

УДК 550.8.053

DOI 10.22213/2410-9304-2017-4-126-130

А. В. Щербенёв, аспирант

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОНИЦАЕМОСТИ В ТЕРРИГЕННЫХ ПОРОДАХ БАШКИРСКОГО СВОДА И СОЛИКАМСКОЙ ДЕПРЕССИИ

В статье рассмотрены проницаемые и непроницаемые породы Башкирского свода и Соликамской депрессии. Башкирский свод находится в южной части Пермского края, Соликамская депрессия занимает восточную часть северной половины края. Материалом для рассмотрения являются пористость, проницаемость, объемная и минералогическая плотности и плотность насыщенного образца, полученные при исследовании кернового материала из скважин, находящихся на рассматриваемых тектонических элементах. Из полученных данных составлена статистически значимая выборка, достаточная для проведения статистического анализа. Степень связи параметров между собой и определение различий и сходств в породах различных тектонических элементов проводилось по результатам, полученным при построении корреляционных матриц. При рассмотрении полученных коэффициентов корреляции исследуемых параметров получено, что породы на разных тектонических элементах различаются по степени связанности между объемной, минеральной плотностью и плотностью насыщенного образца. Это указывает на различие пород в уплотненности пород на разных тектонических элементах. Наиболее плотные породы представлены на территории Соликамской депрессии. Основным параметром для рассмотрения выбран параметр проницаемости как один из наиболее важных при разработке месторождений. Для выявления параметров, влияющих на определение проницаемости, проведен регрессионный анализ, показывающий зависимость между зависимой переменной и одной или несколькими независимыми. По результатам этого анализа построены линейные математические модели и выявлена степень влияния каждого из рассматриваемых параметров на формирование коэффициента проницаемости. Проведен сравнительный анализ между параметрами, влияющими на определение проницаемости в проницаемых и непроницаемых породах на различных тектонических элементах.

Ключевые слова: коэффициент пористости, коэффициент проницаемости, объемная плотность, минералогическая плотность, Башкирский свод, Соликамская депрессия, регрессионный анализ, корреляционная матрица.

Башкирский свод выделяется в южной части Пермского края своим северным и частично северо-западным склонами. С различных направлений склоны Башкирского свода ограничены с северо-запада и севера – Верхнекамской впадиной и Бабкинской седловиной, с северо-востока и востока – Кунгурско-Сылвенской моноклиной. Размеры склона Башкирского свода в пределах Пермского края с запада на восток составляют 145 км, максимальная ширина с юга на север 66 км.

Соликамская депрессия – это очень крупный структурный элемент, занимающий восточную часть северной половины края. С запада она граничит с Камским сводом и Висимской моно-

клиналью, на юго-западе – с Ракшинской седловиной, на юге – с Косьювско-Чусовской седловиной, на востоке – со складчатым Уралом, на севере – с Тиманским кряжем и Вычегодской седловиной. Региональный фон наклона тульской поверхности на юго-восток составляет 25–30°. На фоне моноклиналичного склона выделяются различные и многочисленные структурные элементы, осложняющие его, разные по величине, знаку, форме и ориентировке [1, 2].

По результатам исследования кернового материала построены корреляционные матрицы для пород Башкирского свода и Соликамской депрессии (табл. 1, 2)

Таблица 1. Корреляционная матрица параметров месторождений Башкирского свода

Параметр	Пористость	Проницаемость	Коэффициент остаточной водонасыщенности	Объемная плотность	Плотность насыщенного образца	Минеральная плотность
Пористость	1,00	0,56	–0,67	–0,91	–0,79	–0,22
Проницаемость		1,00	–0,51	–0,47	–0,40	–0,04
Коэффициент остаточной водонасыщенности			1,00	0,58	0,49	0,07
Объемная плотность				1,00	0,97	0,60
Плотность насыщенного образца					1,00	0,75
Минеральная плотность						1,00

Таблица 2. Корреляционная матрица параметров месторождений Соликамской депрессии

Параметр	Пористость	Проницаемость	Коэффициент остаточной водонасыщенности	Объемная плотность	Плотность насыщенного образца	Минеральная плотность
Пористость	1,00	0,61	-0,72	-0,96	-0,88	-0,14
Проницаемость		1,00	-0,48	-0,57	-0,52	-0,05
Коэффициент остаточной водонасыщенности			1,00	0,67	0,61	0,06
Объемная плотность				1,00	0,98	0,43
Плотность насыщенного образца					1,00	0,59
Минеральная плотность						1,00

На Башкирском свде *пористость* имеет прямую корреляционную связь с проницаемостью и обратную связь с остальными параметрами (табл. 1). Проницаемость также имеет прямую связь с пористостью и обратную связь с остальными параметрами, за исключением минеральной плотности, с которой связь не установлена. Коэффициент остаточной водонасыщенности имеет прямую корреляционную связь с объемной плотностью и плотностью насыщенного образца, с минеральной плотностью связь не установлена. Объемная плотность, плотность насыщенного образца и минеральная плотность имеют прямую зависимость друг от друга.

Для пористости наиболее высокий коэффициент корреляции установлен с объемной плотностью образца ($R = -0,91$), менее значимая связь с плотностью насыщенного образца ($R = -0,79$), коэффициентом остаточной водонасыщенности ($R = -0,67$), проницаемостью ($R = 0,56$) и наименьшая связь установлена с минеральной плотностью ($R = -0,22$).

Проницаемость наиболее тесно связана с пористостью ($R = 0,56$) и коэффициентом остаточной водонасыщенности ($R = -0,51$), менее тесные связи установлены с объемной пористостью и ($R = -0,47$) и плотностью насыщенного образца ($R = -0,40$), с минеральной плотностью связи не установлено.

Для коэффициента остаточной водонасыщенности наиболее высокий коэффициент корреляции установлен с пористостью ($R = 0,67$), менее значимая связь установлена с объемной плотностью ($R = 0,58$), проницаемостью ($R = -0,51$) и плотностью насыщенного образца ($R = 0,49$). С минеральной плотностью связи не установлено.

Объемная плотность наиболее тесно связана с плотностью насыщенного образца ($R = 0,97$) и менее с минеральной плотностью ($R = 0,60$).

Коэффициент корреляции между плотностью насыщенного образца и минеральной плотностью составляет 0,75.

На Соликамской депрессии *пористость* и *проницаемость* имеют положительные корреляционные связи между собой, с остальными параметрами установлена отрицательная зависимость, кроме пары «проницаемость – минеральная плотность», в которой связь не установлена (табл. 2). Коэффициент остаточной водонасыщенности имеет прямую связь с объемной плотностью и плотностью насыщенного образца, с минеральной плотностью связь не установлена, с параметрами пористости и проницаемости установлена отрицательная связь. Объемная плотность, плотность насыщенного образца и минеральная плотность имеют прямую зависимость друг от друга.

Для пористости наиболее высокий коэффициент корреляции составляет с объемной плотностью ($R = -0,96$) и плотностью насыщенного образца ($R = -0,88$), менее тесные связи установлены с коэффициентом остаточной водонасыщенности ($R = -0,72$), проницаемостью ($R = 0,61$) и минеральной плотностью ($R = -0,14$).

Проницаемость наиболее тесно связана с пористостью ($R = 0,61$), менее значимые связи установлены с объемной плотностью ($R = -0,57$), плотностью насыщенного образца ($R = -0,52$) и коэффициентом остаточной водонасыщенности ($R = -0,48$). Связь с минеральной плотностью не установлена.

Для коэффициента остаточной водонасыщенности наиболее высокий коэффициент корреляции ($R = -0,72$) наблюдается для связи с пористостью. Менее значимая связь установлена с объемной плотностью ($R = 0,67$), плотностью насыщенного образца ($R = 0,61$) и проницаемостью ($R = -0,48$). Корреляционной связи с минеральной плотностью не установлено.

Объемная плотность наиболее тесно связана с плотностью насыщенного образца ($R = 0,98$) и менее с минеральной плотностью ($R = 0,43$).

Коэффициент корреляции между минеральной плотностью и плотностью насыщенного образца составляет 0,59.

Сравнивая данные, полученные при построении корреляционных матриц, видно, что при сопоставлении одинаковых параметров получают близкие коэффициенты корреляции кроме сопоставления минеральной плотности с объемной и плотностью насыщенного образца.

При сопоставлении минеральной плотности с объемной и плотностью насыщенного образца в породах Соликамской депрессии наблюдаются менее тесные связи, чем при сопоставлении этих же параметров в породах Башкирского свода.

Это связано с тем, что породы Соликамской депрессии более уплотненные по сравнению с породами Башкирского свода, и в них меньшая часть образца принадлежит пустотному пространству, что влияет на определение объемной плотности образца и на объем вмещающего флюида, применяемого для определения плотности насыщенного образца.

Проницаемость как один из важнейших параметров, влияющих на разработку месторождения, также является наиболее сложным для определения. Далее представлена методика использования регрессионного анализа для определения проницаемости в коллекторах и неколекторах визейской терригенной толщи.

Разработка многомерных моделей

В ряде случаев необходимо строить многомерные модели с помощью регрессионного анализа (РА). Расчет регрессионных коэффициентов в разрабатываемой модели выполним при помощи метода наименьших квадратов. Под регрессионным анализом понимается статистический метод исследования зависимостей между зависимой переменной Y и одной или несколькими независимыми переменными X_1, X_2, X_p . Зависимый признак в регрессионном анализе называется результирующим, независимый – факторным. Обычно на зависимую переменную действуют сразу несколько факторов. Совокупное влияние всех независимых факторов на зависимую переменную учитывается благодаря множественной регрессии [3–8].

В общем случае множественную регрессию оценивают параметры линейного уравнения вида:

$$Y = a + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_pX_p.$$

В данном уравнении регрессионные коэффициенты (b -коэффициенты) представляют независимые вклады каждой независимой переменной в предсказание зависимой переменной. Линия регрессии выражает наилучшее предсказание зависимой переменной (Y) по независимым переменным (X). В нашем случае в качестве зависимого признака выступает коэффициент

проницаемости, а в качестве независимых факторов – коэффициент пористости, остаточной водонасыщенности и объемная плотность образца. Для решения задачи регрессионного анализа методом наименьших квадратов вводится понятие функции невязки:

$$\sigma(\bar{b}) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^M (Y_k - \hat{Y}_k)^2.$$

Условие минимума функции невязки:

$$\begin{cases} \frac{d\sigma(\bar{b})}{db_i} = 0 \\ i = 0 \dots N \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \sum_{i=1}^M y_i = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N b_j x_{i,j} + b_0 M \\ \sum_{i=1}^M y_i x_{i,k} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N b_j x_{i,j} x_{i,k} + M b_0 \sum_{i=1}^M x_{i,k} \\ k = 1 \dots N \end{cases}$$

Полученная система является системой $N + 1$ линейных уравнений с $N + 1$ неизвестными $b_0 \dots b_N$.

Если представить свободные члены левой части уравнений матрицей

$$B = \begin{Bmatrix} \sum_{i=1}^M y_i \\ \sum_{i=1}^M y_i x_{i,1} \\ \dots \\ \sum_{i=1}^M y_i x_{i,N} \end{Bmatrix},$$

а коэффициенты при неизвестных в правой части матрицей

$$A = \begin{Bmatrix} M & \sum_{i=1}^M x_{i,1} & \sum_{i=1}^M x_{i,2} & \dots & \sum_{i=1}^M x_{i,1} \\ \sum_{i=1}^M x_{i,1} & \sum_{i=1}^M x_{i,1}x_{i,1} & \sum_{i=1}^M x_{i,2}x_{i,1} & \dots & \sum_{i=1}^M x_{i,N}x_{i,1} \\ \sum_{i=1}^M x_{i,2} & \sum_{i=1}^M x_{i,1}x_{i,2} & \sum_{i=1}^M x_{i,2}x_{i,2} & \dots & \sum_{i=1}^M x_{i,N}x_{i,2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum_{i=1}^M x_{i,N} & \sum_{i=1}^M x_{i,1}x_{i,N} & \sum_{i=1}^M x_{i,2}x_{i,N} & \dots & \sum_{i=1}^M x_{i,N}x_{i,N} \end{Bmatrix},$$

то получаем матричное уравнение: $A \times X = B$, которое легко решается методом Гаусса. Полученная матрица будет матрицей, содержащей коэффициенты уравнения линии регрессии:

$$X = \begin{Bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \dots \\ b_N \end{Bmatrix}.$$

Построение многомерных моделей произведем по нескольким сценариям для проницаемых и непроницаемых пород Башкирского свода и Соликамской депрессии. Построенная модель имеет следующий вид:

$$K_{пр} = 127,53 \cdot K_{п} - 5,82 \cdot K_{ов} + 1116,96 \cdot \text{ПлОб} - 4013,28$$

(для коллекторов БС);

$$K_{пр} = -1,15 \cdot K_{ов} + 26,74 \cdot \text{ПлОб} + 0,29 \cdot K_{п} + 22,32$$

(для неколлекторов БС);

$$K_{пр} = 74,33 \cdot K_{п} - 3,54 \cdot K_{ов} - 61,8 \cdot \text{ПлОб} - 516,46$$

(для коллекторов СолД);

$$K_{пр} = 36,31 \cdot K_{п} + 3,23 \cdot K_{ов} + 115,1 \cdot \text{ПлОб} - 697,15$$

(для неколлекторов СолД),

где $K_{пр}$ – коэффициент проницаемости, мД; $K_{п}$ – коэффициент пористости, %; $K_{ов}$ – коэффициент остаточной водонасыщенности, %; ПлОб – объемная плотность образца, г/см³; БС – Башкирский свод; СолД – Соликамская депрессия.

В коллекторах башкирского свода на определение параметра проницаемости наибольшее влияние оказывает пористость породы, меньше коэффициент остаточной водонасыщенности, в неколлекторах наибольшее влияние оказывает коэффициент остаточной водонасыщенности.

В коллекторах Соликамской депрессии параметры пористости и остаточной водонасыщенности оказывают практически одинаковое влияние на определение проницаемости горной породы, в неколлекторах не выявлено параметра, оказывающего значительное влияние на прогнозирование параметра проницаемости.

Проведенный анализ выявил, что породы в пределах Соликамской депрессии более уплотненные, чем породы Башкирского свода, что связано с большей глубиной залегания продуктивных отложений. Проведенный регрессионный анализ определения параметра проницаемости через данные, полученные при исследовании кернового материала, выявил степень влияния различных параметров на определение коэффициента проницаемости.

В коллекторах Башкирского свода на коэффициент проницаемости наибольшее влияние оказывает параметр пористости, в неколлекторах – коэффициент остаточной водонасыщенности. В коллекторах Соликамской депрессии равнозначное влияние оказывают коэффициент пористости и остаточной водонасыщенности, в непроницаемых породах не удалось выявить параметра, оказывающего значительное влияние на определение коэффициента проницаемости.

Библиографические ссылки

1. Анализ и уточнение сырьевой базы нефти, газа и конденсата Пермской области / Ю. А. Жуков и др. Пермь : ПермНИПИнефть, 2002. 194 с.
2. Закономерности размещения залежей нефти и газа в продуктивных комплексах палеозоя Пермской области / Ю. А. Жуков и др. Пермь : ПермНИПИнефть, 1998. 182 с.
3. Давыденко А. Ю. Вероятностно-статистические методы в геолого-геофизических приложениях. Иркутск, 2007. 29 с.
4. Михалевиц И. М. Применение математических методов при анализе геологической информации (с использованием компьютерных технологий). Иркутск, 2006. 115 с.
5. Поморский Ю. Л. Методы статистического анализа экспериментальных данных : монография. Л., 1960. 174 с.
6. Перцев Н. В. Количественные методы анализа и обработки данных : учеб. пособие. Омск : ОмГУ, 2002.
7. Watson G. S. Statistic on spheres. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1983. 238 p.
8. Yarus J. M. Stochastic modeling and geostatistics / AAPG. Tulsa, Oklahoma, 1994. 231 p.

References

1. Zhukov Yu. A. (2002). *Analiz i utochnenie syr'evoy bazy nefi, gaza i kondensata Permskoy oblasti* [Analysis and refinement of the raw materials base of oil, gas and condensate in the Perm Region], Permian: PermNIPIneft' (in Russ.).
2. Zhukov Yu.A. (1998). *Zakonomernosti razmeshcheniya zalezhey nefi i gaza v produktivnykh kompleksah paleozoya Permskoy oblasti* [Regularities in the location of oil and gas deposits in the productive complexes of the Paleozoic of the Perm Region], Permian: PermNIPIneft' (in Russ.).
3. Davydenko A. Yu. (2007). *Veroyatnostno-statisticheskie metody v geologo-geofizicheskikh prilozheniyah* [Probabilistic-statistical methods in geological and geophysical applications], Irkutsk (in Russ.).
4. Mihalevich I. M. (2006). *Primenenie matematicheskikh metodov pri analize geologicheskoy informacii (s ispol'zovaniem kovg'juternyh tehnologiy)* [Application of mathematical methods in the analysis of geological information (using computer technology)], Irkutsk (in Russ.).
5. Pomorskij Yu. L. (1960). *Metody statisticheskogo analiza ehksperimental'nyh dannyh: manografiya* [Methods of statistical analysis of experimental data], Leningrad (in Russ.).
6. Percov N. V. (2002). *Kolichestvennye metody analiza i obrabotki dannyh* [Quantitative methods of analysis and data processing], Omsk: OmGU (in Russ.).
7. Watson G. S. Statistic on spheres. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1983. 238 p.
8. Yarus J. M. Stochastic modeling and geostatistics / AAPG. Tulsa, Oklahoma, 1994. 231 p.

* * *

A. V. Sherbenev, Post-graduate, Perm National Research Polytechnic University

Application of Regression Analysis for Determining the Permeability in Terrigenous Rocks of the Bashkir Arch and Solikamsk Depression

The permeable and impermeable rocks of the Bashkir arch and Solikamsk depression are considered in the paper. Bashkir arch is located in the southern part of Perm region. Solikamsk depression occupies the Eastern part of the Northern half of the region. Porosity, permeability, volumetric density and mineralogical density and the density of a saturated sample are considered. The material was obtained in the study of core material from wells on the considered tectonic elements. The statistical significant sample was compiled from the data. This sample is sufficient for statistical analysis. The correlation matrices were constructed. It shows the degree of correlation of the parameters among themselves and identify differences and similarities in the rocks of different tectonic elements. The coefficients of correlation of parameters were obtained that the rocks in different tectonic elements differ in the degree of coupling between volumetric mineral density and the density of the saturated sample. It indicates a difference of species in the density of rocks at different tectonic elements. The toughest rock is located in the territory of Solikamsk depression. The main parameter is selected to be permeability as the one of the most important in the development field. The regression analysis was made to identify the parameters that influence the determination of permeability. It shows the relationship between the dependent variable and one or more independent. As the result of this analysis a linear mathematical model is constructed and the degree of influence of each of the analyzed parameters on the formation of the permeability coefficient is revealed. The comparative analysis was made between the parameters that influence the determination of permeability in the permeable and impermeable rocks for various tectonic elements.

Keywords: coefficient porosity, permeability, bulk density, mineral density, Bashkir arch, Solikamsk depression, regression analysis, correlation matrix.

Получено: 20.09.17