

РЕЛАКСАЦИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ В МЕТОДАХ СЕЙСМОЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ И ЗАДАЧИ ПРОГНОЗА

Филатов.В.В., Тригубович Г.М.

Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики
и минерального сырья, г. Новосибирск

В статье рассмотрена возможная модель релаксации сопротивления среды под влиянием упругого воздействия и показана целесообразность ее применения при изучении сейсмоэлектрического эффекта 1 рода и в задачах прогноза.

Ключевые слова: сейсмоэлектрический эффект, релаксация сопротивления, фрактальные модели, дифференциальные уравнения с дробными производными, прогноз коллекторских свойств.

Хотя методы сейсмоэлектроразведки известны уже давно, но до сих пор нет единой и непротиворечивой теории, которая позволила бы адекватно описать все экспериментальные данные. Одна из причин этого заключается в том, что, как показано многочисленными исследованиями, на величину проявления, например, сейсмоэлектрического эффекта 1 рода (изменения электрических свойств среды под влиянием упругого воздействия) влияют: минеральный состав твердого скелета осадочной горной породы и его структура; пористость (открытая и закрытая); проницаемость и структура поровых каналов; состав и объем минерального цемента; «извилистость» поровых каналов; состав и минерализация электролита, насыщающего поры; наличие и количество в составе горной породы включений нефти и газа; наличие и состав акцессорных минералов (влияющих на свойства и однородность двойного электрического слоя); смачиваемость. Влияет также температура и, весьма вероятно, горное давление.

Даже на начальном этапе, связанном с моделированием упругого воздействия на среду возникает много проблем. Академик М.А.Садовский еще в 1982 г отмечал, что «Реальные горные породы обладают выраженными нелинейными упругими свойствами, постоянно излучают микросейсмические колебания (сейсмическая эмиссия), претерпевают временные изменения в связи с изменениями напряженного состояния, вызванными геодинамическими и геохимическими процессами. Теоретическое исследование таких систем лежит вне возможностей механики сплошных линейно-упругих, упруго-пластичных и других моделей среды» [2].

По-видимому, этим и объясняется тот факт, что сейсмоэлектрический эффект 1-го рода обладает повышенной глубинностью, которая не всегда ограничивается мощностью применённого источника. Кроме того, характерной чертой эффекта 1-го рода является длительное время релаксации (достигающее порой нескольких суток), а иногда и необратимый процесс преобразования среды.

Существуют теоретические описания некоторых особенностей эффекта первого рода. Большая глубинность объясняется эстафетным процессом образования трещин в жёстких кристаллических породах и так называемым «триггерным эффектом», т.е. способностью горной породы, находящейся в состоянии энергетической неустойчивости, самовозбуждаться и менять свои параметры под действием сравнительно слабого сигнала. Процесс трещинообразования не заканчивается с окончанием воздействия, а распространяется во времени и пространстве, очень медленно затухая. Подобный процесс может приводить к очень существенным изменениям физических параметров геологической среды. В частности, изменение удельного сопротивления среды до и после вибрации может достигать сотен процентов.

В работе [1] рассмотрен возможный механизм последствия сейсмоакустического воздействия. Эффективность управляемых воздействий повышается автоэмиссионным механизмом возбуждения и эстафетой передачи упругих импульсов от динамически распространяющихся колебаний. Кроме того, в трещиноватых породах происходит квазистатическое локальное наполнение и изменение напряжений и возникает дополнительное излучение упругих колебаний, которые «достигают, а иногда и превосходят уровни первичных техногенных и естественных нагрузок». Взаимодействие трещиноватости среды и энергии возбуждения имеет азимутальную

зависимость, и поэтому при некотором расположении трещин разрастания их (соответственно изменение физических свойств среды) не будет.

Трещины не только вносят искажение внешнего поля напряжений, но в определённых условиях являются источниками акустических и электромагнитных волн. Одним из механизмов генерации этих волн является распространение разрыва со скоростями, близкими к скорости поперечных волн. Отклик среды не прямо пропорционален числу импульсов воздействия. Подрастание, взаимодействие и автоэмиссия являются ведущими механизмами развития трещиноватости, и группирования в виде кластеров, или линейных систем различного масштаба в поле переменных нагрузок. Указанные механизмы являются основой «самоорганизации» трещиноватости в условиях сложного напряжённо-деформированного состояния геологической среды. Очевидно, что этот процесс самоорганизации является одним из основных факторов, влияющих на процесс изменения сопротивления среды вследствие упругого воздействия за счет появления новых и изменения параметров старых трещин.

Создание общей математической модели для решения прямых и обратных задач, связанных непосредственно с расчётом сейсмoeлектрического эффекта для конкретной среды, по-видимому, дело будущего. Однако некоторые общие моменты процесса релаксации сопротивления в рамках проявления сейсмoeлектрического эффекта 1 рода можно отметить.

Прежде всего заметим, что простой экспоненциальный закон и классическая модель броуновской диффузии не могут описать релаксационные явления и кинетику в таких сложных системах. Не экспоненциальное поведение релаксации и аномальная диффузия - это именно те явления, которые определяются сегодня термином "странная кинетика" [7].

Кроме того, такой процесс, как все процессы самоорганизации носит самоподобный характер. Одна из возможных моделей модели для описания процесса релаксации в неупорядоченных структурах, предложена в работе [6], где рассматриваемую среду представляют в виде иерархически организованной совокупности кластеров.

В такой системе обычное уравнение релаксации, в соответствии с которым должно изменяться сопротивление:

$$\frac{d\rho(t)}{dt} + \lambda\rho(t) = 0,$$

сводится к уравнению аномальной (сверхмедленной) релаксации

$$\frac{d^{\nu}\rho(t)}{dt^{\nu}} + \lambda\rho(t) = 0.$$

С точки зрения физики это уравнение описывает движение к положению равновесия, когда в процесс потери энергии вовлечена только часть состояний физической системы, определяемая фрактальной размерностью ν .

Решение уравнения сверхмедленной релаксации выражается с помощью функций Миттаг-Леффлера [5]:

$$e_{\nu}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{t^{\nu n}}{\Gamma(\nu n + 1)}, \quad t > 0, 0 < \nu \leq 1.$$

Для того чтобы понять как ведет себя такое решение уравнения аномальной релаксации отметим, что одно из асимптотических приближений функции Миттаг-Леффлера имеет вид экспоненциального закона Уильямса-Уотса [4]:

$$e_{\nu}(t) \approx \exp\left[-\frac{t^{\nu}}{\Gamma(1+\nu)}\right].$$

Нами были рассмотрены кривые изменения сопротивления, полученные в ходе физического моделирования сейсмoeлектрического эффекта на различных образцах горных пород. При этом практически все кривые с хорошей точностью аппроксимируются функциями Миттаг-Леффлера

Характерный пример такой кривой приведен на рис.1. Начальное время соответствует времени начала упругого воздействия. На рисунке отображены две стадии процесса. Первая характеризует изменение сопротивления в процессе упругого воздействия, вторая описывает собственно процесс релаксации. Сплошная линия – график функции Миттаг-Леффлера.

Необходимо отметить, что на физическом моделировании длительность процесса релаксации соответствовала длительности процесса упругого воздействия. Это, по-видимому, связано с отсутствием дополнительных нелинейных эффектов, характерных для реальных горных пород в естественном залегании.

При соответствующих оговорках и та и другая стадия изменения сопротивления адекватно описываются функциями Миттаг-Леффлера. При этом показатели ν у двух стадий могут отличаться, что обусловлено тем, что первая стадия проходит при действующем источнике упругих колебаний. Типичный пример такой ситуации показан на рис. 1. Здесь в первой стадии $\nu=0.85$, а во второй - $\nu=0.54$.

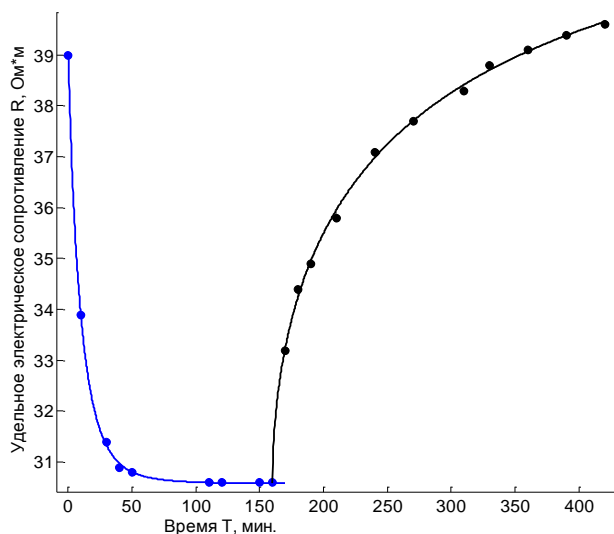


Рис.1 Изменение сопротивления образца карбонатных пород под влиянием упругого воздействия.

Отметим, что параметры релаксации и той и другой стадии являются дополнительными характеристиками среды, связанными с фрактальной размерностью, которая в свою очередь связана со структурой порового пространства. Кроме того, такое приближение позволяет унифицировать результаты практических измерений вариаций сопротивления при упругом воздействии. Измеренные кривые далеко не всегда позволяют оценить реальную длительность и амплитуду сейсмoeлектрического эффекта. Это можно увидеть из рис. 2, где отображены результаты измерений на разных образцах.

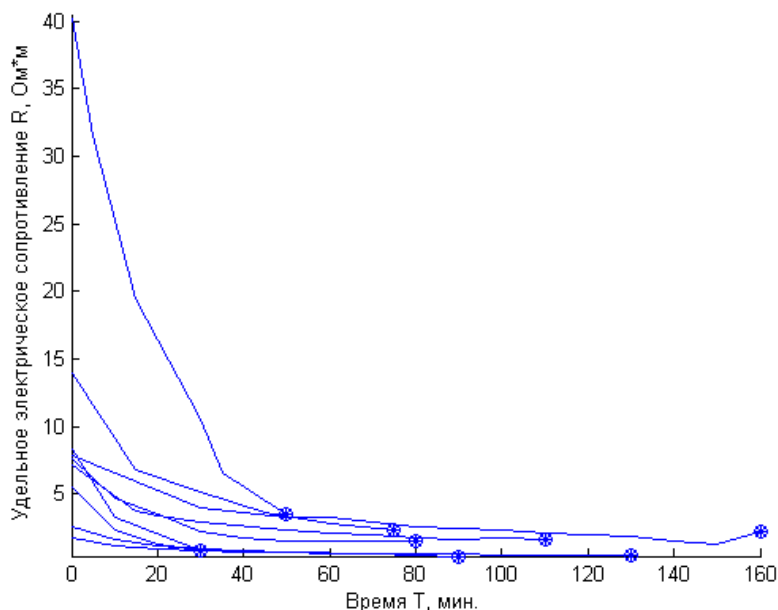


Рис. 2. Изменение сопротивления в процессе упругого воздействия на различных образцах керна карбонатных пород, извлеченных с одной площади. Звездочка обозначает конец зафиксированного процесса.

Использование рассмотренных аппроксимаций позволяет более точно характеризовать сейсмoeлектрический эффект 1 рода и даже использовать его для прогноза коллекторских свойств.

Нами была рассмотрена совокупность образцов карбонатных пород, полученных на одной площади. В соответствие со схемой, предложенной в работе [3], изменения проходившие в образцах под влиянием упругого воздействия рассматривались, как результат эволюции некоторой динамической системы. Аттрактор такой системы позволяет установить латентные связи между различными параметрами. В данном случае рассматривались связи между характеристиками изменения сопротивления и пористостью образца.

Полученные закономерности были применены к другой коллекции, содержащей образцы, как карбонатных, так и терригенных пород, (15 образцов). Результат прогноза пористости показан на рис.3.

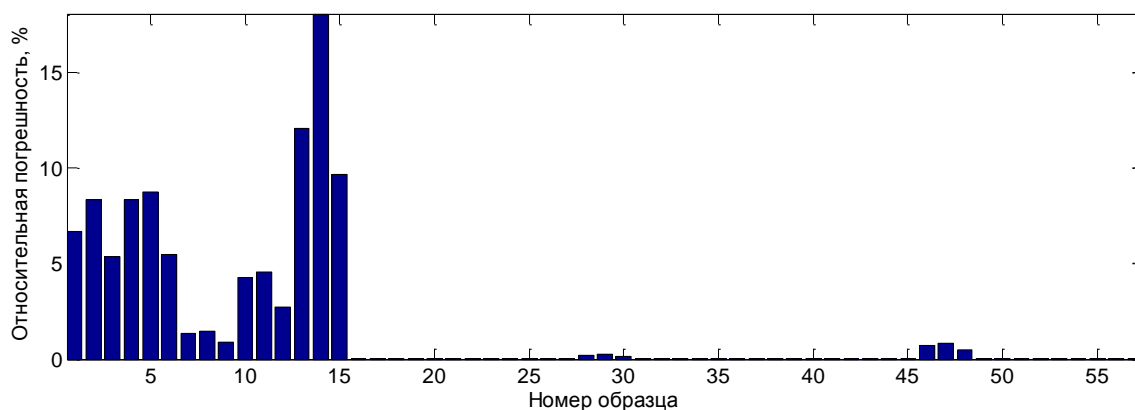


Рис.3. Относительная погрешность прогноза пористости образцов. Образцы с номерами 16-57 - базовая коллекция. Образцы с номерами 1-15 новая коллекция.

Таким образом, мы видим, что в результате упругого воздействия в среде возникает достаточно медленный релаксационный процесс, который может быть зафиксирован при практических измерениях, что позволяет получить дополнительную информацию о среде, и открывает новые возможности при прогноза.

Список литературы.

1. Дьяконов Б. П., Файзуллин И. С. Реакция трещиновато-блочных сред на сейсмоакустические воздействия и естественные колебания // Геофизика. 2009. № 3. С. 5-11.
2. Садовский М.А., Николаев А.В. Новые методы сейсмической разведки. Перспективы развития, // Вестник АН СССР, 1982, N1. С.54-63.
3. Филатов В.В., Светозерский О.Ю. Синергетические аспекты интерпретации геолого-геофизических данных М. ГЕОКАРТ- ГЕОС, 2010. 136 с
4. Goreno, R., Loutchko, J. and Luchko, Yu. Computation of the Mittag-Leffler function and its derivatives. // Fract. Calc. Appl. Anal. 5, 2002. P.491-518.
5. Mainardi, F. and Goreno, R. Time-fractional derivatives in relaxation processes: a tutorial survey, // Fract. Calc. Appl. Anal. 10, 2007 P. 269-308.
6. Novikov, V.V., Privalko V.P. Temporal fractal model for the anomalous dielectric relaxation of inhomogeneous media with chaotic structure // Phys.Rev. E. - 2001 - Vol. 64. P. 315041-3150411.
7. Shlesinger M.F., Zaslavsky G.M. and Klafter J. Strange Kinetics // Nature. -1993. - Vol. 363. P.31-37.