

## ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА ГРУППОВОГО УЧЕТА АРГУМЕНТОВ ПРИ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ

О. М. Муравина

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 18 сентября 2009 г.

**Аннотация.** В статье представлены результаты тестирования авторской программы, предназначенной для выявления статистических связей между геофизическими, петрофизическими и геологическими данными. Алгоритм реализует метод группового учета аргументов (МГУА), позволяющий генерировать множество вариантов моделей зависимостей и выбирать из них наиболее оптимальную. Для опробования программы были использованы результаты петрофизических исследований образцов керна по одной из горизонтальных скважин, пройденной с целью изучения ультраосновного массива на Северном Урале. Проведенное тестирование программы показало возможность использования метода при решении задач статистической обработки петрофизических и геофизических данных.

**Ключевые слова:** геофизические методы, математическое моделирование, статистическая обработка, петрофизические исследования, метод группового учета аргументов.

**Abstract.** In article results of testing of the author's program intended for revealing of statistical communications between geophysical, petrophysical and the geological data are presented algorithm is offered use the cardinal principles of the method of the group account of the argument. In this method the optimum model gets out of a great number of variants. The results of the petrophysical measurements of samples of a core from a horizontal chink in Northern Ural Mountains were used. The held testing of the program has shown possibility of use of a method at the decision of problems of statistical processing the petrophysical and the geophysical data.

**Key words:** geophysical methods, mathematical modeling, statistical processing, petrophysical researches, method of group account of argument

Метод группового учета аргументов (МГУА) реализует основные положения теории самоорганизации и позволяет найти математическую модель системы оптимальной степени сложности. Теоретические основы метода разработаны украинским ученым А. Г. Ивахненко в восьмидесятые годы прошлого столетия [1]. Значительный вклад в развитие теории и практических приложений внес профессор В. С. Стародубцев (кафедра экологической геологии ВГУ), успешно применив методы самоорганизации для решения ряда задач экологического мониторинга [2, 3]. В основе метода лежит

принцип самоорганизации, по которому оптимальная модель как в смысле достоверности, так и степени сложности находится по минимальным значениям некоторого числа внешних критериев. Количество и вид критериев зависят от конкретики решаемой задачи. Построение математических моделей по экспериментальным данным осуществляется автоматически. В процессе моделирования ставится задача выявления формы зависимости и выбор факторов, оказывающих существенное влияние на зависимую переменную. При этом структура модели, в отличие от регрессионного анализа, заранее не фиксируется, а выбирается из множества вариантов по заданным критериям.

Для генерации множества моделей в методе группового учета аргументов применяются два основных типа алгоритмов: комбинаторный и многорядный. Организация комбинаторного перебора осуществляется заданием опорной функции, из которой способом зануления коэффициентов получается определенное число частных описаний. Для каждой пары аргументов методом наименьших квадратов находятся коэффициенты уравнений всех частных описаний. Оптимальная модель находится согласно принципам самоорганизации из условия минимума внешних критериев, которые задаются с учетом особенностей решаемых задач и требований к модели. При использовании многорядного алгоритма выбор осуществляется в несколько этапов – рядов. На вход подается массив входных переменных, сформированный из экспериментальных данных:

$$x = x_1, x_2, \dots, x_n.$$

В первом ряду образуются частные описания, объединяющие входные переменные по две:

$$y_1 = f_1(x_1, x_2), y_2 = f_2(x_1, x_3), \dots, y_L = f_{lL}(x_{n-1}, x_n).$$

Из множества сгенерированных вариантов частных описаний первого ряда селекции выбирается  $P$  лучших согласно внешнему критерию. Эти описания проходят второй ряд.

На втором ряду образуются частные описания второго ряда:

$$z_1 = f_2(y_1, y_2), z_2 = f_2(y_1, y_3), \dots, z_s = f(y_{p-1}, y_p).$$

Из них выбирают  $P$  лучших для использования в следующем ряду. Для каждого ряда находится лучшая модель. Ряды наращиваются до тех пор, пока оценка критерия уменьшается.

Для решения задачи обработки петрофизических данных была разработана программа PETRO\_MODEL, в которой численно реализован многорядный алгоритм с комбинаторным перебором вариантов [4]. Программа написана на языке Visual Basic for Application (VBA), ввод и вывод данных, а также вызов программы осуществляется в EXCEL.

В качестве опорной функции была выбрана зависимость вида (1), позволяющая методом зануления коэффициентов получить семь вариантов моделей (2).

$$y = a_1 + a_2x_1 + a_3x_2 + a_4x_1x_2 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} y &= a_0 + a_1x_1, \\ y &= a_0 + a_2x_2, \\ y &= a_0 + a_1x_1 + a_2x_2, \\ y &= a_0 + a_3x_1x_2, \\ y &= a_0 + a_1x_1 + a_3x_1x_2, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} y &= a_0 + a_2x_2 + a_3x_1x_2, \\ y &= a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_1x_2. \end{aligned}$$

В качестве внешнего критерия был использован критерий эпилгнозного прогноза [2, 3] – это среднеквадратическая ошибка модели, рассчитанная на точках проверочной последовательности переменных, не использованных для получения оценок коэффициентов модели.

$$n^2(\delta r) = \frac{\sum_{i \in N_B} (y_i^M - y_i)^2}{\sum_{i \in N} y_i^2} \rightarrow \min, \quad (3)$$

где  $t$  – точки зависимой переменной,  $N$  – общее количество точек во входной таблице,  $N_B$  – размерность проверочной таблицы,  $y_i^M$  – модельные значения,  $y_i$  – входные значения зависимой переменной.

Разделение таблицы наблюдений осуществлялось таким образом:  $N1 = (0,7) N$ ;  $N2 = (0,3) N$ , где  $N1, N2$  – размерность векторов переменных обучающей и проверочных последовательностей соответственно,  $N$  – размерность векторов переменных входной таблицы данных. Такой способ разделения обычно применяется в алгоритмах МГУА. Точки проверочной последовательности не участвуют в получении оценок коэффициентов, поэтому данный критерий является внешним дополнением, позволяющим выбрать наиболее оптимальную модель. Физический смысл критерия эпилгнозного прогноза состоит в том, что он ориентирован на выбор модели, которая будет оптимальной на множестве тех точек, которых еще нет в таблице входных данных.

Для тестирования работы программы были использованы результаты петрофизических исследований образцов керна по одной из горизонтальных скважин, пройденной для изучения ультраосновного массива на Северном Урале. Материалы для моделирования были собраны в процессе прохождения производственной практики студентом кафедры геофизики Ю. В. Лукьянчиковым.

Петрофизические измерения, выполненные в полевых условиях, включали определение следующих параметров: диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ), магнитной проницаемости ( $\mu$ ), магнитной восприимчивости ( $\chi$ ) и удельной электропроводности ( $\sigma$ ).

Основной задачей статистического анализа было установление взаимосвязи между измеренными петрофизическими параметрами и геологическими и структурными особенностями изученных образцов керна. Для задания петрографического типа пород и степени трещиноватости изучаемых образцов была использована стратигра-

фическая колонка и соответствующая геологическая документация.

Согласно доступным геологическим данным было выделено 3 петрографических типа горных пород: 1 – дуниты, 2 – переслаивание дунитов и пироксенитов, 3 – пироксениты. Степень трещиноватости оценивалась по величине  $c$  – количество трещин, видимых на поверхности образца.

В табл. 1 приведены параметры (аргументы), которые использовались при построении модели. Каждый параметр представляет собой вектор размерностью 76 по числу участвующих в вычислительном эксперименте образцов керна.

Таким образом, в построении моделей могли участвовать пять переменных, одна из которых назначалась зависимой. С учетом того рассматривались данные измерений 76 образцов керна, матрица входных данных имеет размер  $5 \times 76$ . Было просчитано несколько вариантов в зависимости от решаемых задач и выбора зависимой переменной и переменных-аргументов, участвующих в создании моделей, в каждом из которых генерировалось и оценивалось свыше 600 вариантов моделей. Рассмотрим некоторые результаты, которые представляются нам наиболее интересными.

Вариант 1. Ставилась задача установления тесноты и формы связи между петрофизическими характеристиками, измеренными на образцах керна при фиксированной частоте поля. В качестве зависимой переменной ( $Y$ ) использовалась последовательность значений диэлектрической проницаемости образцов горных пород. В таб-

лице экспериментальных данных были использованы магнитная проницаемость, магнитная восприимчивость и проводимость образцов. По минимуму внешнего критерия лучший вариант модели был отобран на втором ряду. В табл. 2 представлены характеристики оптимальной модели. На основе данных табл. 2 осуществляется процедура обратного хода и выводится уравнение зависимости для модели  $1 - Y = f(X_1, X_3, X_4)$ , где  $Y$  – диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon$ );  $X_1$  – магнитная проницаемость ( $\mu$ );  $X_3$  – проводимость ( $\sigma$ ) образцов,  $X_4$  – магнитная восприимчивость (табл. 1).

Графики экспериментальных и модельных значений  $\epsilon$ , рассчитанных по табл. 2, представлены на рис. 1.

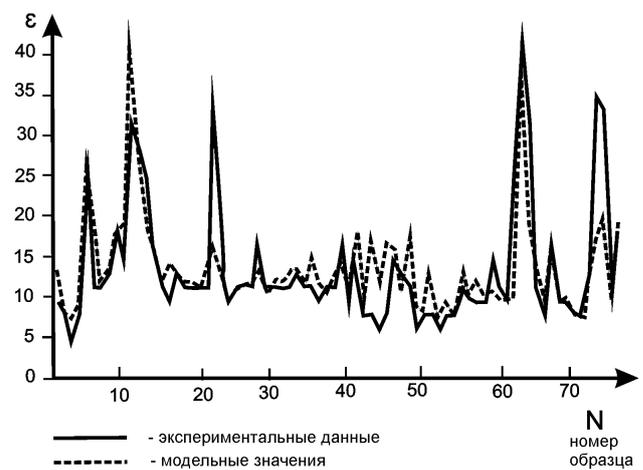


Рис. 1. Графики экспериментальных и модельных значений диэлектрической проницаемости  $\epsilon$

Таблица 1

Переменные параметры, используемые для построения моделей

Параметр	Значение	Символ	Единица измерения
$X_1$	Магнитная проницаемость	$\mu$	–
$X_2$	Диэлектрическая проницаемость	$\epsilon$	–
$X_3$	Удельная проводимость	$\sigma$	См / м
$X_4$	Магнитная восприимчивость	$\chi$	Ед СИ
$X_5$	Петрографический тип	$\psi$	–
$X_6$	Количество трещин, видимых на поверхности образца	$c$	$n / m^2$

Таблица 2

Параметры оптимальной модели, рассчитанной для варианта 1

Номер 1 арг.	Номер 2 арг.	Номер ряда	Коэффициенты модели				Значение критерия
			a1	a2	a3	a4	
4	8	2	0,05	0,00	1,00	0	0,000002
4	1	1	8,60	661,06	0,00	0	0,118192
4	3	1	6,44	637,51	55631,55	0	0,101602

Вариант 2. Ставилась задача установления тесноты и формы связи между степенью трещиноватости и петрофизическими характеристиками при фиксированной частоте внешнего поля, а также горизонтальной координатой отбора образцов. В качестве зависимой переменной (Y) рассматривалась степень трещиноватости образцов горных пород. По минимальному значению внешнего критерия оптимальная форма зависимости степени трещиноватости от рассматриваемых петрофизических параметров была получена на втором ряду многорядного перебора.

В табл. 3 представлена зависимость степени трещиноватости от параметров  $X_1$ ,  $X_2$  и  $X_3$ . Согласно табл. 1 это, соответственно, магнитная проницаемость, диэлектрическая проницаемость и удельная проводимость образцов. Таким образом, данные табл. 3 позволяют найти модельную зависимость степени трещиноватости как функции перечисленных выше петрофизических характеристик:  $Y = f(\mu, \epsilon, \sigma)$ . Соответствие экспериментальных и теоретических данных демонстрирует рис. 2.

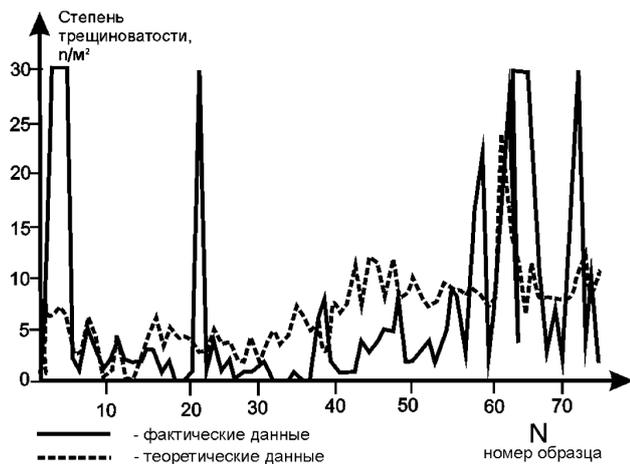


Рис. 2. Графики экспериментальных и модельных значений степени трещиноватости горных пород

Вариант 3. В этом варианте ставилась задача установления формы связи между петрографическим типом породы и такими петрофизическими характеристиками, как удельная проводимость и диэлектрическая проницаемость. Зависимая переменная (Y) — петрографический тип образцов горных пород.

Данные табл. 4 позволяют вывести эмпирическое уравнение связи петрографического типа образцов керна от удельной проводимости ( $\sigma$ ) и диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ). Кривые экспериментальных и теоретических значений петрографического типа горных пород приведены на рис. 3.

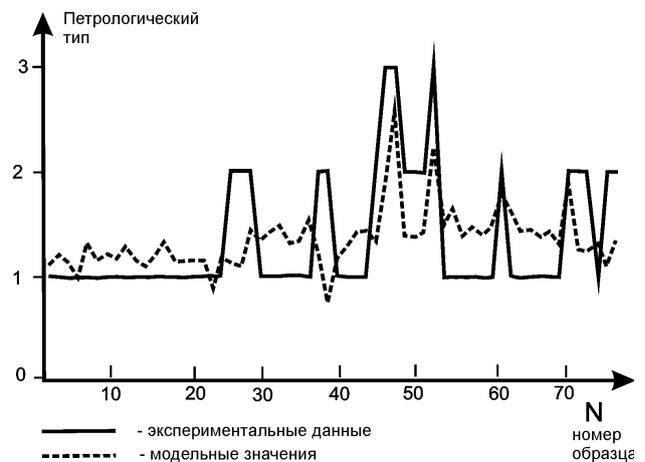


Рис. 3. Графики экспериментальных и модельных значений петрографических типов пород. Значение шкалы: 1 — дуниты; 2 — переслаивание дунитов и пироксенитов; 3 — пироксениты

Таким образом, в результате статистической обработки петрофизических данных с использованием метода группового учета аргументов были получены следующие модели.

Модель 1 устанавливает зависимость между диэлектрической проницаемостью и удельной про-

Т а б л и ц а 3

Параметры оптимальной модели, рассчитанной для варианта 2

Номер 1 арг.	Номер 2 арг.	Номер ряда	Коэффициенты модели				Значение критерия
			a1	a2	a3	a4	
2	8	2	-0,01182	0,99950	0,00379	-0,00018	0,00038
1	3	1	7,56366	349,6715	-66601,03	-1937475	0,5605
3	2	1	11,95028	-250785,97	0	8043,123	0,5222

Т а б л и ц а 4

Параметры оптимальной модели, рассчитанной для варианта 3

Номер 1 арг.	Номер 2 арг.	Номер ряда	Коэффициенты модели				Значение критерия
			a1	a2	a3	a4	
4	9	2	0,00005	1,00005	-0,00011	0,00002	0,000001
2	3	1	0,3942	21,9950	67913,96	-2103678	0,1142
2	3	1	1,1956	8,9052	-60376,86	0	0,1205

водимостью, магнитной проницаемостью и магнитной восприимчивостью образцов горных пород.

Модель 2 устанавливает зависимость между степенью трещиноватости горных пород и петрофизическими параметрами – магнитной проницаемостью, диэлектрической проницаемостью и удельной проводимостью образцов.

Модель 3 устанавливает зависимость между петрографическим типом пород и петрофизическими параметрами – диэлектрической проницаемостью и проводимостью образцов горных пород для фиксированной частоты поля.

Таким образом, полученные корреляционные связи между петрофизическими и геологическими характеристиками пород можно использовать при геологической интерпретации комплексных геолого-геофизических исследований на исследуемом объекте. Например, особенности построения моделей позволяют прогнозировать изменение петрофизических параметров и оценивать структурные изменения горных пород за пределами области исследования. Анализ полученных зависимостей между петрофизическими характеристиками делает возможным оптимизацию комплекса используемых геофизических методов и выполнение прогнозных оценок геофизических характеристик на ранних стадиях инженерно-геологических работ.

Однако на данном этапе задачей автора статьи являлась демонстрация возможностей использования метода группового учета аргументов для выяв-

ления неявных статистических связей при решении задач обработки петрофизических и геофизических данных. Результаты исследований показали очевидные преимущества метода – возможность быстрой генерации и анализа большого числа моделей. Возможности предложенной методики обработки данных не ограничиваются только задачами петрофизики, она может использоваться и при статистической обработке геофизических полей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Ивахненко А. Г.* Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем / А. Г. Ивахненко. – Киев : Наук. думка, 1982. – 296 с.

2. *Стародубцев В. С.* Квантификация природных систем. Гидрогеоэкологические системы / В. С. Стародубцев. – Воронеж : Воронеж. гос. ун-т, 2000. – 72 с.

3. *Стародубцев В. С.* Структурное моделирование динамических систем / В. С. Стародубцев // IV Всероссийская научно-практическая конференция «Охрана, безопасность и связь» (г. Воронеж. 27–28 ноября 2003 г.) : сборник материалов. – Воронеж : Воронежский институт МВД России, 2003. – С. 98–100.

4. *Муравин П. В.* Многорядный алгоритм идентификации экономических процессов стекольных производств / П. В. Муравин // Информационные технологии моделирования и управления. – Воронеж, 2008. – Вып. 1 (44). – С. 24–31.

*Воронежский государственный университет  
О. М. Муравина, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геофизики геологического факультета*

*Тел. 8-905-651-11-20*

*E-mail: comovo@yandex.ru*

*Voronezh State University  
O. M. Muravina, the candidate of geologo-mineralogical sciences, the senior lecturer of chair of geophysics*

*Tel. 8-905-651-11-20*

*E-mail: comovo@yandex.ru*