

А.Д. ТАЛАЛОВ, Д.С. ДАЕВ

ВЗАИМОСВЯЗЬ ЧАСТОТНОЙ ДИСПЕРСИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГОРНЫХ ПОРОД С ИХ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Приведены результаты экспериментального исследования взаимосвязи частотных зависимостей диэлектрической проницаемости и удельного электрического сопротивления различных по составу пород в диапазоне частот $10-10^9$ Гц. Рассмотрено влияние глинистости, пиритизации, минерализации поровой жидкости и других петрофизических факторов на электрические свойства пород и характер их изменения с частотой поля.

Горные породы, как правило, являются сложными гетерогенными системами, содержащими некоторое количество жидкой и твердой фазы. Электрические свойства таких систем (диэлектрическая проницаемость ϵ и удельное электрическое сопротивление ρ) зависят от множества физико-химических факторов, включая частоту поля. Составляющие полной (комплексной) электропроводности пород (ϵ и ρ) по-разному изменяются с частотой поля в зависимости от вещественного состава пород, их текстурных особенностей и фильтрационно-емкостных свойств. Таким образом, как значения электропроводности и диэлектрической проницаемости на определенной частоте, так и характер изменения ϵ и ρ с частотой поля (частотная дисперсия) содержат ценную и взаимодополняющую информацию о составе и свойствах пород.

В общем случае зависимость ϵ и ρ от частоты поля связана с инерционностью процессов переноса носителей электрических зарядов. На разных участках частотного диапазона эта зависимость обусловлена различными физическими явлениями и процессами. Известны несколько основных механизмов, обуславливающих появление частотной дисперсии электрических свойств. Это — поляризация электронного или ионного смещения, структурный механизм дисперсии, характерный для многокомпонентных систем с неоднородным строением и различные электрохимические явления, в частности, поляризация двойных электрически слоев на границе раздела жидкость—твердое вещество и частично обратимые электрохимические реакции, приводящие к образованию новых химических соединений. При увеличении частоты поля, когда время установления указанных процессов становится соизмеримым с периодом электромагнитных колебаний, наблюдается более или менее плавное понижение значений удельного электрического сопротивления и диэлектрической проницаемости вещества. Наиболее медленными (инерционными) процессами являются частично обратимые электрохимические реакции и структурная поляризация [4]. Наиболее распространенный тип электрохимических реакций — окислительно-восстановительные реакции, приводящие к образованию тонких

плохопроводящих пленок на поверхности раздела между поровым раствором и минеральными зернами, обладающими электронным типом проводимости.

Структурный механизм дисперсии заключается в поляризации поверхности раздела между частицами породы, обладающими различной электропроводностью. Главной особенностью данного вида частотной дисперсии является участие обычной (сквозной) электропроводности в процессе поляризации поверхностей раздела (эффект Максвелла—Вагнера). Оба механизма (электрохимический и структурный) проявляются при достаточно низких частотах поля, когда тангенс угла потерь ($\text{tg}\delta$) близок или превышает 1, и могут приводить к возникновению аномально высоких низкочастотных значений диэлектрической проницаемости, которые намного превышают ϵ отдельных породообразующих минералов¹. Повышение частоты поля ($\text{tg}\delta < 1$) приводит к увеличению плотности емкостных токов (токов смещения), при этом в водосодержащих породах извилистость поровых каналов и наличие в них тонких изолирующих перегородок перестают существенно влиять на величину и направление тока, что приводит к уменьшению эффективных значений ρ и ϵ .

Частотная дисперсия, обусловленная инерционностью процессов ионной и электронной поляризации породообразующих минералов, начинает проявляться только при очень высоких (порядка 1000 МГц) частотах поля [5]. В диапазоне более низких частот электрические свойства подавляющего большинства породообразующих минералов частотной дисперсии не подвержены. Таким образом, можно полагать, что изучение частотных зависимостей электрических свойств может оказаться весьма полезным для получения сведений о вещественном составе и структурных особенностях горных пород. Однако применение данного метода требует более детального изучения коли-

¹ $\text{tg}\delta = 1/(\omega \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot \rho)$, где ω — угловая частота поля; $\epsilon_0 = 8,85416 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; ρ — эффективное удельное сопротивление на частоте ω , включающее все виды тепловых потерь, а также обычную и поверхностную проводимость, характеризует отношение плотностей токов проводимости и токов смещения в веществе.

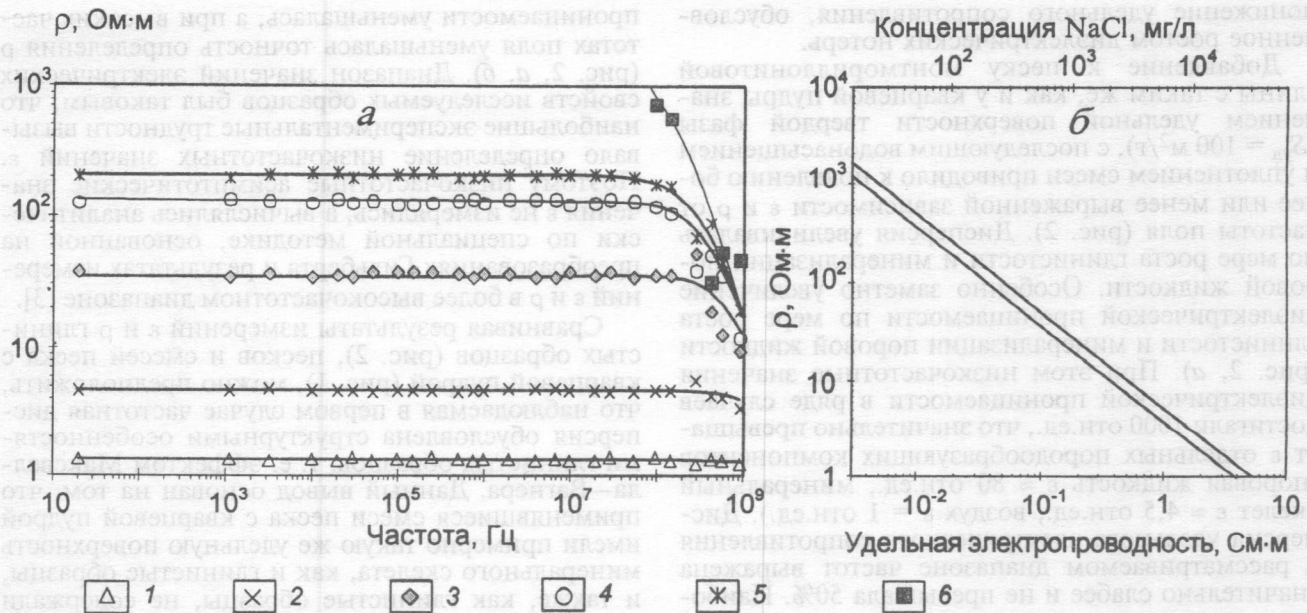


Рис. 1. Зависимости ρ от частоты поля для искусственных образцов песка ($0,25 < d < 0,4$ мм) и смесей песка с кварцевой пудрой при различных значениях удельного сопротивления поровой жидкости (ρ_1). Полное насыщение раствором хлористого натрия. Коэффициент пористости 30–40%. 1–5 — ρ_1 , Ом·м: 1—0,3; 2—1,07; 3—8,2; 4—32; 5—51; 6 — дистиллированная вода (а); осредненная зависимость эффективного удельного сопротивления песков ($\rho_{\text{эфф}}$) от концентрации NaCl и электропроводности порового раствора (б)

ественных характеристик и частотных границ отдельных механизмов дисперсии, а также их взаимосвязи с различными петрофизическими параметрами.

Для решения данной задачи и выяснения роли отдельных факторов, обуславливающих наиболее существенные изменения электрических свойств пород от частоты поля, предприняты лабораторные исследования электрических свойств ряда искусственных образцов и образцов керна в частотном диапазоне 10 – 10^9 Гц. Измерения на различных участках частотного диапазона осуществлялись по различным методикам с помощью различной измерительной аппаратуры. Измерения ϵ и ρ образцов в диапазоне 10^3 – $1,5 \cdot 10^8$ Гц проводились с помощью высокочастотного моста ВМ-431Е по методу вариации межэлектродных расстояний. В диапазоне частот 10^8 – 10^9 Гц применялись измеритель комплексных коэффициентов передачи трактов Р4-11 и специальная коаксиальная линия, снабженная устройством для уплотнения образцов. Кроме того, для определения низкочастотных значений диэлектрической проницаемости в ряде случаев использовались четырехэлектродная установка и специальная методика расчета ϵ , основанная на привлечении результатов измерений комплексного сопротивления при более высоких частотах поля. Все измерения выполнялись в термостатированном воздушном потоке ($25 \pm 0,3^\circ\text{C}$) при давлении на образец 2 МПа. Для эталонирования измерительных установок и насыщения образцов применялись водные растворы хлористого натрия и дистиллированная вода. В результате выявлено несколько видов частотных зависимостей, характерных для различных типов пород.

В наименьшей степени зависимость электрических свойств от частоты поля проявляется у водонасыщенных песков без примесей глины и

электроннопроводящих минералов (рис. 1, а). Для измерений использовали хорошо отмытый и фракционированный кварц-полевошпатовый песок ($0,25 < d < 0,4$ мм). Также искусственно изменялась удельная поверхность образцов (от 0,1 до $100 \text{ м}^2/\text{г}$) за счет добавок кварцевой пудры («белой сажи») с удельной поверхностью твердой фазы $S_{\text{уд}} = 100 \text{ м}^2/\text{г}$ и маршаллита ($S_{\text{уд}} = 10 \text{ м}^2/\text{г}$). Во всех образцах данного состава диэлектрическая проницаемость определялась только объемной влажностью и составляла 20–25 отн.ед. Зависимости ϵ от минерализации поровой жидкости, удельной поверхности минерального скелета, или частоты поля не установлены. Заметное изменение ρ от частоты поля наблюдалось только на частотах выше 100 МГц и было обусловлено дисперсией электрических свойств свободных растворов, применявшихся для насыщения образцов [1]. На более низких частотах (частотная дисперсия отсутствует), зависимость ϵ и ρ породы от электрических свойств отдельных породообразующих компонентов хорошо согласовывалась с известным уравнением Оделевского при значении структурного коэффициента 2,3.

Данное уравнение позволяет рассчитать содержание и удельное сопротивление воды в песках по измеренным значениям ϵ и ρ . Пользуясь зависимостью приведенной на рис. 1, б, можно определить минерализацию порового раствора. Исключение составляют образцы с высокими значениями $S_{\text{уд}}$ и очень малыми (нехарактерными для естественных условий) концентрациями соли. Для таких образцов отсутствует пропорциональная взаимосвязь между удельным сопротивлением свободных растворов, применявшихся для насыщения, и удельным сопротивлением породы. Кроме того, на частотах выше 100 МГц наблюдалось более значительное, нежели в чистых песках,

понижение удельного сопротивления, обусловленное ростом диэлектрических потерь.

Добавление к песку монтмориллонитовой глины с таким же, как и у кварцевой пудры значением удельной поверхности твердой фазы ($S_{уд} = 100 \text{ м}^2/\text{г}$), с последующим водонасыщением и уплотнением смеси приводило к появлению более или менее выраженной зависимости ϵ и ρ от частоты поля (рис. 2). Дисперсия увеличивалась по мере роста глинистости и минерализации поровой жидкости. Особенно заметно увеличение диэлектрической проницаемости по мере роста глинистости и минерализации поровой жидкости (рис. 2, а). При этом низкочастотные значения диэлектрической проницаемости в ряде случаев достигали 1000 отн.ед., что значительно превышает ϵ отдельных породообразующих компонентов (поровая жидкость $\epsilon \approx 80$ отн.ед., минеральный скелет $\epsilon \approx 4,5$ отн.ед., воздух $\epsilon = 1$ отн.ед.). Дисперсия удельного электрического сопротивления в рассматриваемом диапазоне частот выражена значительно слабее и не превышала 50%. Наиболее существенные изменения ρ соответствовали высокоомным образцам и наблюдались только при высоких частотах поля, когда параметр $\text{tg}\delta$ не превышал 1.

проницаемости уменьшалась, а при высоких частотах поля уменьшалась точность определения ρ (рис. 2, а, б). Диапазон значений электрических свойств исследуемых образцов был таковым, что наибольшие экспериментальные трудности вызывало определение низкочастотных значений ϵ . Поэтому низкочастотные асимптотические значения ϵ не измерялись, а вычислялись аналитически по специальной методике, основанной на преобразованиях Гильберта и результатах измерений ϵ и ρ в более высокочастотном диапазоне [3].

Сравнивая результаты измерений ϵ и ρ глинистых образцов (рис. 2), песков и смесей песка с кварцевой пудрой (рис. 1), можно предположить, что наблюдаемая в первом случае частотная дисперсия обусловлена структурными особенностями глинистых образцов, т. е. эффектом Максвелла—Вагнера. Данный вывод основан на том, что применявшиеся смеси песка с кварцевой пудрой имели примерно такую же удельную поверхность минерального скелета, как и глинистые образцы, и также, как глинистые образцы, не содержали каких-либо металлических примесей, способствующих возникновению электрохимических процессов. Кроме того, взаимосвязь между ϵ , ρ , минерализацией и частотой поля для глинистых об-

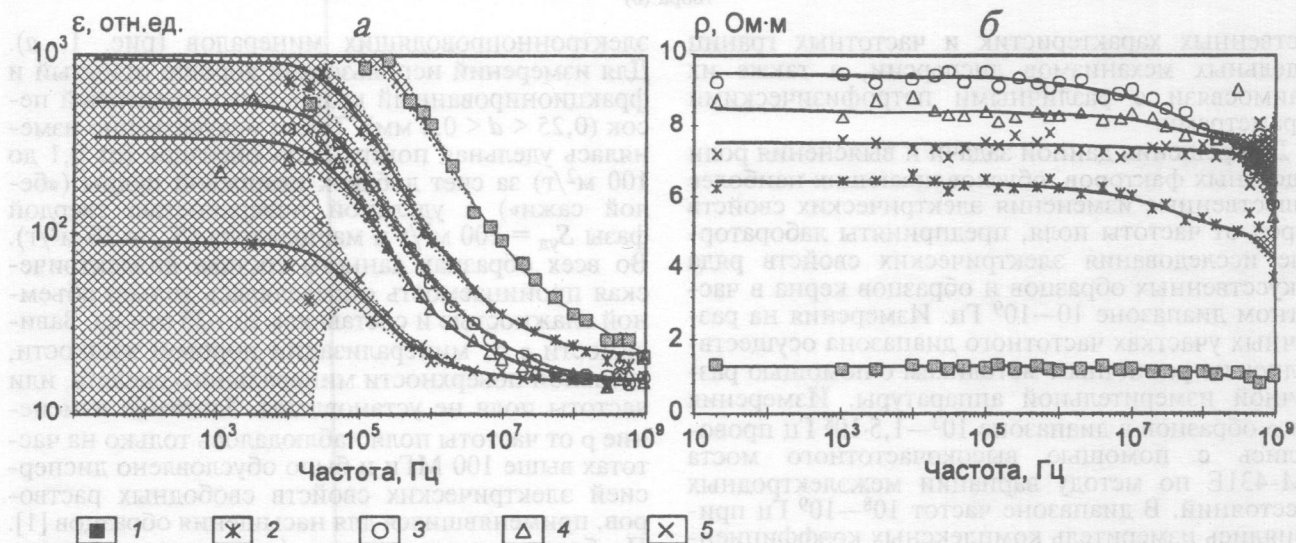


Рис. 2. Частотные зависимости диэлектрической проницаемости (а) и удельного электрического сопротивления (б) для смесей монтмориллонитовой глины ($S_{уд} = 100 \text{ м}^2/\text{г}$) с песком ($0,25 < d < 0,4 \text{ мм}$) при различных значениях глинистости (по весу) и удельном сопротивлении поровой жидкости (ρ_1): 1 — глина, v 37,3%, $C_{гг}$ 100%, $K_{п}$ 37,3%, ρ_1 0,22 Ом-м; 2 — суглинок, v 34,3%, $C_{гг}$ 60%, $K_{п}$ 34,4%, ρ_1 1,07 Ом-м; 3 — суглинок, v 23,4%, $C_{гг}$ 34%, $K_{п}$ 23,4%, ρ_1 1,07 Ом-м; 4 — суглинок, v 23,2%, $C_{гг}$ 17%, $K_{п}$ 23,2%, ρ_1 1,07 Ом-м; 5 — суглинок, v 23,5%, $C_{гг}$ 5%, $K_{п}$ 27,1%, ρ_1 1,07 Ом-м

Следует отметить, что вследствие влияния поверхностной проводимости применение высокоомных растворов для насыщения образцов, обладающих значительной удельной поверхностью минерального скелета, не приводит к соответствующему увеличению их удельных сопротивлений. Поэтому для насыщения глинистых образцов растворы с концентрацией выше 0,085 н ($\rho_в = 1,07 \text{ Ом-м}$) не применялись.

Точность измерения ϵ и ρ на различных участках частотного диапазона не одинакова и также определялась значением параметра $\text{tg}\delta$. В случае низких частот и при высоких значениях минерализации точность измерения диэлектрической

разцов находится в полном соответствии с моделью слоистой гетерогенной среды, предложенной Максвеллом [4].

Плавный характер дисперсионных кривых, наблюдаемый в песчано-глинистых смесях (рис. 2), проявляется не во всех глинистых породах. В некоторых случаях (глинистые песчаники, глины с неполным водонасыщением) на дисперсионных кривых отмечались более или менее ярко выраженные изломы (рис. 3).

Как и в рассмотренных выше случаях, компонентный состав данных образцов представлял инертную в электрохимическом отношении систему, состоящую из твердого диэлектрика и хоро-

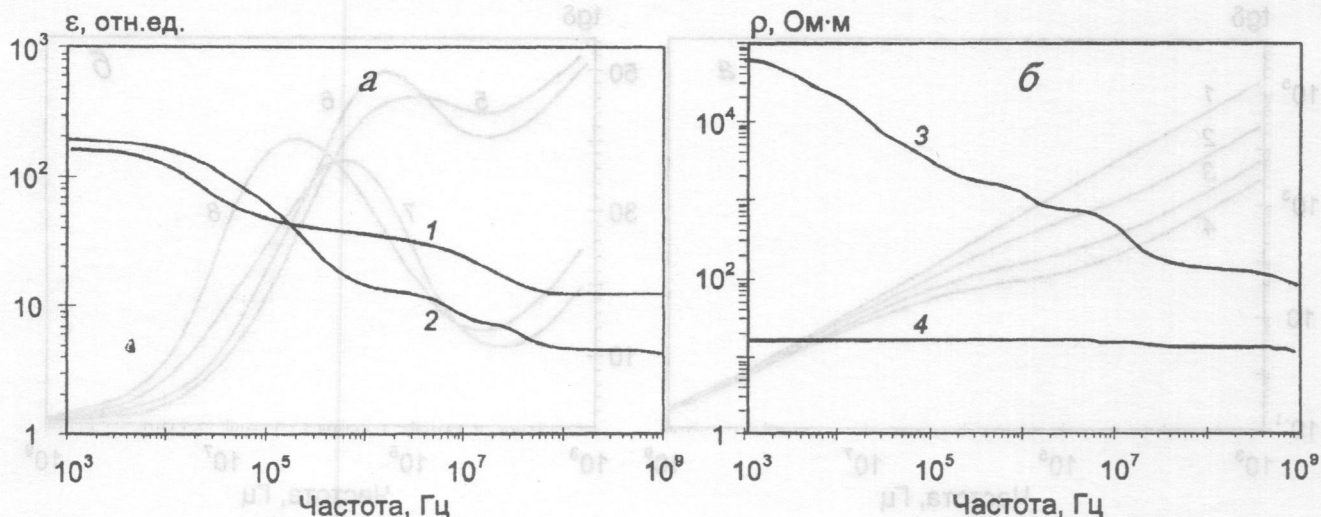


Рис. 3. Частотные зависимости диэлектрической проницаемости (а) и удельного электрического сопротивления (б) глинистого песчаника и монтмориллонитовой глины с гигроскопическим значением влажности: 1, 4 — песчаник глинистый, глубина 1900 м, K_{II} 19,4%, $C_{гл}$ 15,5%, $K_{пр}$ $578 \cdot 10^{-3}$ мкм², ρ_B 1,07 Ом·м; 2, 3 — глина, v 5,8%, K_{II} 47%

шо проводящего порового флюида. Увеличение минерализации насыщающего раствора в образце песчаника, также как и в искусственных песчано-глинистых смесях, приводило к росту низкочастотных значений ϵ . При этом высокочастотные значения диэлектрической проницаемости практически не изменялись. Таким образом, можно полагать, что и в данном случае дисперсия электрических свойств обусловлена структурным механизмом Максвелла—Вагнера, а наблюдаемая на дисперсионных кривых серия волнообразных изгибов связана с более дискретным по сравнению с водонасыщенными песчано-глинистыми смесями распределением геометрических характеристик порового пространства. Можно предположить, что более детальное изучение данного явления позволит установить количественную взаимосвязь между рядом важнейших петрофизических характеристик пород, зависящих от их структурных особенностей (например коллекторские свойства) и формой дисперсионных кривых ϵ и ρ .

Другая группа пород, обнаруживающая весьма существенную зависимость электрических свойств от частоты поля, содержит помимо поровой жидкости и плохопроводящих минералов электронно-проводящую (металлическую) вкрапленность. Одним из наиболее распространенных геологических процессов, приводящих к появлению в породах такой вкрапленности, является пиритизация. Влияние пиритизации на электрические свойства пород изучено на искусственных образцах путем добавления к пескам и песчано-глинистым смесям растертого в порошок и фракционированного ($d < 0,25$ мм) пиритового порошка. Затем полученные смеси насыщались водными растворами NaCl и уплотнялись в измерительных ячейках аналогично рассмотренным выше образцам песков и песчано-глинистых смесей. Проводились также исследования ряда образцов пиритизированного зерна с ненарушенной структурой.

Общая форма дисперсионных кривых, а также характер изменения ϵ и ρ от содержания и минерализации поровой жидкости для пиритизиро-

ванных образцов аналогичны таковым глинисты образцов. Однако увеличение концентрации пирита в «чистых» (неглинистых) песках приводит к значительному увеличению низкочастотных значений диэлектрической проницаемости. Например, добавление к водонасыщенному песку 2% пиритового порошка (по весу сухого вещества) увеличило низкочастотные значения ϵ от 20 до 10^3 отн.ед. При этом пиритизация как глинистых, так и «чистых» образцов всегда приводила к увеличению низкочастотных значений диэлектрической проницаемости и понижению удельного сопротивления. Таким образом, как значения ϵ и ρ , так и характер их зависимости от частоты поля не позволяют однозначно судить о причинах частотной дисперсии, которая может быть обусловлена либо влиянием глинистости, либо присутствием электропроводящей вкрапленности, либо совместным действием обоих данных факторов. Тем не менее фундаментальное различие физических механизмов, лежащих в основе частотной дисперсии электрических свойств глинистых и пиритизированных пород, отражено в существенном отличие частотных зависимостей параметра $\text{tg}\delta$ (рис. 4).

Они для песков и суглинков имеют более или менее плавную форму (рис. 4, а). Значения $\text{tg}\delta$ монотонно увеличиваются при понижении частоты поля, минерализации порового раствора и степени глинистости. Напротив, частотные зависимости $\text{tg}\delta$ для пиритизированных образцов (как «чистых», так и глинистых) характеризуются наличием двух экстремумов, проявляющихся в диапазоне частот от 10^4 до $3 \cdot 10^6$ Гц. При этом амплитуда данных экстремумов («размах») пропорциональна содержанию электропроводящей вкрапленности (рис. 4, б). В общем случае экстремумы на частотных зависимостях параметра $\text{tg}\delta$ появляются, когда время становления тех или иных процессов, обуславливающих накопление и отдачу электрической энергии становится соизмеримым с периодом электромагнитного поля. Структурный механизм дисперсии (Максвелла—Вагнера) в принципе может проявляться при любых частотах поля. Электротехнический аналог

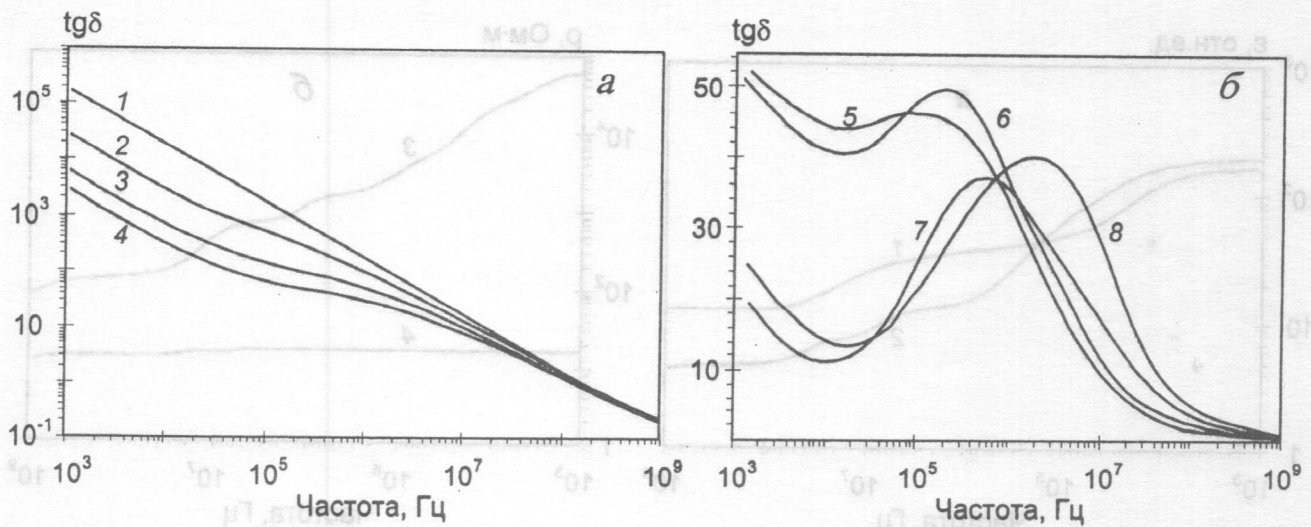


Рис. 4. Частотные зависимости параметра $\text{tg}\delta$ для песчано-глинистых образцов без примесей пирита (а) и с искусственной пиритизацией (б), при различных значениях глинистости ($C_{\text{гл}}$), объемной влажности (v), концентрации пирита ($C_{\text{п}}$) и удельном сопротивлении поровой жидкости ($\rho_{\text{в}}$): 1 — песок, v 35%; 2 — суглинок, $C_{\text{гл}}$ 5%, v 23,5%, $\rho_{\text{в}}$ 1,07 Ом·м; 3 — суглинок, $C_{\text{гл}}$ 17%, v 23,2%, $\rho_{\text{в}}$ 1,07 Ом·м; 4 — суглинок, $C_{\text{гл}}$ 60%, v 34,3%, $\rho_{\text{в}}$ 1,07 Ом·м; 5 — суглинок, $C_{\text{гл}}$ 81,3%, $C_{\text{п}}$ 1,9%, v 33,5%, $\rho_{\text{в}}$ 1,07 Ом·м; 6 — песок, v 32,5%, $C_{\text{п}}$ 8,2%, $\rho_{\text{в}}$ 1,07 Ом·м; 7 — песок, v 39,3%, $C_{\text{п}}$ 23%, насыщение дистиллированной водой; 8 — суглинок, $C_{\text{гл}}$ 36%, $C_{\text{п}}$ 24%, v 34,2%, $\rho_{\text{в}}$ 1,07 Ом·м

данного процесса — перезарядка конденсатора через последовательно включенный резистор. В горной породе роль указанных элементов могут играть поровые каналы, заполненные жидкостью, и стенки пор, состоящие из минералов с высоким электрическим сопротивлением. Действие этого механизма не связано с инерционностью процессов поляризации породообразующих минералов. Вероятно, это объясняет отсутствие экстремумов на частотных зависимостях $\text{tg}\delta$ у глинистых пород. Электрическое поле в пиритизированных породах может вызывать различные частично обратимые электрохимические реакции на границе раздела твердых и жидких проводников. В частности, это могут быть окислительно-восстановительные реакции, приводящие к образованию тонких плохопроводящих окисных пленок на поверхности пиритовых зерен, толщина которых изменяется в соответствии с периодом электрического поля. Электрохимические процессы обладают значительной инерционностью и практически не проявляются на частотах выше нескольких мегагерц [2]. Можно предположить, что зависимость электрических параметров от частоты поля, наблюдаемая в пиритизированных породах, вызвана совместным действием обоих механизмов дисперсии. Тонкие пленки окислов на поверхности пиритовых зерен и токопроводящая поровая жидкость обуславливают проявление эффекта Максвелла—Вагнера и соответствующей частотной дисперсии ϵ и ρ в широком частотном диапазоне даже в «чистых», неглинистых, породах. Электрохимические реакции, время становления которых соответствует частотам поля, на которых наблюдаются экстремумы параметра $\text{tg}\delta$, способствуют дисперсии в низкочастотном диапазоне, в частности, увеличению низкочастотных значений ϵ до 10^5 отн.ед. и выше. Таким образом, наличие характерных экстремумов на частотных зависимостях $\text{tg}\delta$ является характерным признаком присутствия в водосодержащих породах электрон-проводящей вкрапленности.

Выводы

1. Изучение характера зависимости ϵ и ρ от частоты поля (формы дисперсионных кривых) позволяет судить о структурных особенностях породы, содержании глинистых частиц и электрон-проводящей вкрапленности.
2. Обнаруживаемая в ряде случаев волнообразная форма дисперсионных кривых, по-видимому, обусловлена более или менее дискретным характером распределения геометрических размеров пор по их радиусам.
3. Электрические свойства «чистых» водонасыщенных песков и других относительно грубодисперсных пород не зависят от частоты поля, вплоть до частот порядка нескольких сотен мегагерц, на которых начинают изменяться электрические свойства свободных водных растворов.
4. Электрические свойства глинистых и пиритизированных образцов значительно зависят от частоты поля, которая увеличивается с ростом глинистости и минерализации поровой жидкости. При этом характерным признаком пиритизации является наличие экстремумов на частотных зависимостях параметра $\text{tg}\delta$. Экстремумы проявляются в частотном диапазоне 10^4 — $3 \cdot 10^6$ Гц. Амплитуда данных экстремумов пропорциональна содержанию электропроводящей вкрапленности, а максимальные значения и частотный диапазон связаны с минерализацией поровой жидкости и удельной поверхностью зерен.
5. В области высоких частот, когда параметр $\text{tg}\delta < 1$, диэлектрическая проницаемость водосодержащих пород определяется их значениями объемной влажности и практически не зависит от минерализации влаги и ϵ отдельных породообразующих минералов. Для «чистых» песков это вывод справедлив и для низких частот (когда $\text{tg}\delta > 1$).
6. Таким образом, изучение формы дисперсионных кривых предоставляет широкие возможно-

сти для геологической и петрофизической интерпретации результатов геофизических исследований, позволяет судить о структурных особенностях породы, степени ее глинистости, а также о

наличии и концентрации электронно-проводящей вкрапленности.

Работа выполнена при поддержке РФФИ грант 02-05-65079, гранта Минобразования РФ Е 02-8.0-66 и ФЦП «Интеграция», проект Б-055.

ЛИТЕРАТУРА

1. А х а д о в Я. Ю. Диэлектрические свойства бинарных растворов М.: Наука, 1987. 120 с.
2. З а р и н с к и й В. А., Е р м а к о в В. И. Высокочастотный химический анализ. М.: Наука, 1975. 187 с.
3. К а р и н с к и й А. Д., Д а е в Д. С., С в е т о в Б. С., Т а л а л о в А. Д. Определение диэлектрической проницаемости горных пород по частотным зависимостям удельного электрического сопротивления на основе преобразования Гильберта // Изв. вузов. Геология и разведка. 1997. № 5. С. 76—82.
4. Ч е л и д з е Т. Л., Д е р е в е н к о А. И., К у р и л е н к о О. Д. Электрическая спектроскопия гетерогенных систем. Киев: Наук. думка, 1977. 257 с.
5. S e n P. N., C h e w W. C. The frequency dependant dielectric and conductivity response of sedimentary rocks // J. Microwave Power. 1983. V. 18 (1). P. 95—105.

Московский государственный геологоразведочный университет
Рецензент — А. Д. Каринский

УДК 550.830

А. И. КОБРУНОВ

ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЕ МОДЕЛИ КОМПЛЕКСНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Рассмотрены теория и методы создания технологий комплексной интерпретации геофизических данных и построения интегрированных, гравитационно сбалансированных моделей геологических сред. Изучены три базовых формы постановки задачи восстановления плотностной модели сложнопостроенных объектов: пассивная, активная, геодинамическая. Выведены интегро-дифференциальные представления оптимальных решений и сконструированы их итерационные процессы решения.

Эквивалентность в восстановлении плотностных моделей

В нефтегазовой геологии исключительно информативный поисковый признак — плотностная характеристика разреза. Выявление зон локальных плотностных неоднородностей весьма актуальная, востребованная практикой ГРП задача. Это стимулирует появление значительного числа методов реконструкции по гравиметрическим данным плотностных моделей или некоторых не всегда осознанных их трансформаций. Отсутствие должного анализа эквивалентности, присущей этой задаче, ведет к ошибочным результирующим построениям. Достаточное число подобного рода примеров приведено в [1]. Современный уровень развития вычислительной техники делает достижимыми весьма трудоемкие и «прямолинейные» алгоритмы. В этой связи необходимо напомнить некоторые результаты по эквивалентности при реконструкции плотностных распределений по гравиметрическим данным [9]. Это необходимо, чтобы предостеречь от поспешности в выводах и иллюзий относительно результатов, полученных

вне углубленного интегрированного анализа всего комплекса данных.

Будем использовать прямоугольную декартову систему координат XYZ с осью OZ , направленной вниз, к массам, и плоскостью XOY , которую обозначим E_0 , локально совмещенной с дневной поверхностью, на которой задана вертикальная производная гравитационного потенциала $U_z(x_0, y_0)$, $\{x_0, y_0 \in E_0\}$. Если обозначить V область, целиком лежащую в нижнем полупространстве $E_- (z < 0)$, в которой распределены массы с плотностью $\sigma^* = \sigma(x, y, z)$, то

$$\frac{U_z(x_0, y_0)}{\gamma} = \iiint_V \frac{\sigma(x, y, z) z dx dy dz}{[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + z^2]^{3/2}}, \quad (1)$$

где γ — гравитационная постоянная.

Обобщение этого соотношения на случай поля, заданного фрагментарно либо на некоторой поверхности в E_+ ($z > 0$) с точки зрения проявления эквивалентности в решении уравнения (1) усугубляет дело.

Следующий результат дает явное аналитическое и простое решение для задачи обращения (1) при области V , совпадающей с E_+ :