

Т. А. Янушенко^{1✉}, Н. А. Голиков¹

Зависимость поверхностной релаксивности от типа глинистости и удельной поверхности по данным ЯМР-релаксометрии

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН), г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: YanushenkoTA@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Поверхностная релаксивность является необходимым параметром для успешного получения распределения пор по размерам из спектров времен поперечной релаксации ядерно-магнитной резонансной (ЯМР) релаксометрии. К сожалению, сложность в определении поверхностной релаксивности для каждого образца и ее неоднозначная зависимость от минералогического состава не позволяет корректно получать распределение пор по размерам. В работе проведены ЯМР эксперименты с оценкой поверхностной релаксивности для искусственных насыпных образцов различных видов глин и для образцов керна Южно-Покамасовского месторождения. Для искусственных насыпных образцов глин получена логарифмическая зависимость поверхностной релаксивности от удельной поверхности. Для реальных образцов керна такой очевидной зависимости зафиксировано не было, однако образцы хорошо делятся на группы методом k-средних по таким параметрам как глинистость, удельная поверхность, коэффициент проницаемости и средневзвешенное значение времени поперечной релаксации. Зависимости поверхностной релаксивности от глинистости и удельной поверхности внутри групп не обнаружено, однако по мере увеличения проницаемости поверхностная релаксивность уменьшается.

Ключевые слова: ядерный магнитный резонанс, поверхностная релаксивность, удельная поверхность, глинистость

T. A. Yanushenko^{1✉}, N. A. Golikov¹

Dependence of surface relaxivity on the type of clay content and specific surface area according to NMR relaxometry data

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (IPGG SB RAS), Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: YanushenkoTA@ipgg.sbras.ru

Abstract. Surface relaxivity is a necessary parameter for successfully obtaining pore size distributions from transverse relaxation time spectra of nuclear magnetic resonance (NMR) relaxometry. Unfortunately, the complexity of determining surface relaxivity for each sample and its ambiguous dependence on mineralogical composition prevents accurate pore size distributions. In this study, NMR experiments were conducted to evaluate surface relaxivity for artificial bulk samples of various clay types and for core samples from the Yuzhno-Pokamasovskoye deposit. For artificial bulk clay samples, a logarithmic dependence of surface relaxivity on specific surface area was obtained. No such obvious dependence was observed for real core samples; however, the samples are easily divided into groups using the k-means method based on parameters such as clay content, specific surface area, permeability coefficient, and weighted average transverse relaxation time. No dependence of surface relaxivity on clay content and specific surface area within groups was found, however, as permeability increases, surface relaxivity decreases.

Keywords: nuclear magnetic resonance, surface relaxivity, specific surface area, clay content

Введение

В последние несколько десятков лет метод ядерно-магнитной резонансной (ЯМР) релаксометрии приобрел широкое применение для получения коэффициентов общей и эффективной пористости, а также для оценки коэффициента проницаемости и доли свободного и связанного флюида. Помимо этого спектры времен поперечной релаксации позволяют оценивать в первом приближении структуру порового пространства [1], что является одной из важнейших характеристик структуры порового пространства.

На скорость поперечной релаксации влияют 3 процесса (формула 1) – объемная релаксация, поверхностная релаксация и релаксация, вызванная диффузией в присутствии градиентов магнитного поля. В нашем исследовании работа прибора осуществлялась в постоянном магнитном поле, поэтому диффузионной составляющей можно пренебречь. Объемной релаксацией в поровом пространстве также можно пренебречь. Тогда основной вклад будет вносить поверхностная релаксация. Она в свою очередь зависит от двух переменных – удельной поверхности и поверхностной релаксивности (формула 2) [1]

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_{2 \text{ bulk}}} + \frac{1}{T_{2 \text{ surface}}} + \frac{1}{T_{2 \text{ diffusion}}} \quad (1)$$

$$\frac{1}{T_2} \approx \frac{1}{T_{2 \text{ surface}}} \approx \rho \frac{S}{V} = \rho * S_{\text{уд}} \quad (2)$$

Для непосредственного перехода к распределению пор по размерам от спектра времен поперечной релаксации существует несколько моделей. Самыми распространенными из них являются модели цилиндрической формы пор и сферической. Для терригенных горных пород наиболее часто используют модель сферических форм пор:

$$r = 3\rho * T_2 \quad (2)$$

Таким образом, для получения распределения пор по размерам необходимо знать поверхностную релаксивность – свойство, определяющее интенсивность релаксационных процессов на границе порода-флюид. В виду сложности определения значения поверхностной релаксивности переход от спектров времен поперечной релаксации к распределению пор по размерам в большинстве случаев не используется. В случае неопределенности используют осредненное значение поверхностной релаксивности [2] или принимают ее равной 1 [3], что влечет за собой ошибки в определении распределения пор по размерам.

В литературных источниках данная проблематика освещена слабо, особенно в отечественных публикациях [4, 5]. В иностранной литературе информации содержится больше, но крупных статистических исследований не проводилось. Тем не менее исследователи указывают, что для большинства типов глин зависимость поверхностной релаксивности от содержания глинистых минералов

существует [6, 7]. Помимо этого, имеются исследования, показывающие связь поверхностной релаксивности и удельной поверхности [8].

Для уточнения этой связи в рамках нашего исследования были проведены эксперименты как на искусственных насыпных образцах разных типов глин, так и на образцах керна Южно-Покамасовского месторождения.

Методы и материалы

Работа была разделена на две части. В первой части объектом исследования являлись 5 искусственных насыпных образцов разного состава: гранулы кварцевого стекла (модель идеально круглых и гладких зерен), речная, каолиновая и монтмориллонитовая глины и крошка терригенных гнейсовых горных пород. Для проведения исследований одинаковое по объему количество материала засыпалось в стеклянные герметично закрывающиеся пробирки. В них с шагом 0,5 мл добавлялась вода до полного насыщения. На каждом шаге образец выдерживался 24 часа, чтобы вода равномерно распределилась в поровом пространстве. Для каждого образца была измерена удельная поверхность методом БЭТ и выполнены ЯМР-измерения.

Во второй части работы объектом исследования являлись 70 образцов керна Южно-Покамасовского месторождения. Для каждого образца имелась информация по удельной поверхности, глинистости, проницаемости и типу глинистости. Для полностью насыщенных образцов были получены спектры времен поперечной релаксации, после чего исходя из формулы 2 была проведена оценка поверхностной релаксивности и последующий анализ связей с другими характеристиками.

ЯМР-измерения проводились на ЯМР анализаторе с частотой резонанса 12 МГц (Nuimag, Китай), расстояние между эхо-импульсами составляло 100 мкс. Кластерный анализ результатов измерений на образцах керна проводился методом k-средних с использованием R-пакета factextra.

Результаты и обсуждение

По результатам измерения удельной поверхности разных типов глин (табл. 1) все образцы можно разделить на две группы: с высоким значением удельной поверхности (среднее значение $16 \text{ м}^2/\text{г}$) и с низким значением (среднее значение $0,84 \text{ м}^2/\text{г}$).

Таблица 1. Характеристики образцов разных типов глин

Образец	Плотность, г/см ³	Средний размер частиц, мкм	Удельная поверхность, м ² /г	T ₂ среднее геометрическое, мс	Поверхностная релаксивность, мкм/с
Гранулы кварцевого стекла	2,51	44	0,22	81,38	22,05
Речная глина	2,67	37	15,38	5,73	4,25
Монтмориллонитовая глина	2,67	9,25	18,57	8,29	2,43
Каолиновая глина	2,49	4,62	13,93	15,06	1,91
Крошка горной породы	2,77	31,11	1,46	11,42	21,58

По величине сдвига максимума спектра времен поперечной релаксации по мере насыщения водой образцы делятся на 2 группы – со слабым смещением (не более чем в 1,5 раза) и большим смещением (больше, чем в 1,5 раза). При этом значения удельной поверхности не коррелируют с величиной смещения максимумов.

Большие значения поверхностной релаксивности соответствуют гранулам кварцевого стекла и крошке горной породы (среднее значение 21,8 мкм/с). Глины же имеют малые значения поверхностной релаксивности (среднее значение 2,9 мкм/с). Таким образом, зависимость поверхностной релаксивности от удельной поверхности имеет логарифмический вид с коэффициентом корреляции 0,88 (рис.1). Увеличение удельной поверхности приводит к резкому уменьшению как времен поперечной релаксации, так и поверхностной релаксивности.

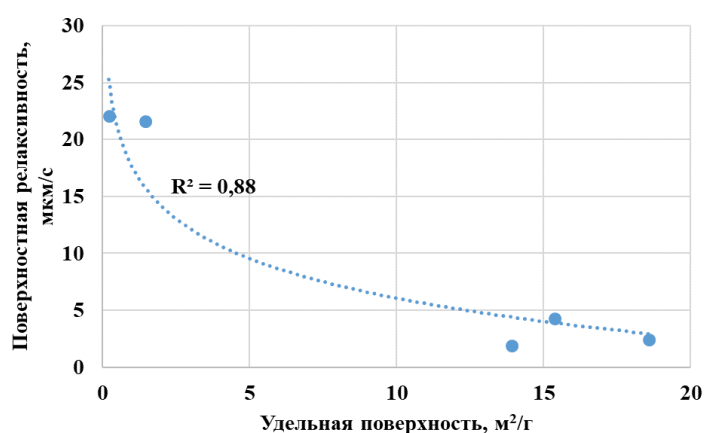


Рис. 1. Зависимость поверхностной релаксивности от удельной поверхности

Для образцов керна точных зависимостей полученной поверхностной релаксивности от удельной поверхности или глинистости обнаружено не было. Поэтому образцы были разбиты на 3 группы методом к-средних на основе параметров средневзвешенного времени поперечной релаксации, глинистости, удельной поверхности и проницаемости по газу (рис.2). Средние значения для каждой из групп приведены в таблице 2.

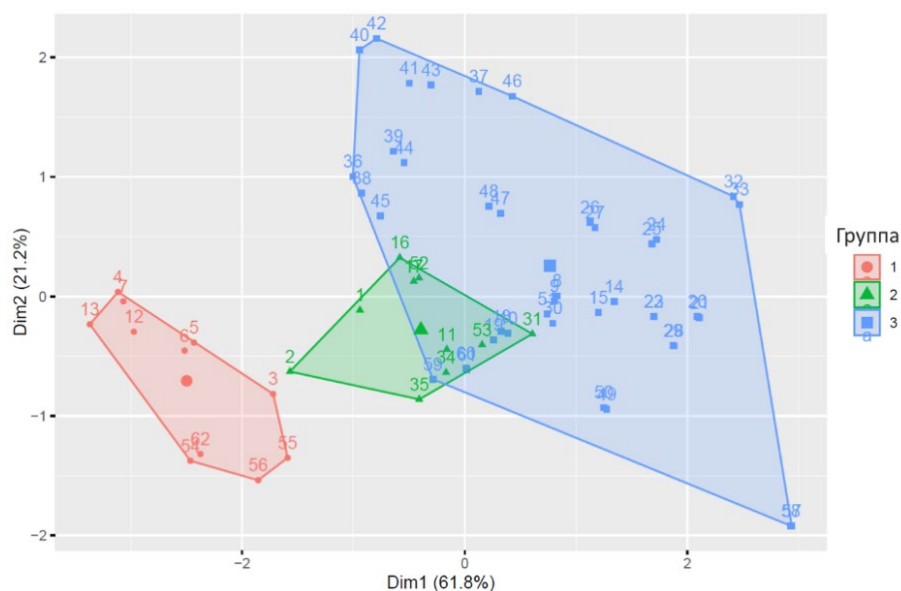


Рис. 2. Разбиение образцов на группы методом к-средних

Таблица 2. Средние значения параметров по группам

Группа	T ₂ среднегеометрическое, мс	Удельная поверхность, м ² /г	Глинистость, %	Проницаемость, мД
1	19,45	2,33	1,89	378,93
2	10,07	2,73	3,34	112,98
3	8	3,12	6,24	10,56

Группы значимо различаются по проницаемости, среднегеометрическому времени поперечной релаксации и глинистости (критерий Манна-Уини с поправкой Бенджамини-Хохберга, скорректированное значение $p < 0,05$). Удельная поверхность от группы к группе отличается слабо, что вероятно, связано с незначительными изменениями глинистости (среднее содержание глины в образцах керна составляет 5,5%).

При обработке данных расчетов поверхностной релаксивности явных зависимостей от удельной поверхности или глинистости не выявлено. При анализе зависимости поверхностной релаксивности от проницаемости можно с большой уверенностью выделить три группы точек (рис. 3). Большим значениям проницаемости, а соответственно, пониженному содержанию глинистости (среднее значение 378,9 мД) соответствуют малые значения поверхностной релаксивности (среднее значение 8,83 мкм/с), и наоборот, малым значениям проницаемости (среднее значение 10,56 мД) соответствуют большие значения поверхностной релаксивности (среднее значение 21,61 мкм/с).

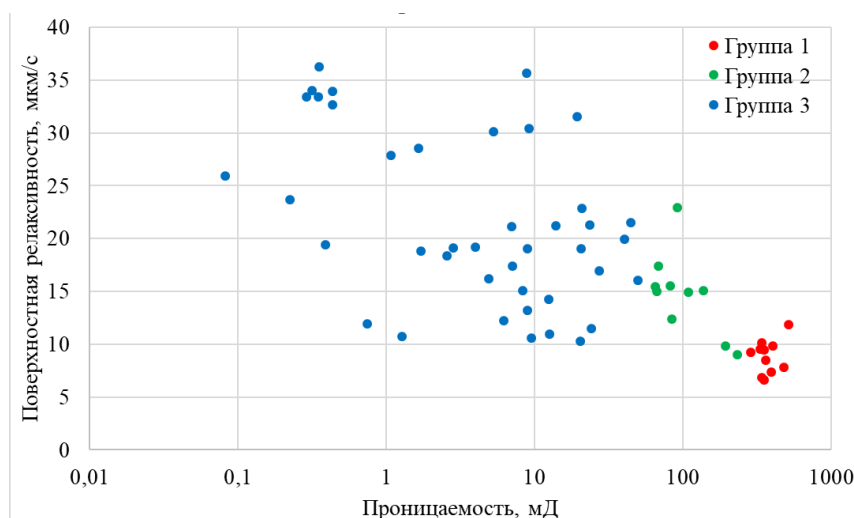


Рис. 3. Зависимость поверхностной релаксивности от проницаемости

Заключение

С целью расширения возможностей применения метода ЯМР-релаксометрии для изучения структуры порового пространства требуется точно определять поверхностную релаксивность. Показано, что для насыпных глинистых образцов существенное влияние оказывает удельная поверхность. Высокой удельной поверхности соответствуют малые значения поверхностной релаксивности. Для образцов керна Южно-Покамасовского месторождения связь поверхностная релаксивность-удельная поверхность не такая очевидная. Образцы достаточно явно разбиваются на группы по глинистости, проницаемости и средневзвешенному значению времен поперечной релаксации. Явной зависимости поверхностной релаксивности от удельной поверхности не было выявлено, однако анализ зависимости поверхностной релаксивности от проницаемости позволяет разбить образцы на отдельные три группы, для которых по мере увеличения проницаемости происходит уменьшение значения поверхностной релаксивности.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта ФНИ № FWZZ-2026-0049 «Электродинамика многомасштабной геологической среды как основа наукоемких технологий в нефтяной и рудной геологоразведке и инженерной геологии в Сибири и Арктической зоне РФ».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Coates G.R., Prammer M.G., Xiao L. NMR Logging Principles and applications – Houston: Hulliburton Energy Services Publishing, 2001. – 342 p.
2. Stingaciu L. R., Weihermüller L., Haber-Pohlmeier S., Stapf S., Vereecken H., Pohlmeier A. Determination of pore size distribution and hydraulic properties using nuclear magnetic resonance relaxometry: A comparative study of laboratory methods // Water Resources Research – 2010. – Vol. 46. – P. 11.

3. Zhang N., Wang S., Xun X., Wang H., Sun X., He M. Pore Structure and Fractal Characteristics of Coal-Measure Sedimentary Rocks Using Nuclear Magnetic Resonance (NMR) and Mercury Intrusion Porosimetry (MIP) // *Energies*. – 2023. – Vol. 16. – № 9. – P. 17.
4. Рогозин А.А., Игнатъева Т.С., Чурков А.В. Комплексирование данных ЯМР-релаксометрии и электрометрических исследований на примере пород-коллекторов месторождений Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции // *Экспозиция Нефть Газ*. – 2021. – № 6. – С. 62–66.
5. Шумскайте М.Й., Глинских В.Н. Экспериментальное исследование зависимости ЯМР-характеристик от удельной поверхности и удельного электрического сопротивления песчано-алевритоглинистых образцов // *Геология и геофизика*. – 2016. – Т. 57. – № 10. – С. 1911–1918.
6. Li J., Wang M., Jia W. A modified surface to volume (SVR) method to calculate nuclear magnetic resonance (NMR) surface relaxivity: Theory and a case study in shale reservoirs // *Marine and Petroleum Geology*. – 2024. – Vol. 170. – P. 13.
7. Saidian M., Prasad M. Effect of mineralogy on nuclear magnetic resonance surface relaxivity: A case study of Middle Bakken and Three Forks formations // *Fuel*. – 2015. – Vol. 161. – P. 10.
8. 11. P. Zhao, Wanga L., Xuc C., Fud J., Shid Y., Maoa Z., Xiaoe D. Nuclear magnetic resonance surface relaxivity and its advanced application in calculating pore size distributions // *Marine and Petroleum Geology*. – 2020. – Vol. 111. – P. 9.

© Т. А. Янушенко, Н. А. Голиков, 2026