

## О СВЯЗИ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВО ФРАКТАЛЬНОЙ СРЕДЕ

*Владимир Викторович Филатов*

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, доктор физико-математических наук, профессор, тел. (383)346-07-33, e-mail: [filatov@corp.nstu.ru](mailto:filatov@corp.nstu.ru); ЗАО «Аэрогеофизическая разведка» 630007, Россия, г. Новосибирск, Октябрьская магистраль, 4, оф. 1207, тел. (383)347-47-97

Рассмотрены особенности влияния фрактальных характеристик среды на взаимосвязь петрофизических параметров в гетерогенных флюидонасыщенных средах на примере коллекции образцов из продуктивных горизонтов девона и карбона. Показано, что характерные для фрактальных сред закономерности, связывающие физические характеристики с импедансом могут быть использованы при прогнозе петрофизических параметров при недостатке информации.

**Ключевые слова:** фракталы, пористые флюидонасыщенные среды, пористость, удельное сопротивление, керн.

## ON PETROPHYSICAL PARAMETERS'S RELATIONS IN FRACTAL MEDIUM

*Vladimir V. Filatov*

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russia, D. Sc., Professor, phone: (383)346-07-33, e-mail: [filatov@corp.nstu.ru](mailto:filatov@corp.nstu.ru); «Aerogeophysical Surveys», CJSC, of. 1207, 4, Oktyabrskaya magistral, Novosibirsk, 630007, Russia, phone: (383)347-47-97

Features of influence of fractal characteristics of the environment on interrelation of petrophysical parameters in heterogeneous fluid-saturated medium on the example of the collection of core samples from the productive horizons of the Devonian and of the Carboniferous are considered. It is shown that the typical characteristics of fractal mediums, connecting physical characteristics with the impedance can be used at the prediction of petrophysical parameters at the lack of information.

**Key words:** fractals, porous fluid-saturated porous medium, porosity, unit resistance, core.

### *Введение*

Проведение геологоразведочных работ требует построения надежных петрофизических моделей для повышения достоверности интерпретации и эффективности использования данных геофизических исследований необходимых для прогноза.

Как известно, в гетерогенной флюидонасыщенной среде фильтрационно-емкостные и петрофизические параметры (удельное электрическое сопротивление, скорость распространения упругих волн, плотность, другие характеристики) достаточно тесно связаны между собой. Вопросам исследования таких связей посвящено большое количество работ [1-7]. Как правило, эти работы ориентированы на скважинную геофизику. Кроме того, взаимосвязи между парамет-

рами обычно ищутся исходя из чисто статистических закономерностей. Мы рассмотрим один из аспектов этой проблемы, связанный с решением задач наземной геофизики на основе использования структурных особенностей среды, связанной с её фрактальными характеристиками.

Нас будет интересовать задача прогноза параметров разреза в случае, когда какой-то из этих параметров, по той или иной причине, не определён.

В качестве экспериментальных данных были использованы данные ОАО «КамНИИКИГС» из работы [8], полученные на образцах керна продуктивных горизонтов девона и карбона, представленных в равной степени, как терригенными, так и карбонатными породами

### *Методы и материалы*

Можно выделить два подхода к использованию фрактальных свойств среды. Первый – это исследование фрактальных свойств какого-либо физического объекта, которое обычно сводится к определению фрактальной размерности или заменяющих ее величин, базирующихся на классическом определении фрактальной размерности.

Реально фрактальная структура вещества проявляется в необычных свойствах распределения вещества в пространстве. Изначально в качестве иллюстрации таких свойств рассматривалась масса  $M$  фрактального агрегата размера  $R$ , которая зависит от размера как [9]

$$M = m_0 \left( \frac{R}{a_0} \right)^D$$

где  $D$  – фрактальная размерность, меньшая размерности пространства  $d$ ,  $m_0, a_0$  – масса и размер составляющих агрегат частиц.

Однако интенсивное проникновением идей фрактальной геометрии [19] в физику инициировало множество работ, где были предприняты попытки объяснить различные эмпирические зависимости, содержащие нецелый (чаще всего выражаемый иррациональным числом) показатель степени, которые появляются во многих областях физики и техники. Простейшая из таких зависимостей может быть выражена формулой

$$P(z) = A_\alpha z^{-\alpha}. \quad (1)$$

$P(z)$  отклик среды, часто совпадающий с передаточной функцией или импедансом,  $\alpha$ -нецелый (дробный) показатель степени,  $A_\alpha$  - некоторая константа, зависящая от  $\alpha$ . Аргумент  $z$  обычно совпадает с некоторой интенсивной переменной, непосредственно связанной с фрактальной средой или процессом.

Одним из показательных вариантов такого подхода является интерпретация, с точки зрения фрактальной геометрии, формулы Арчи [10].

$$\sigma = \sigma_0 \Phi^m,$$

где  $\sigma$  есть проводимость породы, полностью насыщенной флюидом,  $\sigma_0$  - проводимость флюида,  $\Phi$  - пористость,  $m$  - эмпирический параметр. Но можно показать [12], что показатель  $m$  определяется соотношением

$$m = (1 + D_p - D_s) / (3 - D_v), \quad (2)$$

где  $D_p$ ,  $D_s$ ,  $D_v$  - параметры, характеризующие фрактальную размерность породы.

Практически все такие физические закономерности оказалось возможным объяснить через фрактальные особенности среды, в которой наблюдается соответствующая закономерность.

Однако заметим, что даже в случае относительно простой модели капиллярной среды, предложенной для обоснования показателя  $m$  в формуле Арчи (2), этот показатель зависит от трёх различных фрактальных размерностей, характеризующих модель. Для мультифрактальных сред, с которыми приходится иметь дело в любой практической задаче, увязывать показатель степени с фрактальными размерностями крайне сложно и, по-видимому, не целесообразно.

Мы будем исходить из предположения, что отклик во фрактальной среде можно связать с её параметрами именно соотношением типа (1) не вдаваясь подробно в структуру показателя степени.

Другой подход к фрактальному анализу геолого-геофизических объектов опирается на предположение о том, что эти объекты возникли в результате воздействия динамической системы конечной размерности с хаотическим поведением. Траектория такой системы в фазовом пространстве представляет собой фрактальное множество, называемое странным аттрактором.

Анализ процесса, порожденного такими системами, основан на применении алгоритма Такенса [12], позволяющего восстановить траекторию системы в фазовом пространстве по временной зависимости одной связанной с системой величины. Задача такой реконструкции предполагает существование временных рядов для наблюдаемых признаков. При проведении реального мониторинга такие временные ряды известны. Но часто такие временные ряды по разным причинам недоступны. Но иногда можно формировать так называемые «псевдовременные ряды», исходя из некоторых достаточно общих предположений. Один из вариантов формирования таких рядов на основе генетических гипотез изложен в работе [13].

Такой подход позволяет определить размерность системы и компоненты, которые целесообразно использовать при прогнозе [13].

## ***Результаты***

Как уже отмечено, нас будет интересовать задача прогноза параметров разреза. Точнее – параметров определенных горизонтов. Если исходить из синергетического подхода, предложенного в [13], и основанного на использовании динамических систем, то для восстановления любого параметра требуется совокупность целого ряда характеристик, позволяющая дать довольно точный

прогноз. Однако, по данным наземной геофизики получить совокупность таких характеристик на уровне конкретного горизонта, практически невозможно.

В настоящее время к методам наземной геофизики, позволяющим достаточно достоверно определять параметры разреза, можно отнести сейсморазведку и электроразведку.

Те есть, учитывая ограниченность набора методов, использование этого подхода крайне затруднено. Отметим, однако, что параметры, характерные для этих методов (скорость продольных волн и удельное сопротивление) (рис. 1, 2) вполне укладываются в рамки использование динамических характеристик, отражающихся в поведении реконструированных аттракторов.

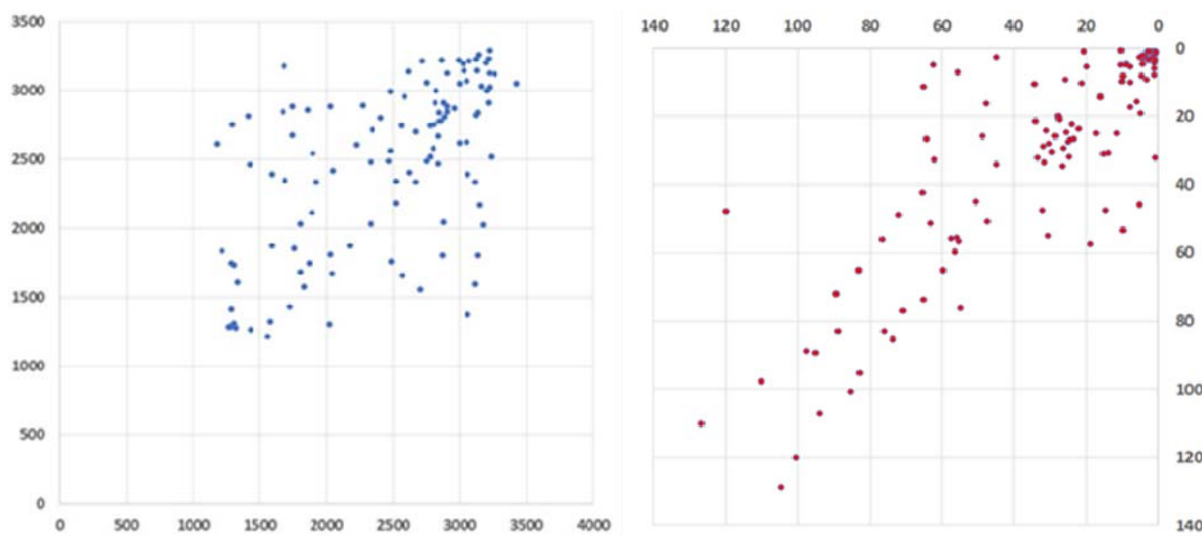


Рис. 1. Аттракторы, реконструированные по псевдовременному ряду для скорости продольных волн (а) и удельного сопротивления (b)

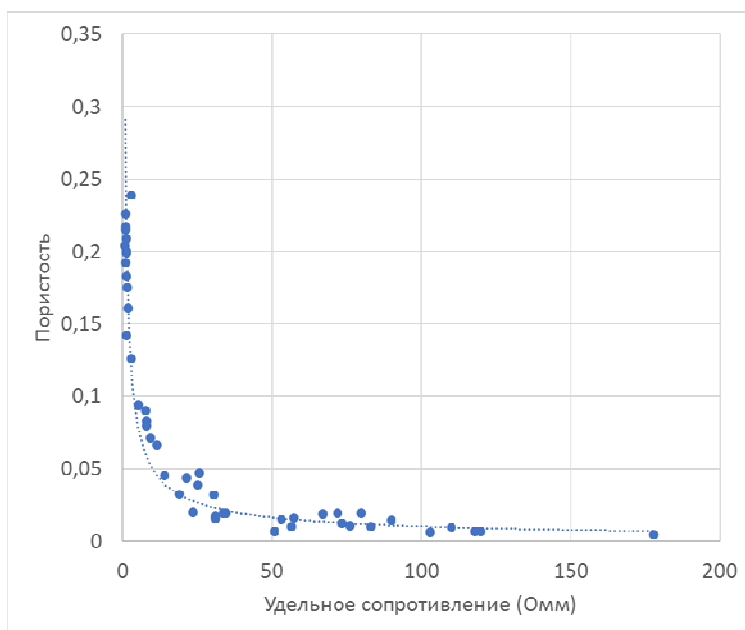


Рис. 2. Связь удельного сопротивления  $\rho$  и пористости  $P$ .  
Аппроксимирующая кривая имеет вид  $P = 24.5\rho^{-0.69}$

К сожалению, ограниченное количество экспериментальных данных не позволяет получить полноценные аттракторы, но геометрическая структура двумерной проекции аттракторов, полученная по алгоритму Такенса, хотя и представленная точками, на рис. 1 явно просматривается. Это, по Такенсу, и является показателем того, что рассматриваемый параметр сформировался под воздействием некоторой динамической системы, а форма гипотетического аттрактора позволяет отнести его к странным.

Отметим, что, как правило, в комплексных работах сейсморазведка играет доминирующую роль. Однако, известная проблема, о недостаточности информативности и, точности сейсморазведки при нефтепоисковых работах в условиях сложного геологического строения верхних частей осадочного чехла, например, в связи с интенсивной насыщенностью ее интрузивными траппами до сих пор не потеряла актуальности.

Рассмотрим модельную задачу восстановления скоростных параметров среды по данным о её удельном сопротивлении. Для решения этой задачи будем использовать подход, основанный на фрактальности структуры порового пространства. А именно, будем искать закономерности связей между параметрами в виде (1). Для примера рассмотрим связь скорости и сопротивления с пористостью, которая является основной характеристикой, отражающей их геометрическую структуру пористой среды.

Соотношение сопротивления с пористостью показывает рис. 2. Как видно, эта связь полностью укладывается в наше предположение о связи параметров во фрактальной среде. Аналогичная картина имеет место для связи пористости и скорости продольных волн (рис. 3). Следует отметить, что при установлении связей использовались образцы, как терригенных, так и карбонатных пород.

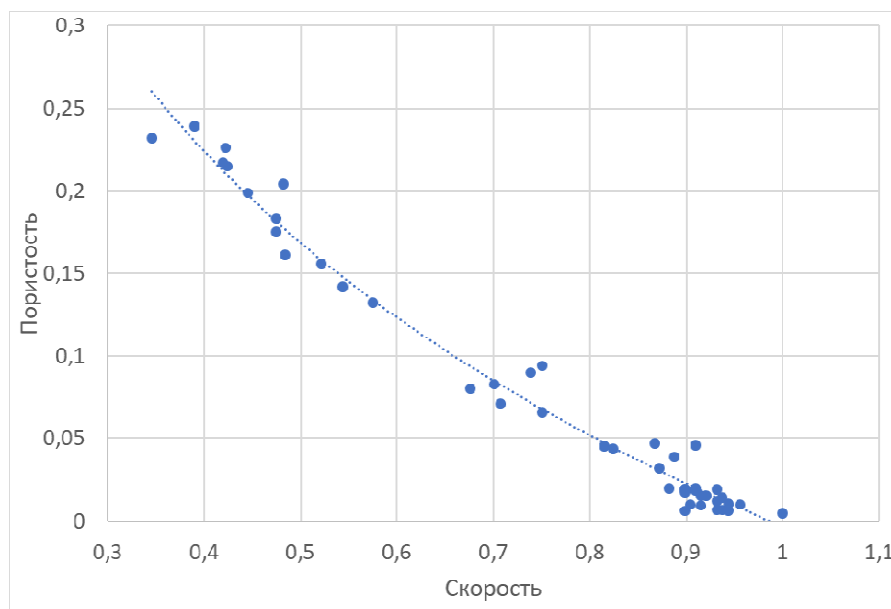


Рис. 3. Связь нормированных значений скорости продольных волн  $v$  и пористости  $P$ . Аппроксимирующая кривая имеет вид  $P = 0.4v^{0.75} + 0.4$

Схожие закономерности, связывающие сопротивление и скорость с пористостью, позволяют надеяться на получение подобного соотношения, связывающего скорость и удельное сопротивление.

Действительно, на рис. 4 представлены кривые, связывающие нормированные значения скорости продольных волн и удельное сопротивление. При этом, на рисунке представлены кривая, связывающая реальные значения скорости и сопротивления и три кривых прогнозирующие значения скорости. Одна получена по всей совокупности данных о сопротивлении, две других дают прогноз по различным выборкам, которые включали в себя менее трети всех данных.

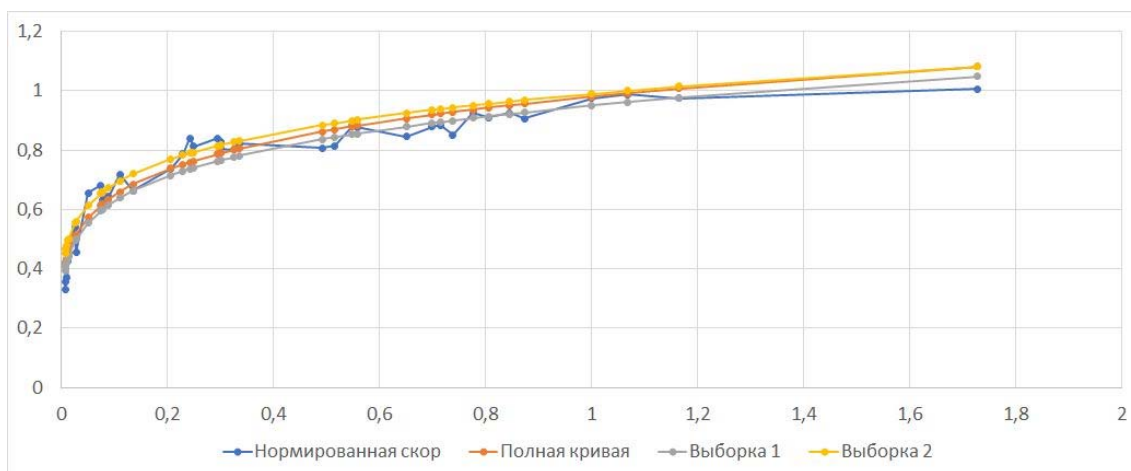


Рис. 4. Восстановление нормированных значений скорости продольных волн  $v$  по нормированным значениям удельного сопротивления. Аппроксимирующая кривая для полного набора данных имеет вид  $v = 0.98\rho^{0.18}$

Как видно и в этом случае мы находимся в рамках выдвинутого предположения. Именно принятие конкретного вида аппроксимирующей прогнозной функции позволяет найти её параметры по небольшой выборке исходных данных. Более наглядную картину, связанную с прогнозом скорости по значениям удельного сопротивления с помощью соотношения вида (1) можно увидеть на рис. 5.



Рис. 5. Отклонение прогнозных значений скорости продольных волн, полученных по значениям удельного сопротивления, от измеренных значений скорости

Однако, следует отметить, что значения удельного сопротивления в отличие от скорости, сильно зависят от свойств флюида. Поэтому, рассматриваемые закономерности, целесообразно распространять на зоны, в пределах которых резкого изменения свойств флюида не происходит.

### *Заключение*

Таким образом, соотношение (1) отражающее связь динамических параметров с импедансом во фрактальных средах, может быть использовано для решения задачи прогноза отдельных петрофизических параметров, в случае, когда информация об этих параметрах неполна или отсутствует.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Взаимосвязь фильтрационно-емкостных свойства петрофизических параметров юрских отложений штокмановского месторождения / В.С. Жуков, О.В. Иселидзе, А.В. Дахнов, А.Е. Рыжов // Вести газовой науки: науч.-технический сб. М.: Газпром ВНИИГАЗ - 2010. - № 2 (5). - С. 108-117.
2. Жуков В.С., Иселидзе О.В. Оценка трещиноватости коллекторов Оренбургского месторождения по данным о скорости распространения продольной волны // Актуальные вопросы исследований пластовых систем месторождений углеводородов: сб. научных ст. в 2 ч.; под редакцией Б.А. Григорьева. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2011. – Ч. 1. – С. 175–182.
3. Жуков В.С., Моторыгин В.В. Влияние различных видов пористости на скорости упругих волн и электропроводность коллекторов чаяндинского месторождения // Вести газовой науки: науч.-технический сб. М.: Газпром ВНИИГАЗ - 2017. - №2.С. 223-233.
4. Авчян Г.М., Матвеевко З.Б., Стефанкевич А.А. Петрофизика осадочных пород в глубинных условиях. – М.: Недра, 1979. – 224 с.
5. Дахнов В.Н. Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения горных пород. 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Недра, 1985-311 с.
6. Кузьмин Ю.О., Жуков В.С. Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород. – М.: Изд-во МГГУ, 2004. – 262 с.
7. Attia M. Attia. Effects of petrophysical rock properties on tortuosity factor // Journal of Petroleum Science and Engineering. Vol. 48. Issues 3-4. 15 September 2005. P. 185-198
8. Филатов В. В., Савинов В. Н., Светозерский О. Ю. О связи сейсмoeлектрического эффекта 1-го рода с петрофизическими параметрами среды // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. - 2015. - № 1. - С. 93-102.
9. Федер Е. Фракталы. – М.: Мир, 1991.- 256 с.
10. Archie G. E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics // Trans. Am. Inst. Min., Metallurg., Petr. Eng., 146, p. 54-62, (1942).
11. Nigmatullin P.P., Dissado L.A., Soutougin N.N. A fractal pore model for Archies law in sedimentary rocks // Phys. D. 1992. Vol.25. P.32-37.
12. Кузнецов С. П. Динамический хаос (курс лекций). М: Издательство физико-математической литературы, 2001. 296 с
13. Филатов В.В., Светозерский О.Ю. Синергетические аспекты интерпретации геолого-геофизических данных. М. ГЕОКАРТ- ГЕОС, 2010. 136 с.

© В. В. Филатов, 2019