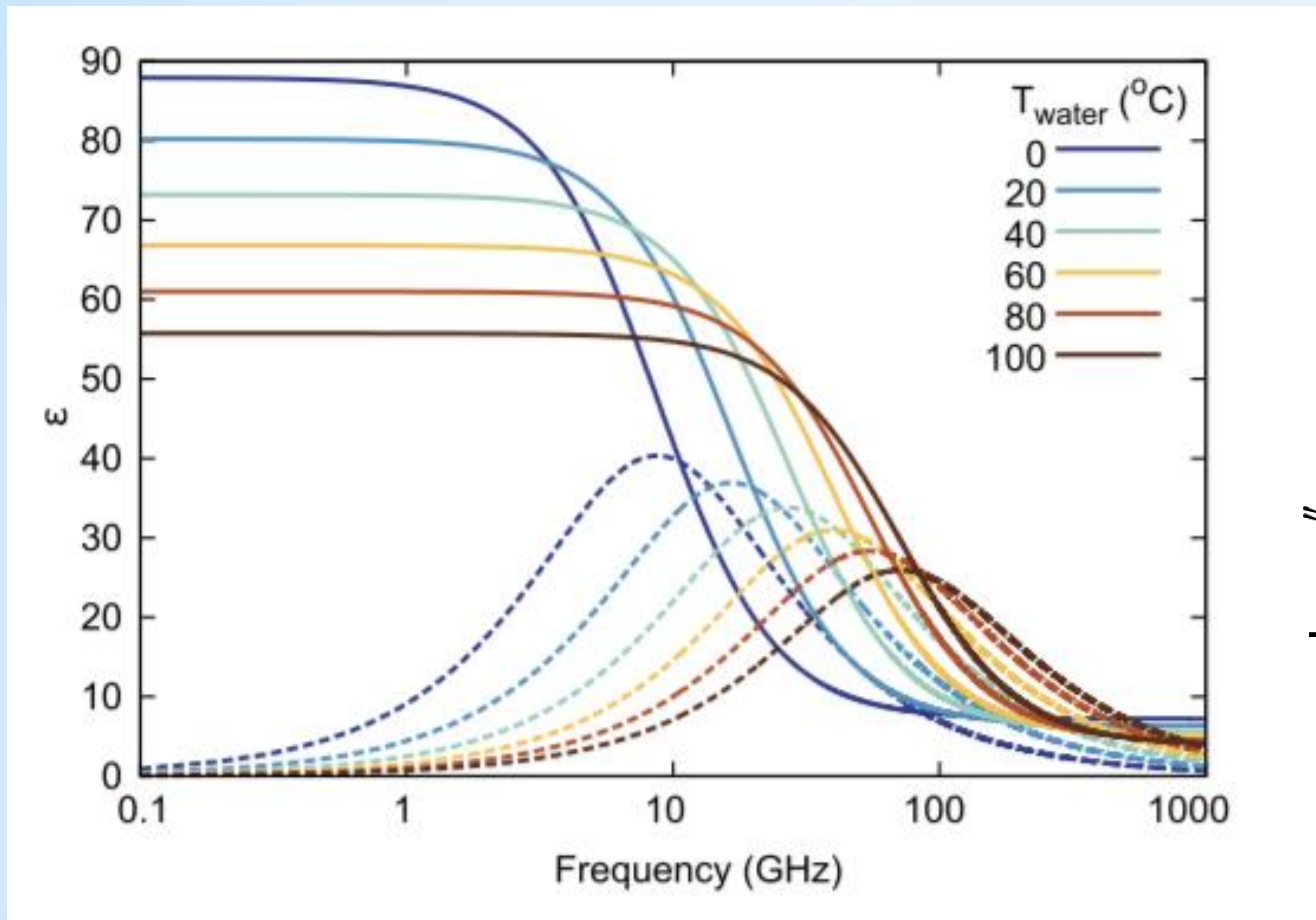
На очень высоких частотах молекулы не успевают поворачиваться по направлению поля - ориентационная поляризация отсутствует (1)

При частоте 0 период колебаний поля равен времени релаксации молекул, потери электрической энергии максимальны (2)

На низких частотах все молекулы успевают повернуться по полю за небольшую часть периода колебаний (3)

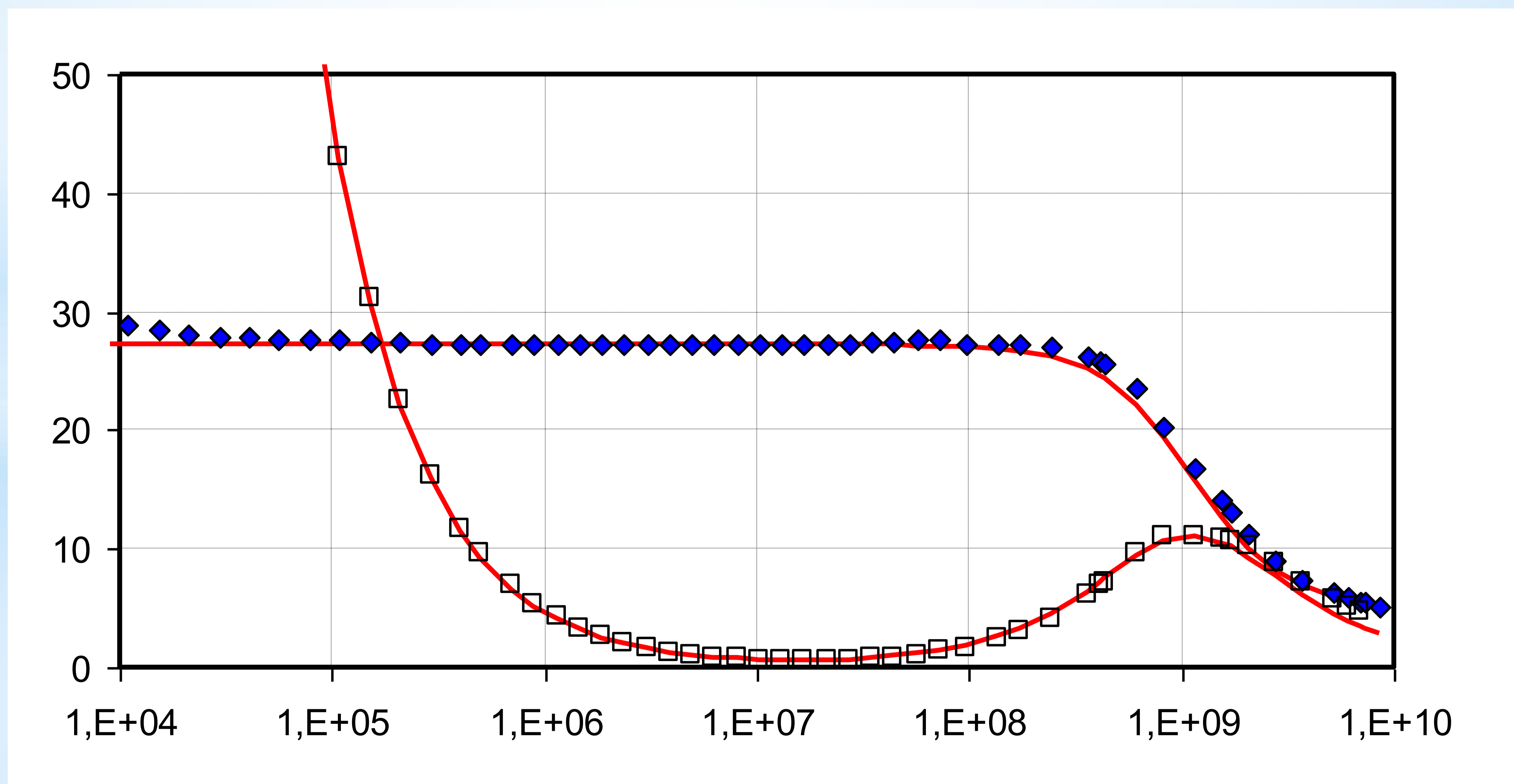


\* Действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости воды в зависимости от температуры



$$\dot{\epsilon} = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_S - \epsilon_{\infty}}{1 + i\omega\tau}$$

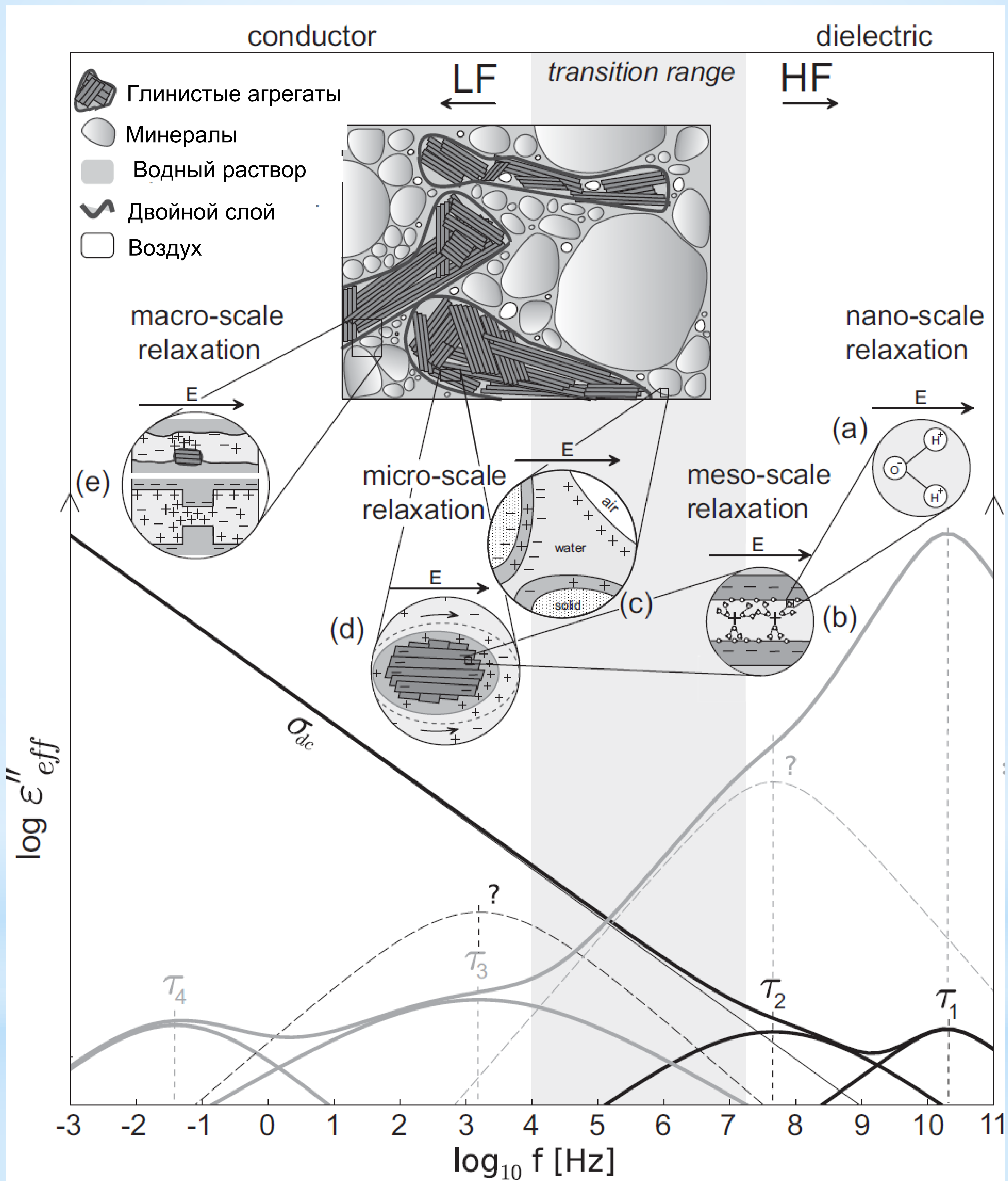
$$\dot{\epsilon} = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_S - \epsilon_{\infty}}{1 + (i\omega\tau)^{1-\alpha}}$$



Диэлектрическая проницаемость спирта 95% при 25 С

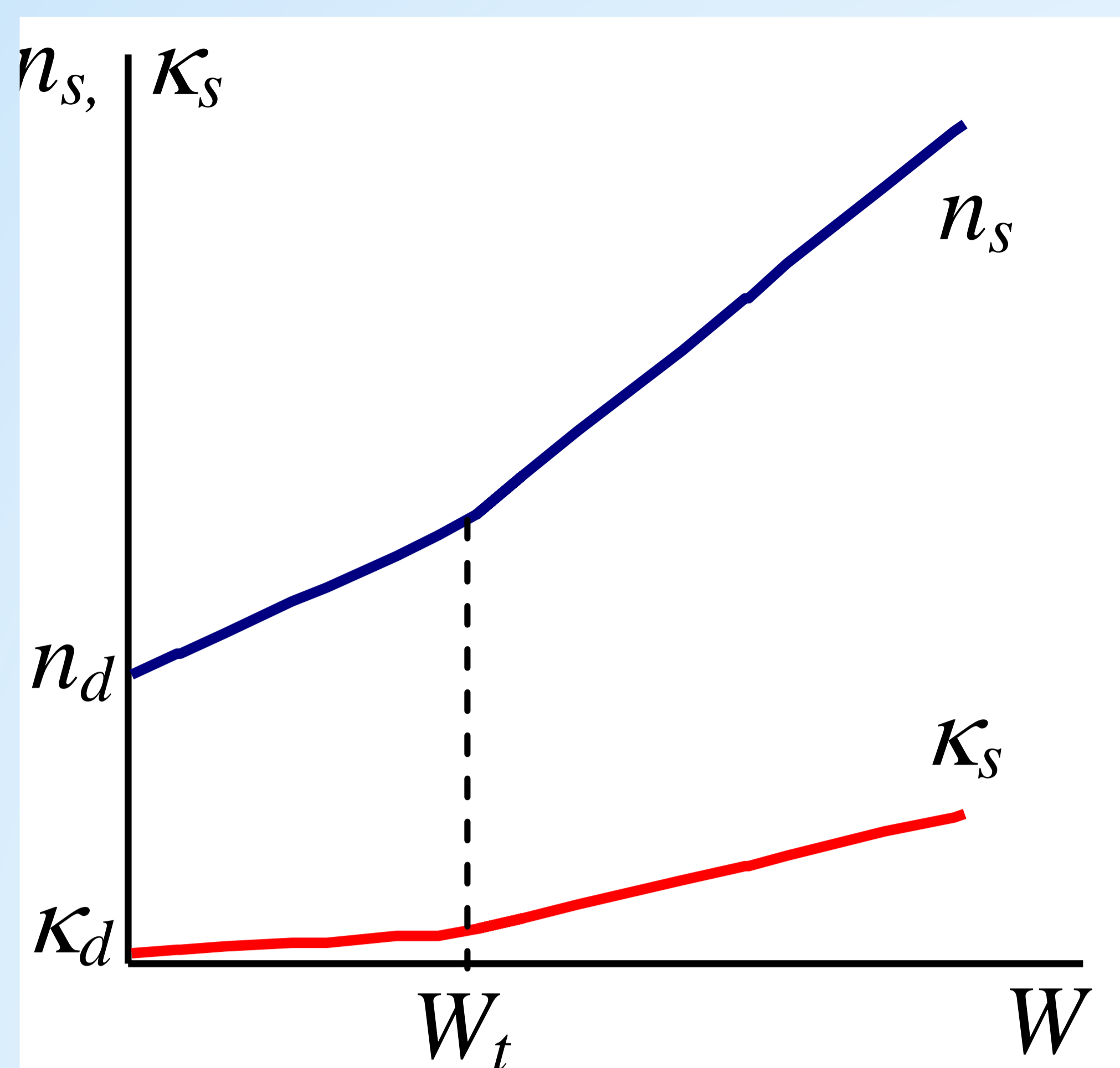


\* Механизмы поляризации во влажной почве





# \* Связанная вода

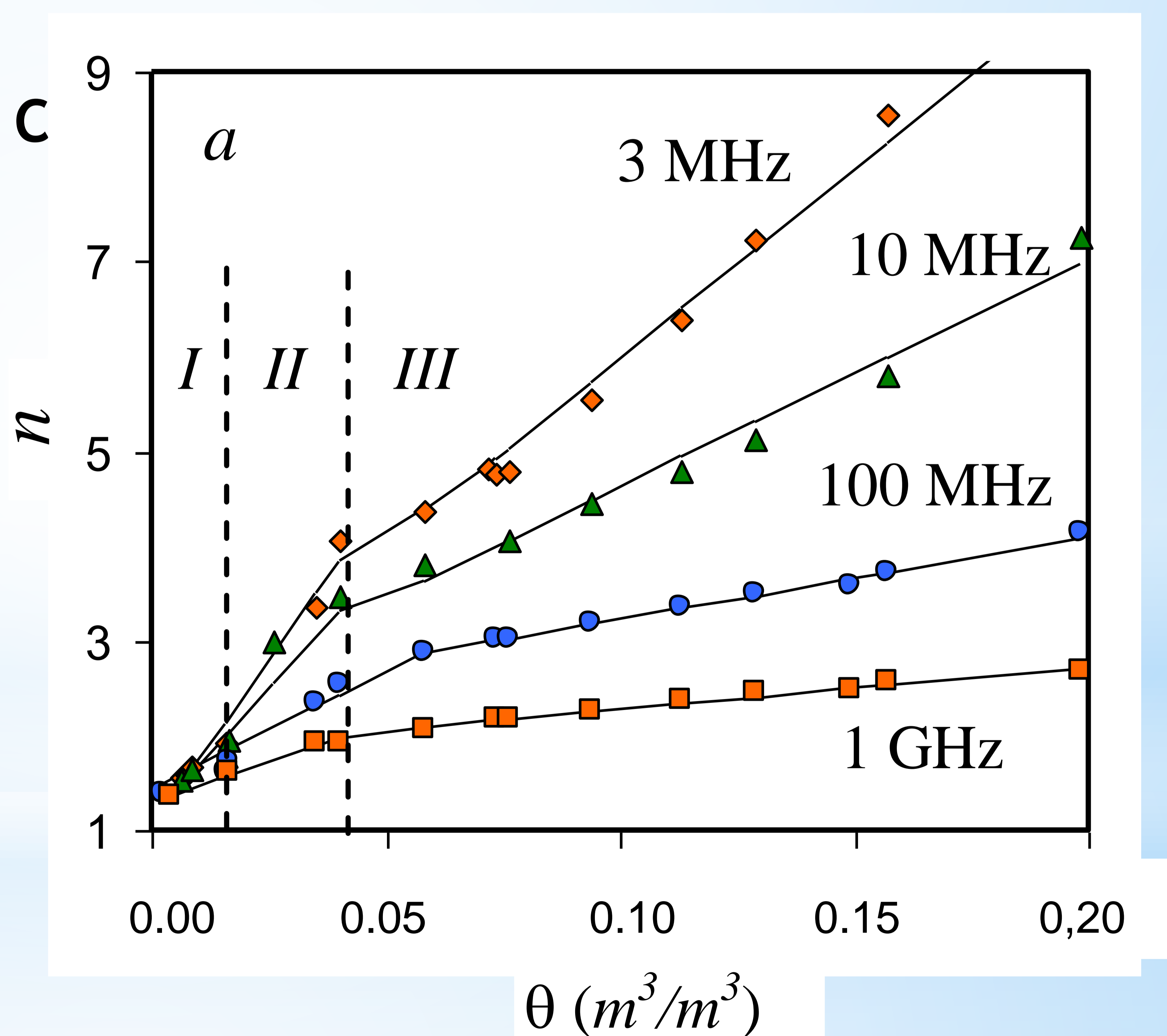
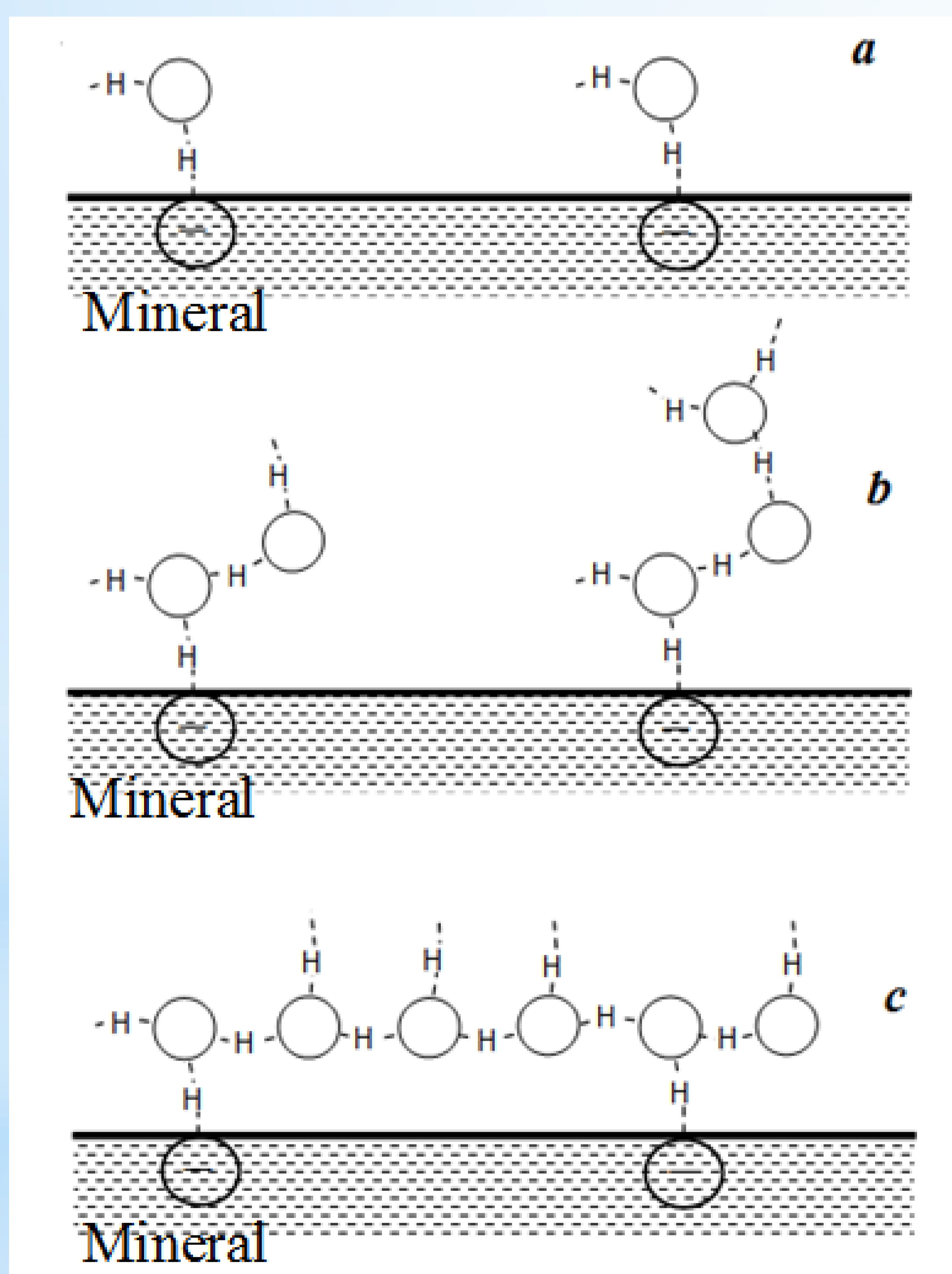


$$n^* = n - i\kappa = \sqrt{\varepsilon' - i\varepsilon''}$$

$$n = \sqrt{\varepsilon'} \sqrt{0,5 \left( 1 + \sqrt{1 + (\varepsilon''/\varepsilon')^2} \right)}$$

$$\kappa = \sqrt{\varepsilon'} \sqrt{0,5 \left( -1 + \sqrt{1 + (\varepsilon''/\varepsilon')^2} \right)}$$

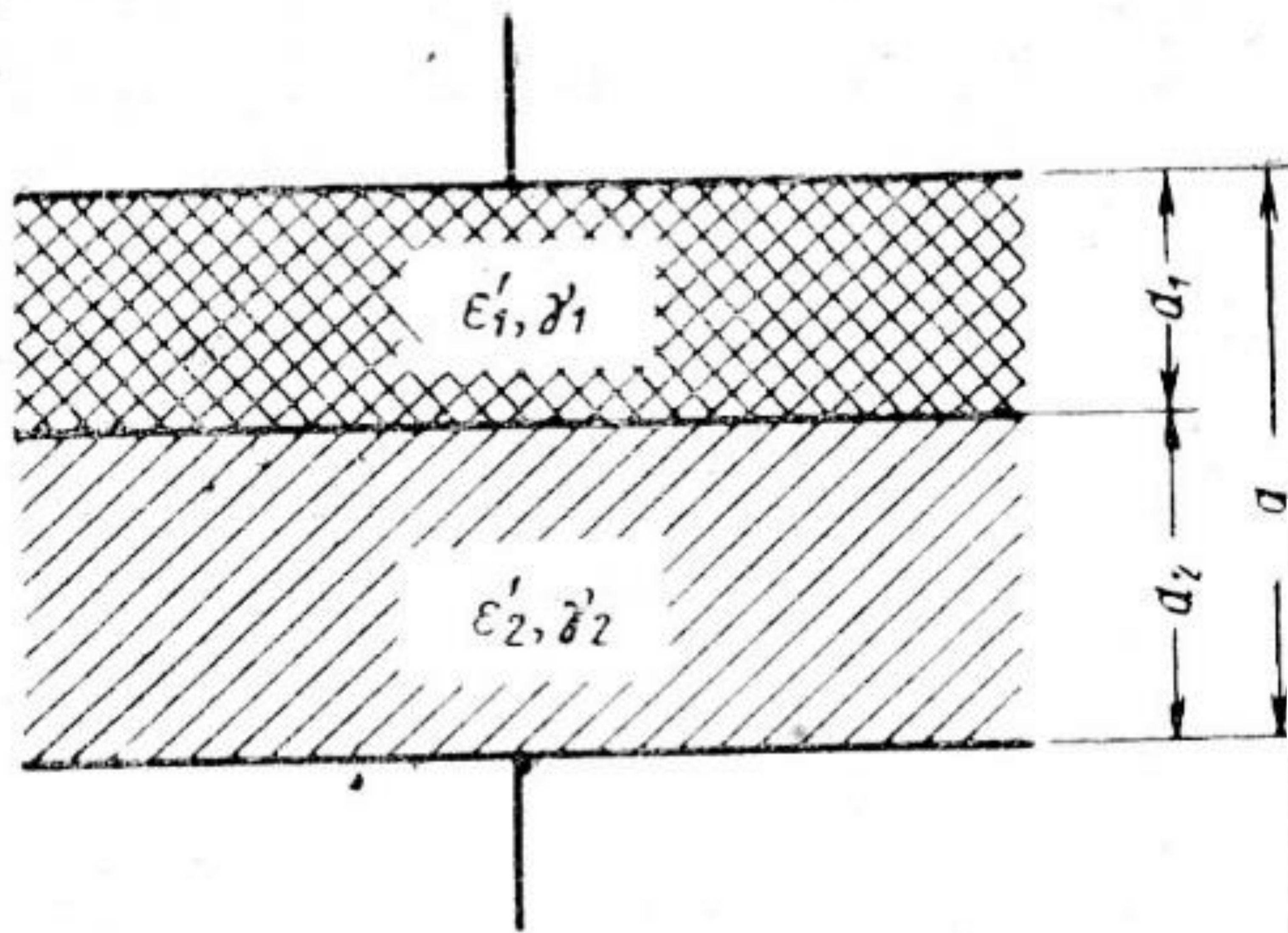
Зависимость комплексного показателя преломления почвы от влажности



T. A. Belyaeva, P. P. Bobrov, E. S. Kroshka, A. S. Lapina, O. V. Rodionova "The effect of very low water content on the complex dielectric permittivity of clays, sand-clay and sand rocks," *Measurement Science and Technology*. – 2017. – V. 28. – P. 014005



Электрические свойства неорганических диэлектриков в диапазоне СВЧ. Машкович М.Д. Сов. Радио, 1969, 240 с.



$$\dot{\epsilon} = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_S - \epsilon_{\infty}}{1 + i\omega\tau}$$

$$\epsilon_0 = \frac{\epsilon'_1 d_1 \gamma_2^2 + \epsilon'_2 d_2 \gamma_1^2}{(\gamma_1 d_2 + \gamma_2 d_1)^2} d$$

$$\epsilon_{\infty} = \frac{d \epsilon'_1 \epsilon'_2}{d_1 \epsilon'_2 + d_2 \epsilon'_1}$$

Рис. 1.10. Двухслойный конденсатор Максвелла — Вагнера.

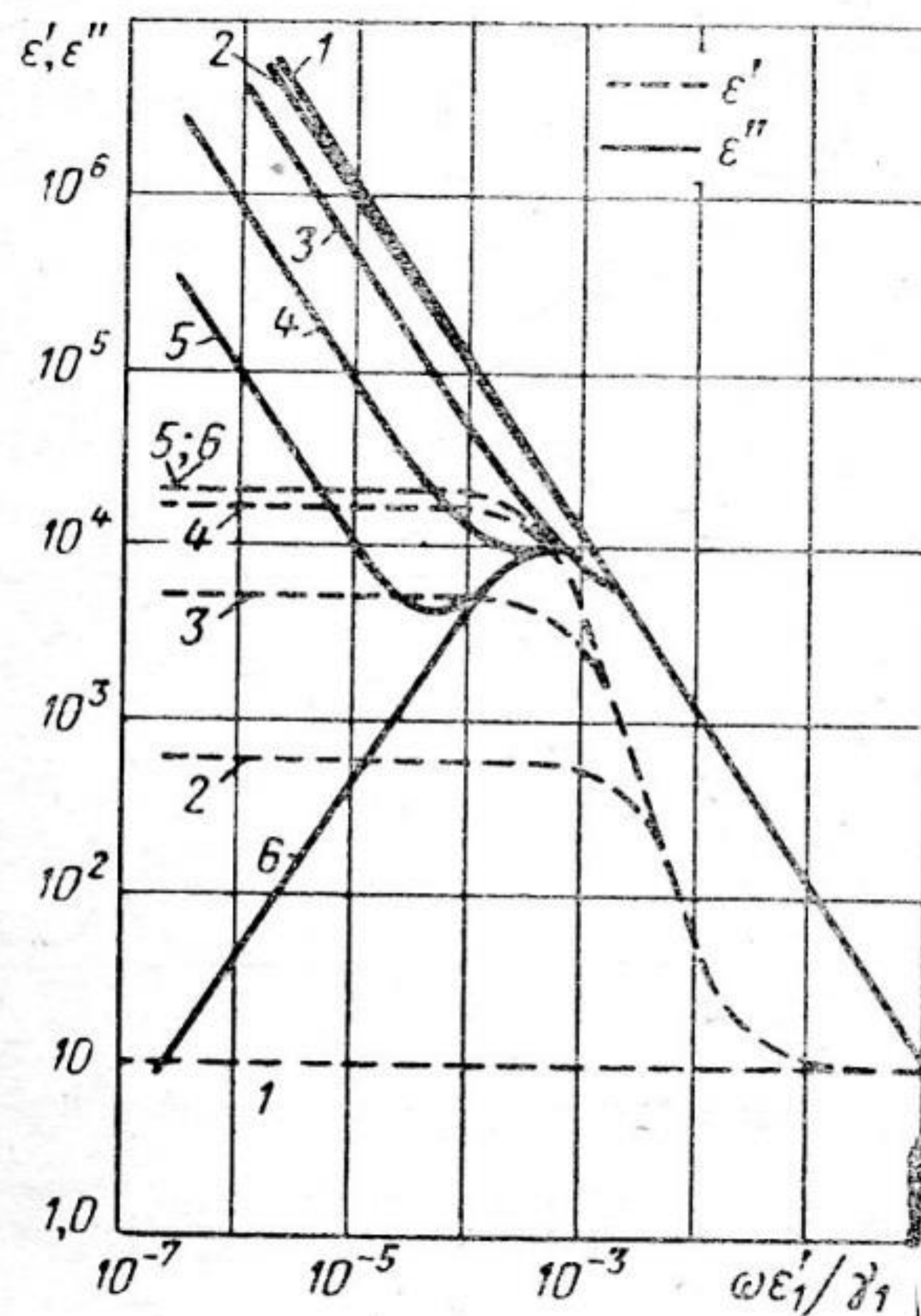
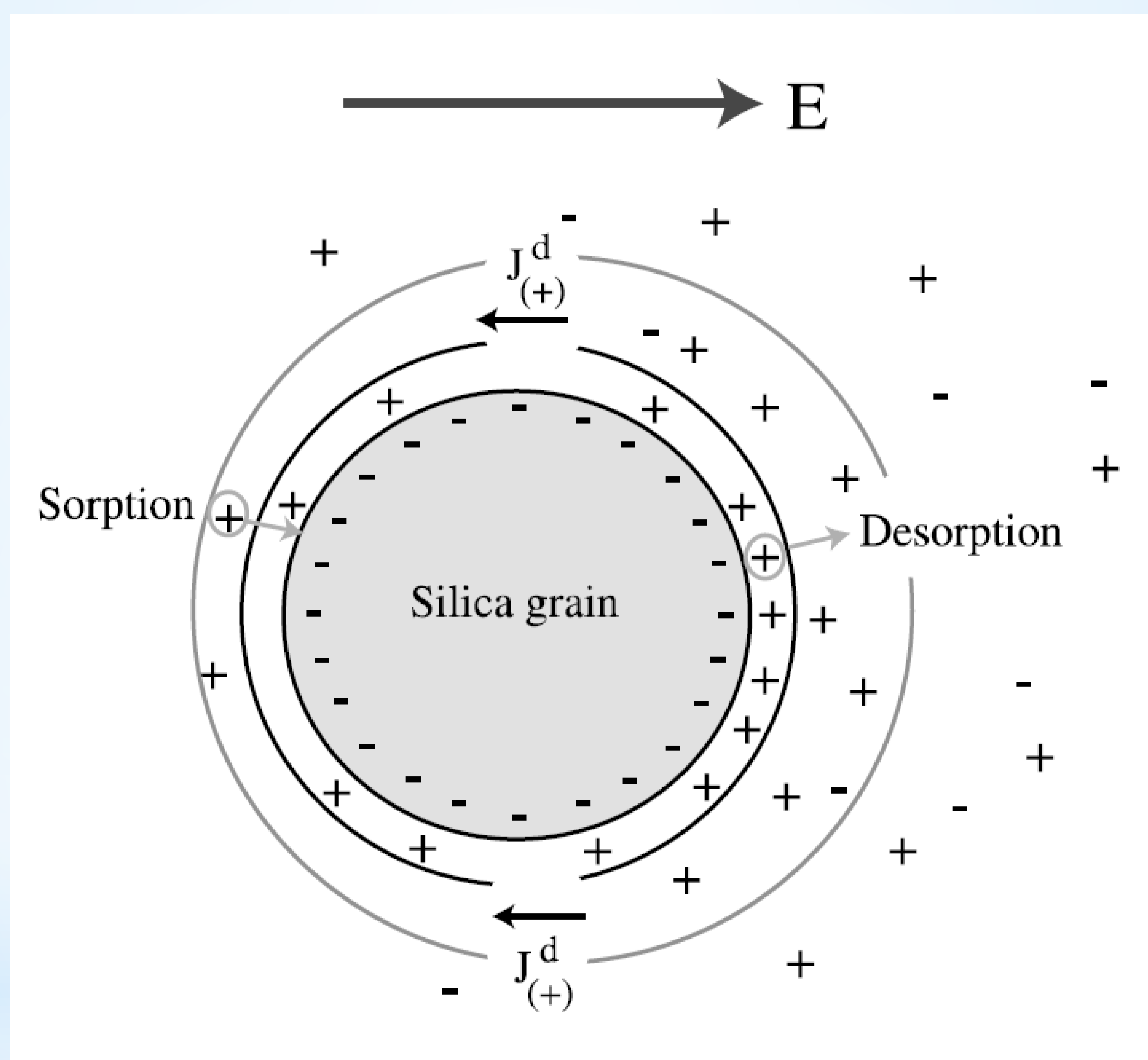
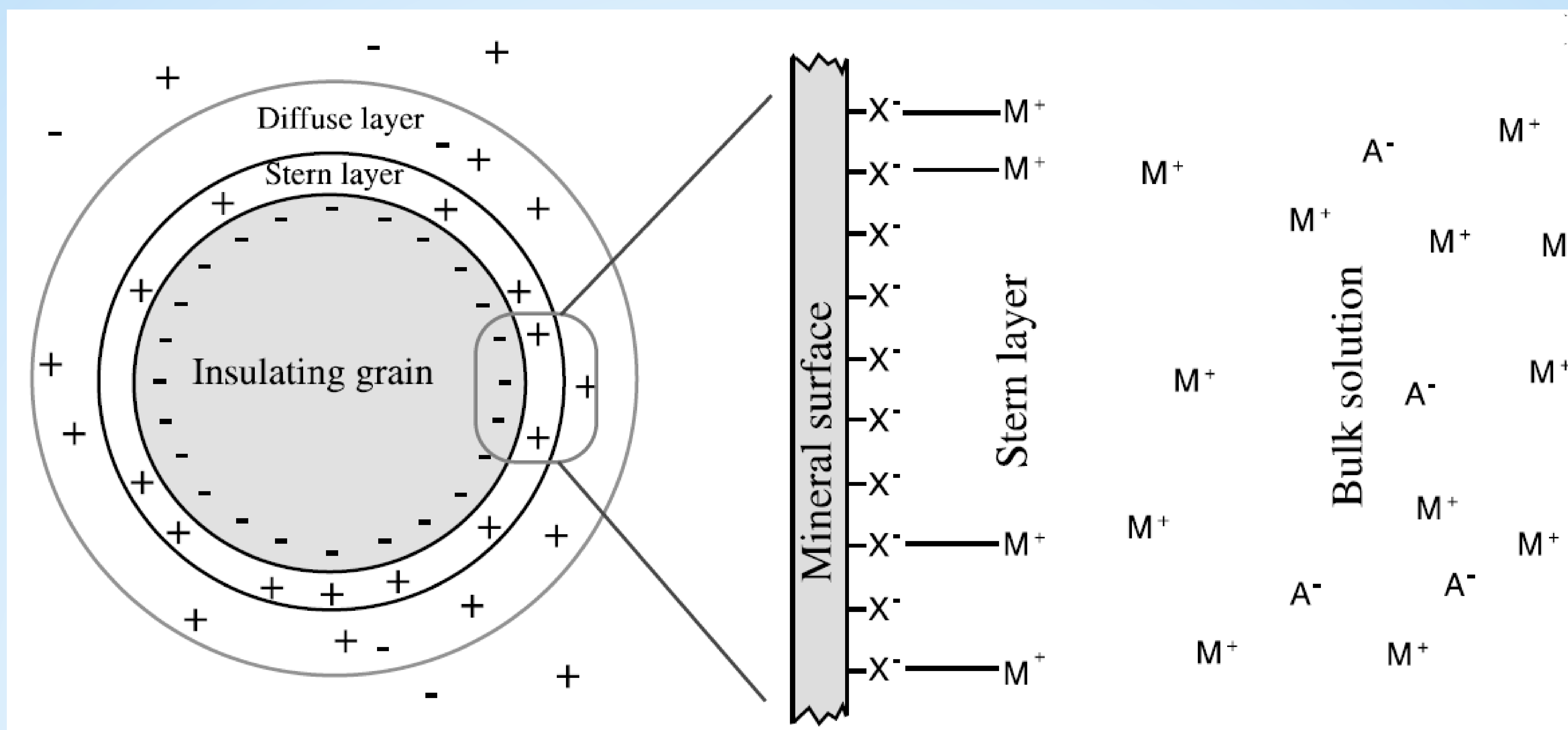


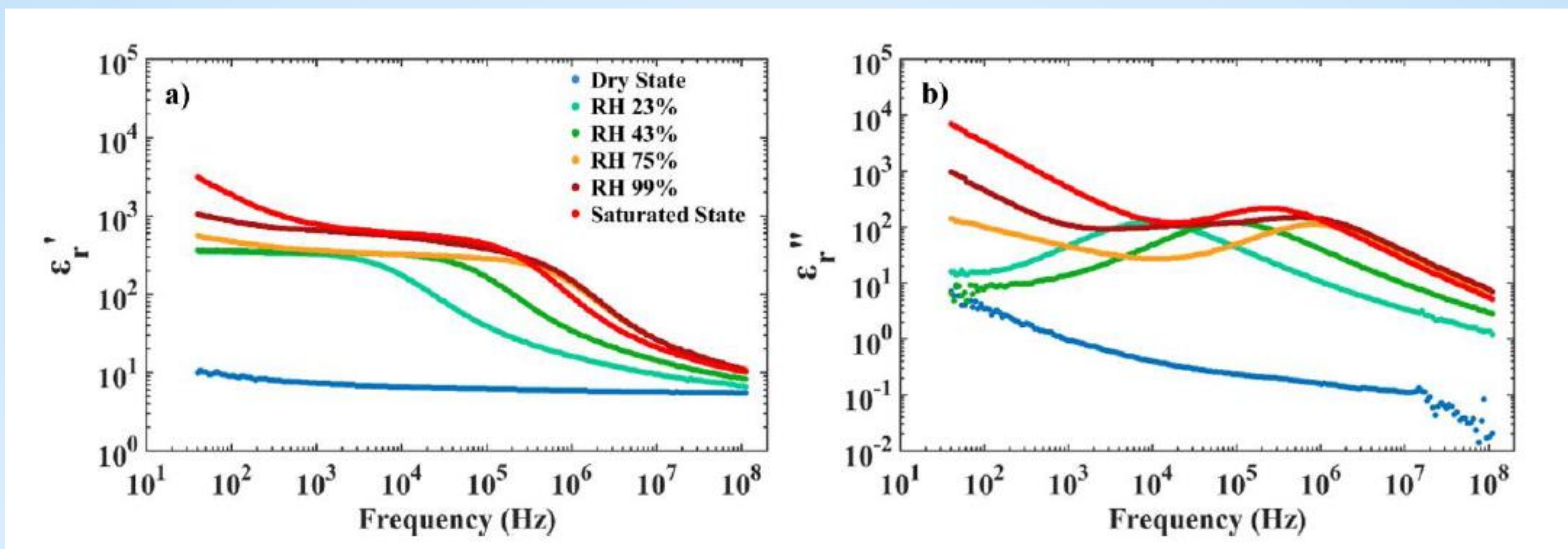
Рис. 1.13. Влияние соотношения проводимостей гетерогенного материала на диэлектрический спектр [26]:



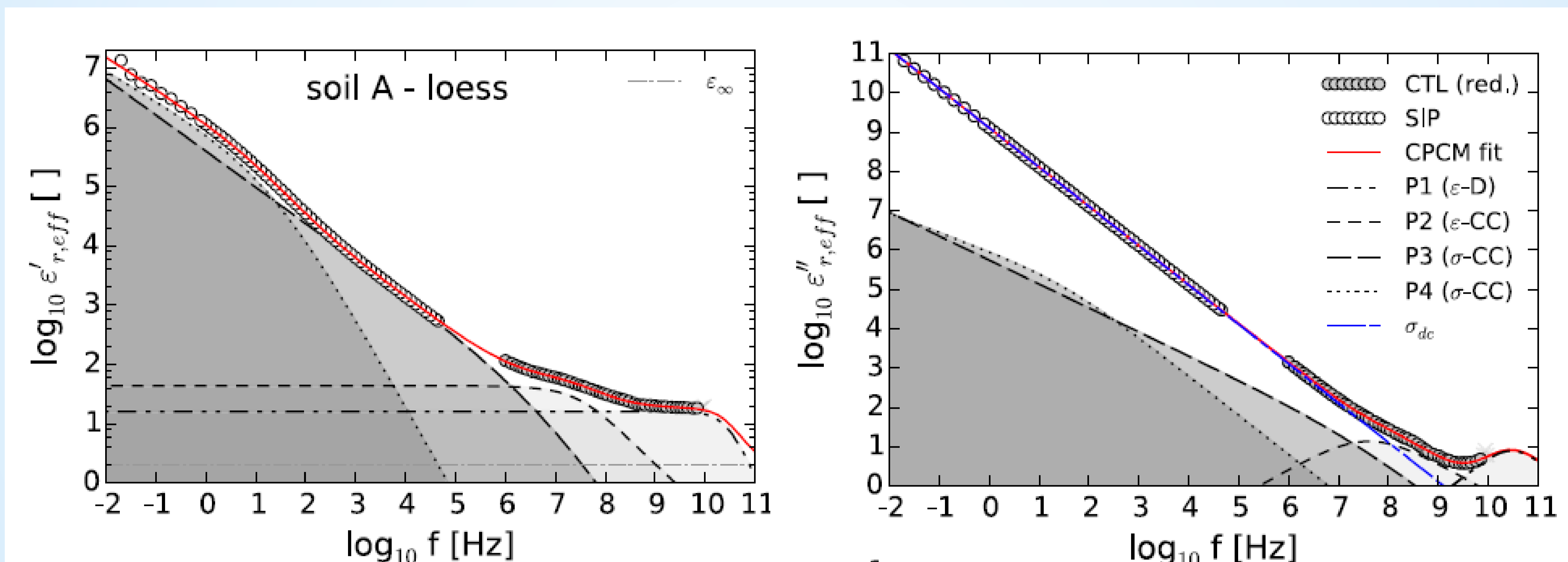


Поляризация двойного электрического слоя

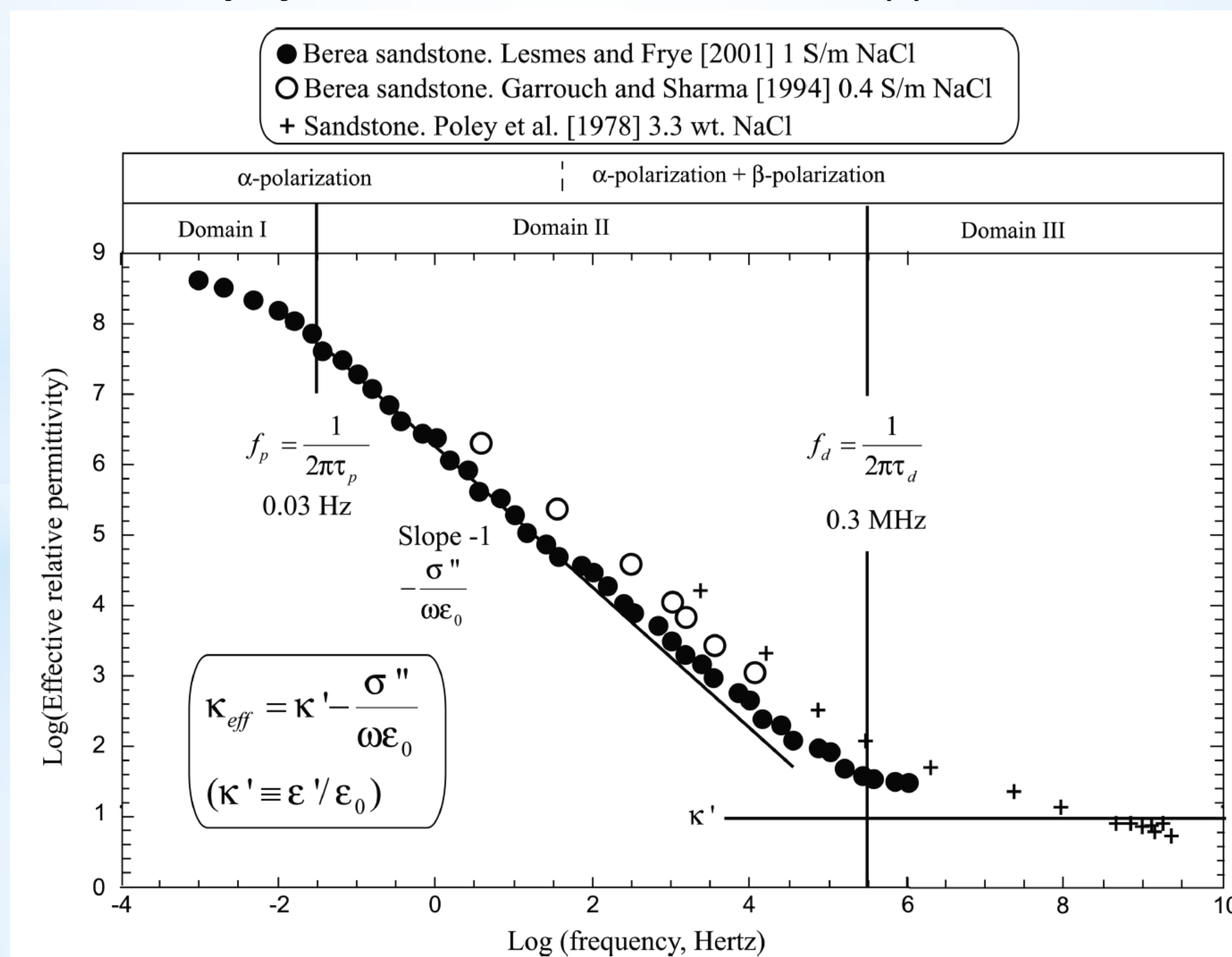




P. R. J. Connolly et al., "Dielectric Polarisation Studies in Partially Saturated Shale Cores" *JGR Solid Earth* Vol.124, Issue11, 2019, P. 10721-10734



M. Loewer, T. Günther, J. Igel, S. Kruschwitz, T. Martin, and N. Wagner, "Ultra-broad-band electrical spectroscopy of soils and sediments – a combined permittivity and conductivity model," *Geophys. J. Intern.*, vol. 210, no. 3, pp. 1360–1373, 2017.



Revil, A. Effective conductivity and permittivity of unsaturated porous materials in the frequency range 1 mHz–1GHz // *Water Resources Research*. – 2013. –V. 49. –P. 306-327.



## Моделирование комплексной диэлектрической проницаемости

$$\hat{\epsilon} = \epsilon' - i\epsilon'' = \dot{n}^2 + \frac{\Delta\epsilon_{s1}}{1+i\omega\tau_1} + \frac{\Delta\epsilon_{s2}}{1+(i\omega\tau_2)^{1-\alpha_2}} + \frac{\Delta\epsilon_{s3}}{1+(i\omega\tau_3)^{1-\alpha_3}} - i\frac{\sigma}{\omega\epsilon_0}$$

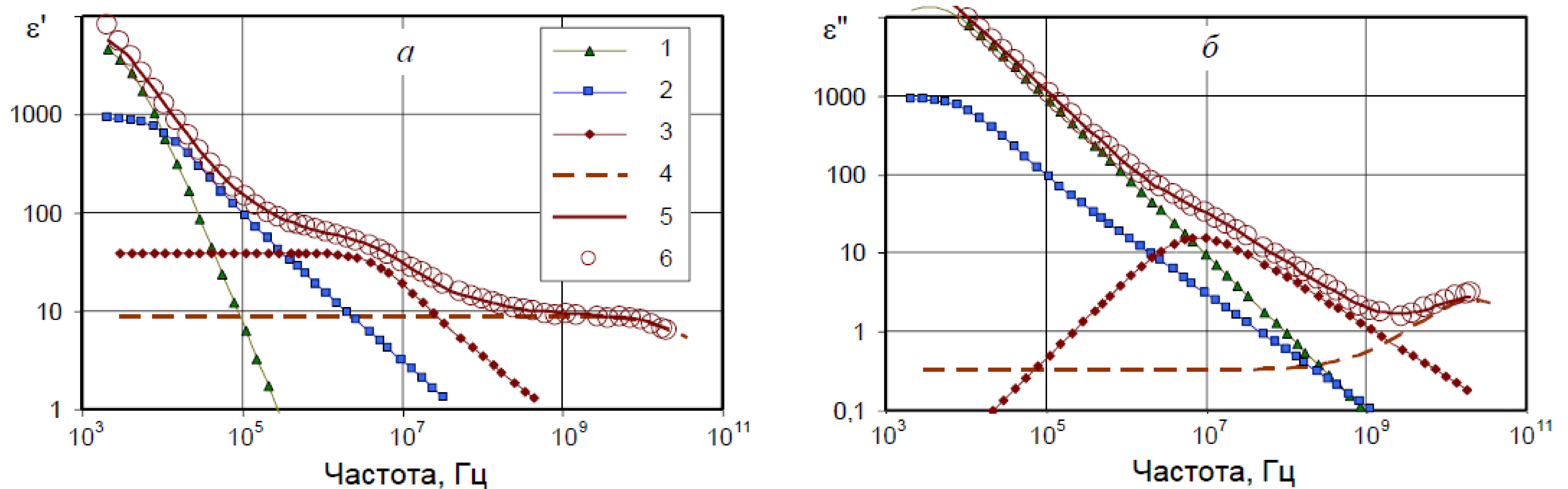


Иллюстрация применения модели (2.12) для КДП суглинка при объемной влажности  $0,229 \text{ м}^3/\text{м}^3$ . 1–3 вклады релаксационных процессов №№ 1–3; 4 – вклад рефракционной части модели; 5 – расчет по полной модели; 6 – экспериментальные данные.



\* Зависимость диэлектрической проницаемости от частоты и влажности

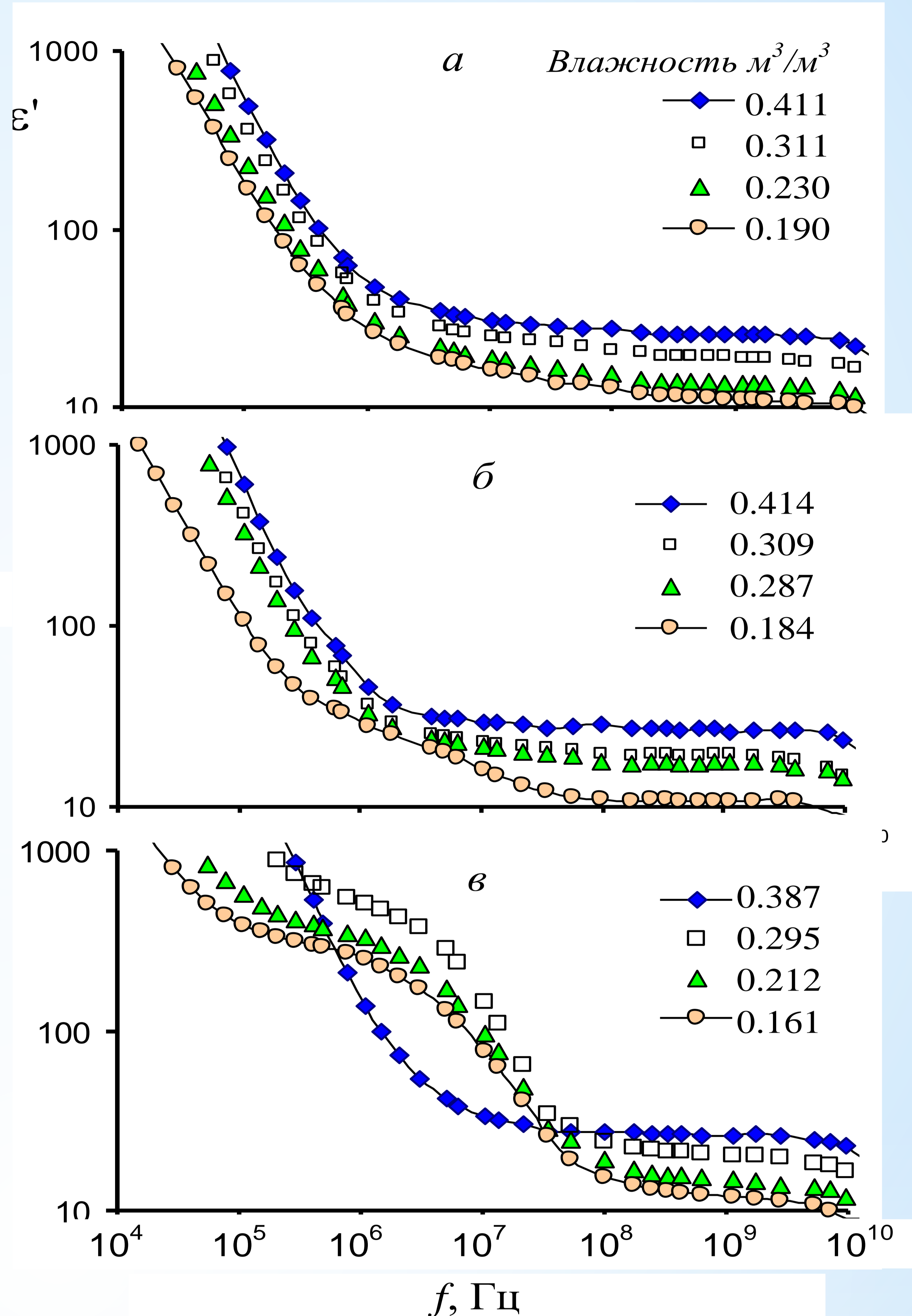
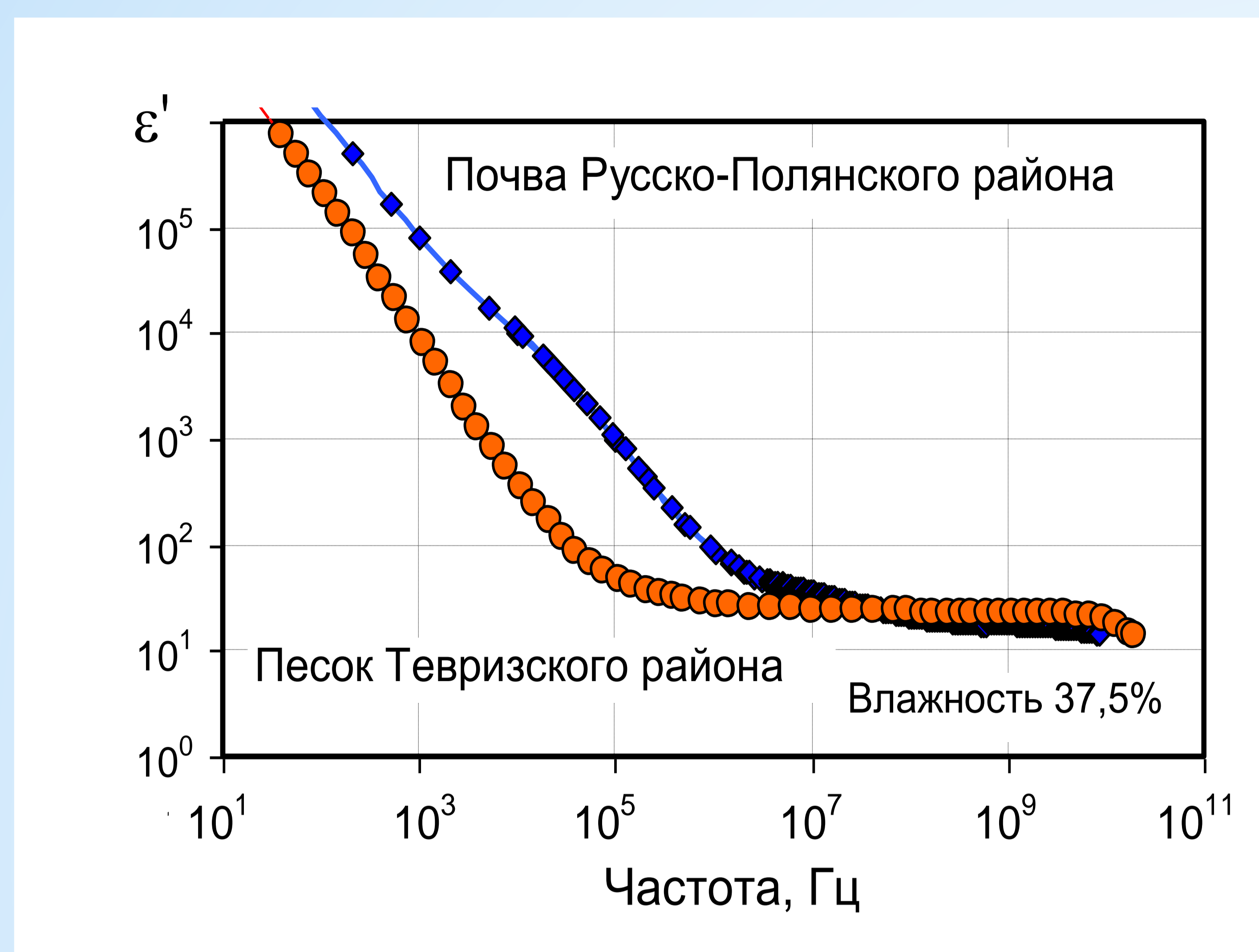


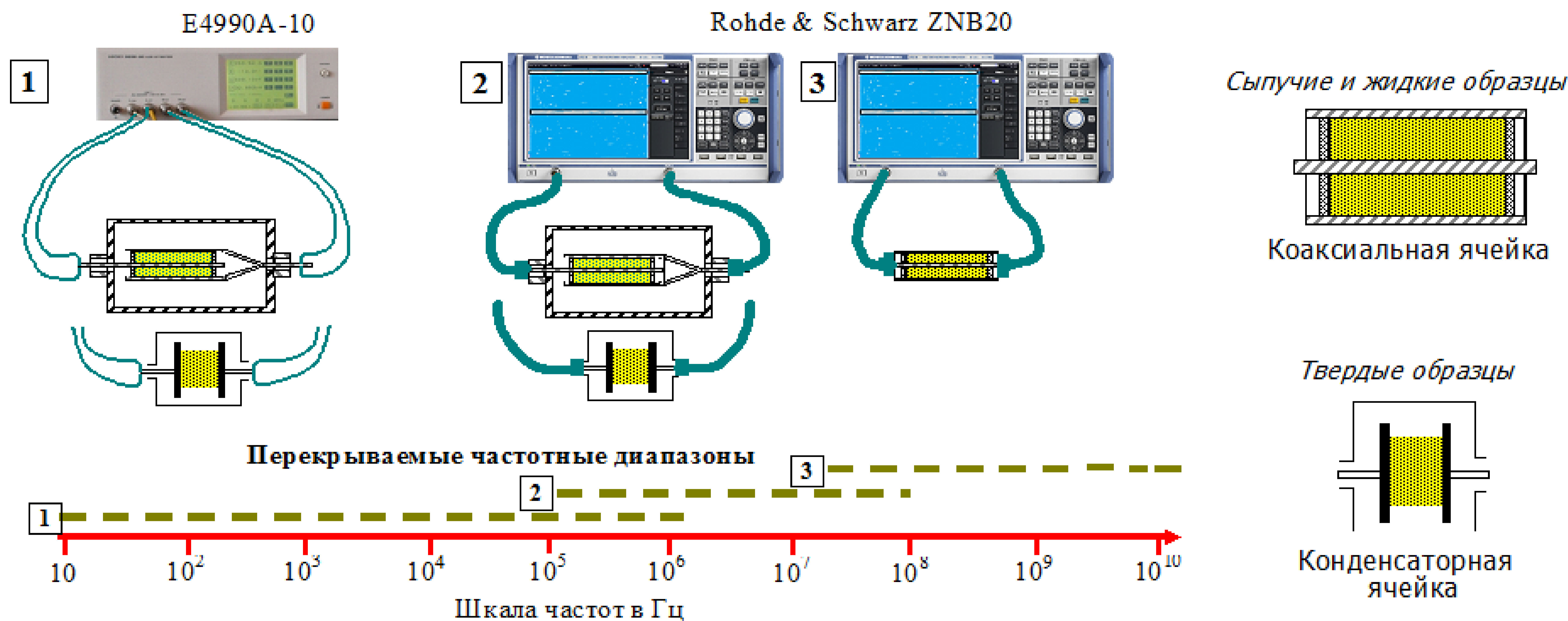
Рис. 2. Частотные зависимости действительной части КДП песка (а), гранул 0-50 (б) и гранул 0-20 (в) при увлажнении дистиллированной

P. P. Bobrov, T. A. Belyaeva, E. S. Kroshka «Combined dielectric model of sandy soils in the frequency range from 10 kHz to 8 GHz» *Journal of Applied Geophysics*. – 2018. – V. 159. – P. 616-620

P. P. Bobrov, A. S. Lapina, A. V. Repin "Effect of the rock/water/air interaction on the complex dielectric permittivity and electromagnetic waves attenuation in water-saturated sandstones," Progress in Electromagnetics Research Symposium (*PIERS*) *Proceedings. Prague*. – July 6-9, 2015. – C. 1877-1879.



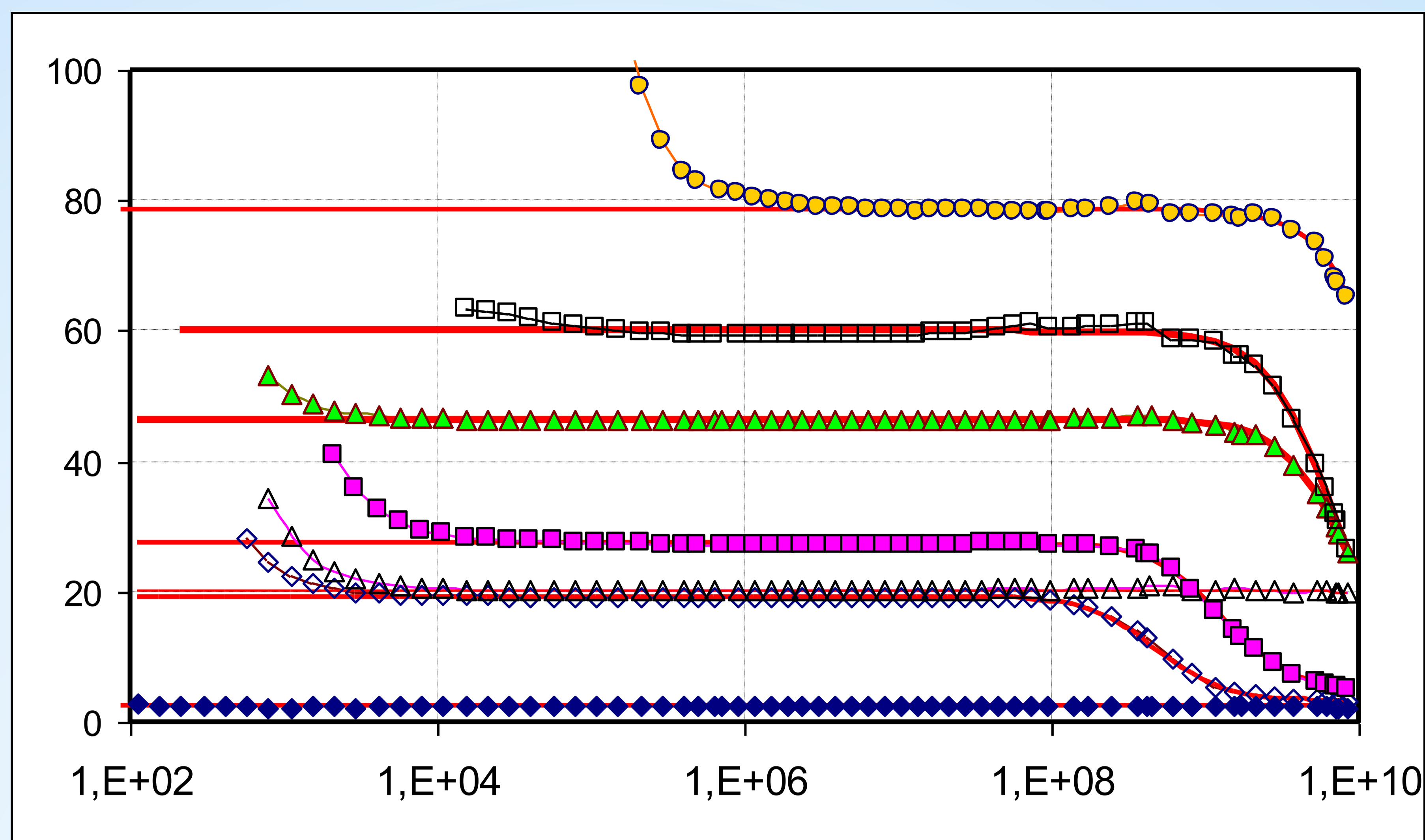
# Сверхширокополосный метод измерения диэлектрической проницаемости одного и того же образца в диапазоне частот 20 Гц - 20 ГГц (перекрытие по частоте 1 миллиард раз)



Bobrov P. P., Repin A.V., Rodionova O.V. Wideband Frequency Domain Method of Soil Dielectric Properties Measurements // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **2015**. Vol. 53, № 5. P. 2366–2372





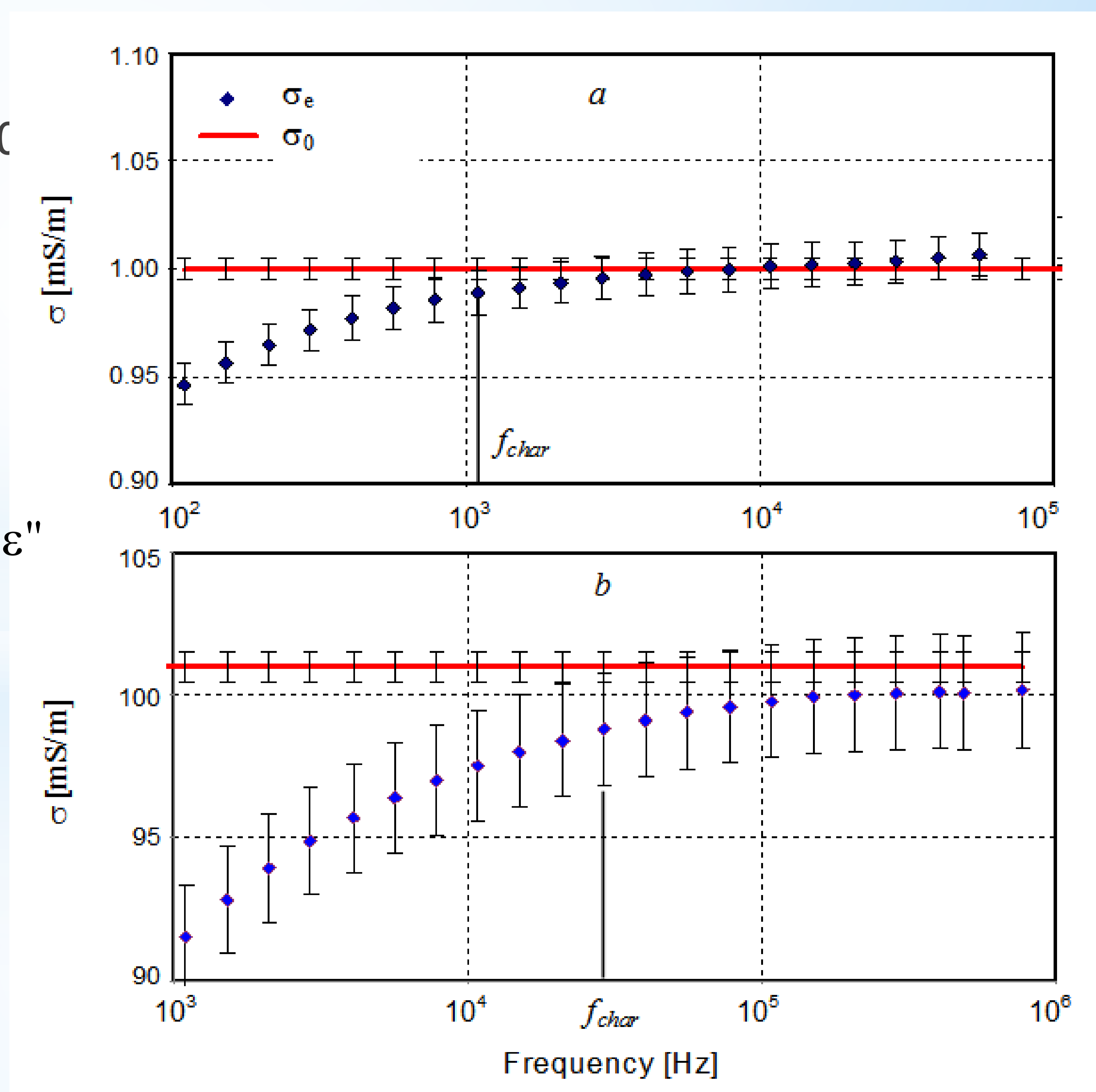


## Действительная часть КДП жидкостей в зависимости от частоты

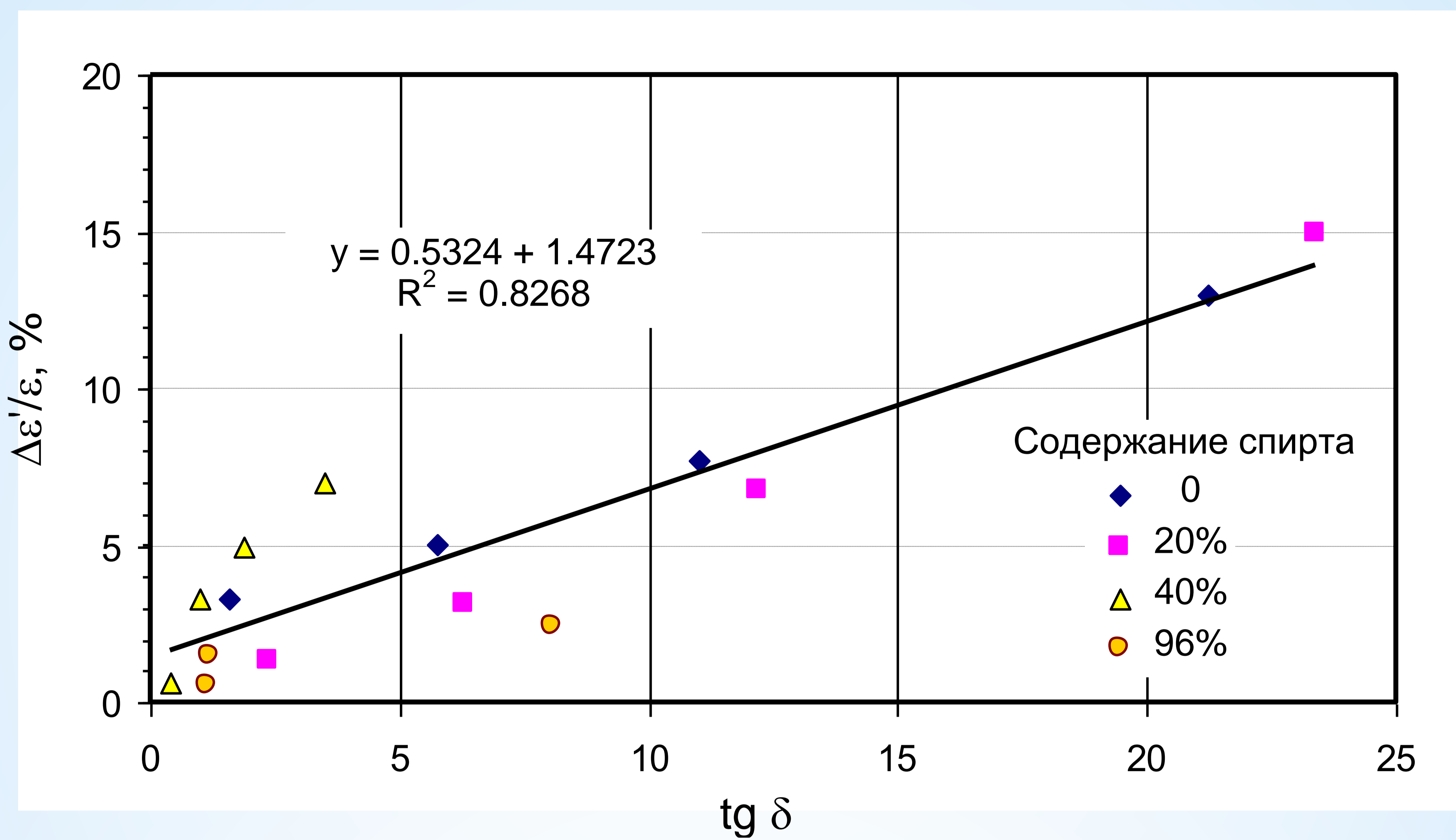
\* Снизу вверх:

- \* Тoluол,
- \* Изопропиловый спирт,
- \* Ацетон,
- \* Диметилсульфоксид,
- \* Спирт 95%.
- \* Спирт 40%, дистил. Вода 60
- \* Вода из крана

Effective electrical conductivity  $\sigma_e = \epsilon_0 \omega \epsilon''$   
 (a) of distilled water and (b) NaCl salt solution. The solid line is a specific conductivity at direct current.



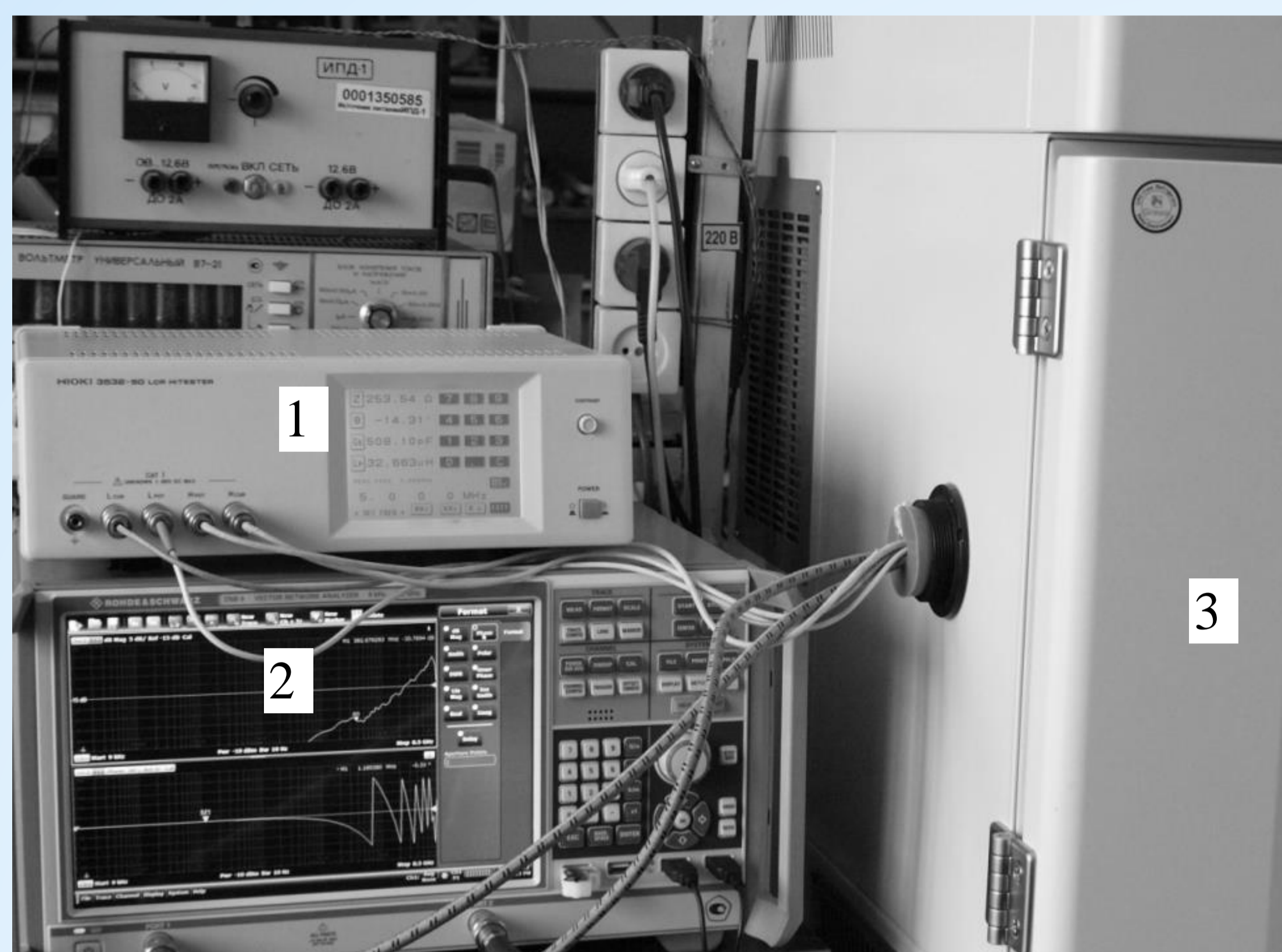




Относительная погрешность измерения действительной части КДП смесей вода-спирт в зависимости от тангенса угла диэлектрических потерь.

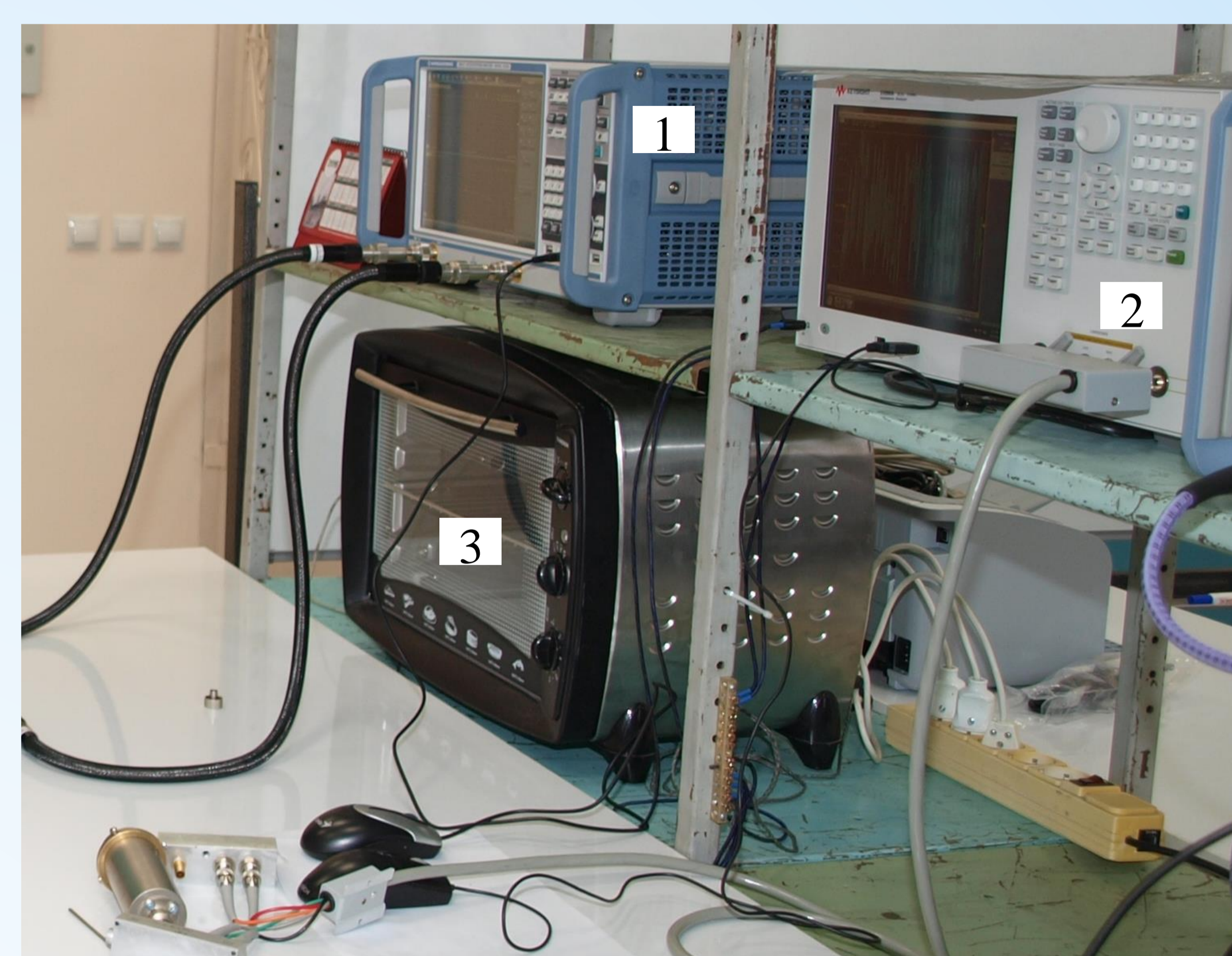


# \* Лабораторные установки



Установка для диэлектрических измерений в диапазоне частот 42 Гц– 8,5 ГГц

- 1 – измеритель LCR 3532-50 HiTESTER;
- 2 – векторный анализатор параметров цепей Rohde & Schwarz ZNB8;
- 3 – климатическая камера TH-ME

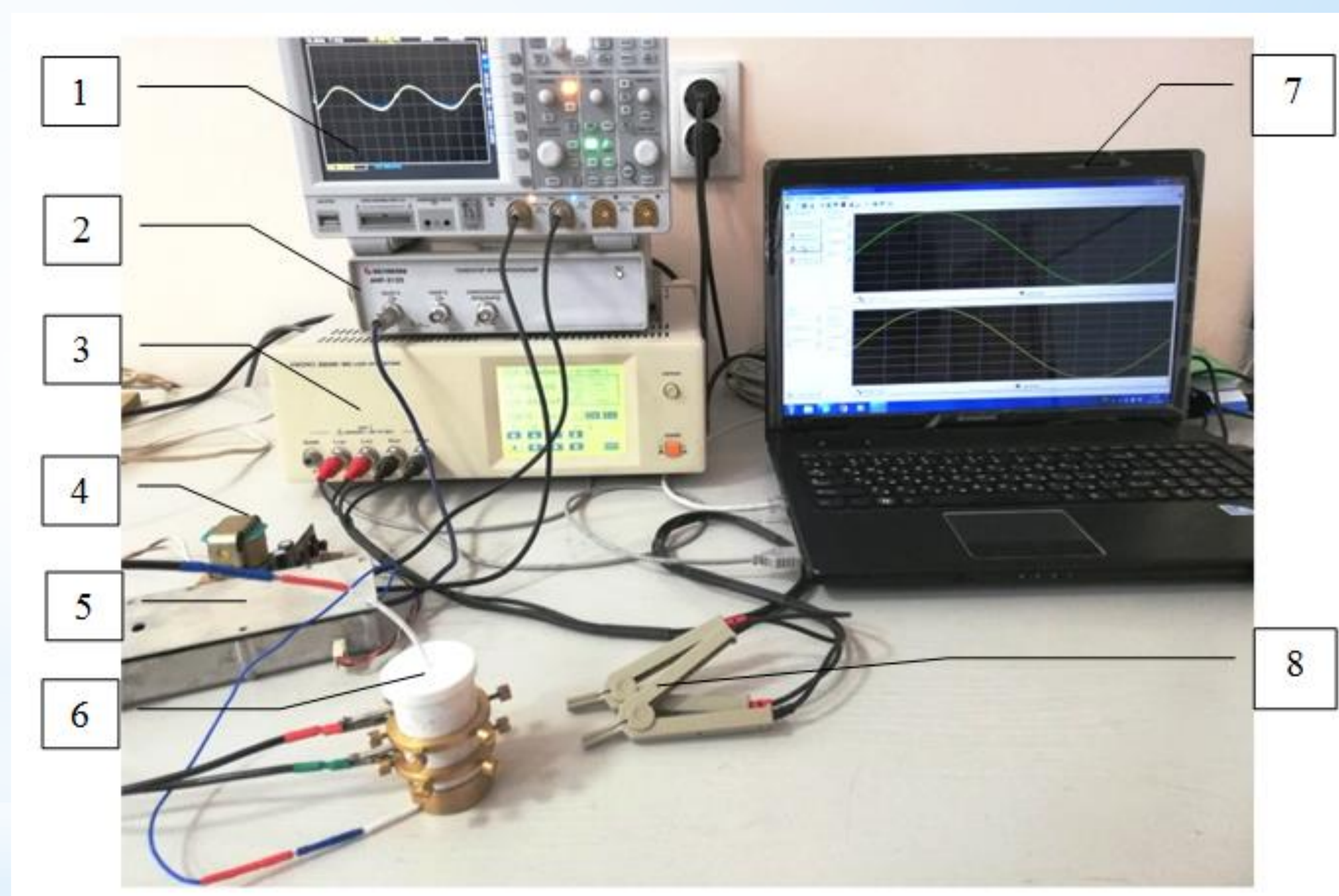


Установка для диэлектрических измерений в диапазоне частот 20 Гц– 20 ГГц

- 1 – векторный анализатор параметров цепей Rohde & Schwarz ZNB20;
- 2 – анализатор импедансов Keysight Technologies E4990A;
- 3 – термостат



Аппаратно-методический комплекс для исследования петрофизических характеристик пород методом ядерного магнитного резонанса (ЯМР-релаксометр Хроматек Протон 20 М)



Установка для проведения измерений 5-ти электродным методом



\* Спасибо за внимание!