

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ КАРОТАЖА МЕТОДОМ ГРУППОВОГО УЧЕТА АРГУМЕНТОВ

А. А. Аузин, О. М. Муравина

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 18 сентября 2010 г.

Аннотация. Представлены результаты статистического анализа данных каротажа с целью выявления связей между геологическими и геофизическими данными. Авторы используют метод группового учета аргументов (МГУА), позволяющий генерировать значительное количество вариантов моделей зависимостей и выбирать из них наиболее оптимальную. В качестве экспериментальных были использованы материалы геофизических исследований по скважине Б1 на опытно-методическом полигоне «Трубка Белая», созданном в пределах одноименной кимберлитовой трубки в Архангельской алмазодобывающей провинции (ААП). В процессе моделирования получены идентификационные модели, построенные на основе корреляционных зависимостей между литотипами пород и параметрами наблюдаемых геофизических полей.

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

Abstract. The results of statistical processing data of geophysical researches in chinks for revealing of statistical communications between geological and geophysical data are presented. The authors use of the method of the group account of the argument, allowing to generate set of variants of models of dependences and to choose from them the optimal. As the experimental materials of geophysical researches on chink B1 on skilled-methodical range "the Tube White", in the Arkhangelsk diamondiferous province (AAP) have been used. In the course of modelling the identification models reflecting correlation dependences between petrographic type of breed and parametres of geophysical fields are developed.

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

В работе [1] были рассмотрены возможности метода группового учета аргументов (МГУА) при решении задач статистической обработки петрофизических данных. В настоящей статье представлены результаты использования метода при статистическом анализе данных каротажа.

В качестве экспериментальных были использованы материалы геофизических исследований, выполненных в скважине Б1 на опытно-методическом полигоне «Трубка Белая», созданном в пределах одноименной кимберлитовой трубки в Архангельской алмазодобывающей провинции (ААП).

Трубка Белая представляет собой мелкую по размерам (105 × 43 м) убогоалмазодобывающую кимберлитовую диатрему. В составе ксенотуфобрекчий, формирующих трубку, присутствуют кимберлитовые автолиты, обломки кимберлитов, псевдоморфозы сапонита по оливиному, ксенолиты пород венда, постмагматические и ксеногенные минералы, а также песчано-глинистая связующая масса. Вмещают трубку Белая красноцветные по-

роды золотицкой и мельской подсвит верхнего отдела венда, представленные неравномерно переслаивающимися алевролитами, песчаниками и аргиллитами. Перекрывают трубку образования урзугской свиты среднего карбона и маломощные четвертичные отложения, средняя мощность которых составляет 37,2 м.

Изучение физических свойств пород Первомайско-Кольцовского куста трубок взрыва, к которым принадлежит трубка Белая, показало, что кимберлитовые породы отличаются от вмещающих отложений повышенными значениями магнитной восприимчивости и остаточной намагниченности.

Несмотря на широкий разброс значений удельного электрического сопротивления (УЭС) в верхних частях разреза, кимберлитовые тела и вмещающие их породы в благоприятных геологических ситуациях достаточно отчетливо разделяются по этому параметру. С увеличением глубины из-за присутствия в разрезе высокоминерализованных пластовых вод дифференциация УЭС между кимберлитами и вмещающими их породами венда практически отсутствует [2].

На опытно-методическом полигоне «Трубка Белая» с целью уточнения возможностей и оптимизации комплекса методов геофизических исследований в скважинах (ГИС) были проведены: гамма-каротаж в интегральной и спектрометрической модификациях (ГК и СГК), электрокаротаж методами КС и ПС, скважинная магниторазведка (СМ), индукционный каротаж (ИК) и каротаж магнитной восприимчивости (КМВ).

Интерпретация каротажных диаграмм носила качественный характер и проводилась с привлечением геологического описания скважин традиционными способами.

В результате анализа результатов ГИС специалистами «АЛРОСА-Поморье» было сделано заключение о том, что в конкретной геологической ситуации наиболее информативными методами являются ГК, СГК и ИК, а информация, получаемая по данным остальных методов, носит вспомогательный характер.

Для более достоверной количественной оценки эффективности применяемых в ААП методов ГИС сотрудниками кафедры геофизики ВГУ был выполнен статистический анализ данных всего комплекса геолого-геофизических исследований скважин. При этом была предпринята попытка построения математической модели, отражающей корреляционные зависимости между литотипами пород и соответствующими им геофизическими параметрами, полученными по результатам скважинных геофизических исследований. С этой целью был использован метод группового учета аргументов, общие положения которого изложены в работах [1; 3; 4].

В процессе моделирования методом группового учета аргументов, как и при выполнении множественного регрессионного анализа, выявляется форма зависимости и определяется набор факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на зависимую переменную. Однако принципиальное отличие МГУА от традиционных методов регрессивного анализа заключается в том, что форма зависимости не задается заранее, а выбирается из множества моделей, генерируемых в процессе вычислительного эксперимента. Генерация математических моделей осуществляется автоматически с использованием специальных алгоритмов. Переменные-аргументы выбираются из таблицы входных данных [3]. 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. Принцип самоорганизации, лежащий в основе МГУА, можно сформулировать следующим образом: при постепенном увеличении сложности модели значение внутренних критериев уменьшается, а внешние критерии проходят через свои минимумы, что позволяет определить модель оптимальной сложности.

Таким образом, в процессе идентификации определяется вид уравнения связи между зависимой переменной и влияющими на нее факторами-аргументами. При этом из предложенного набора возможных факторов выбираются наиболее значимые, оказывающие существенное влияние на зависимую переменную.

Для численной реализации метода группового учета аргументов использовалась разработанная на кафедре геофизики ВГУ программа LIT_FORM (автор О. М. Муравина), позволяющая построить по исходным данным идентификационную модель. Для генерации множества вариантов модели используется многорядный алгоритм с комбинаторным перебором вариантов. 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 зачистки коэффициентов получить семь вариантов моделей:

$$x_1 = a_1 + a_2x_1 + a_3x_2 + a_4x_1x_2. \quad (1)$$

Оптимальная модель выбирается по критерию эпигнозного прогноза [1], представляющего собой среднеквадратическую ошибку модели, рассчитанную на точках проверочной последовательности переменных, не использованных для получения оценок коэффициентов модели.

$$n^2(pr) = \frac{\sum_{t \in N_B} (y_t^M - y_t)^2}{\sum_{t \in N} y_t^2} \rightarrow \min, \quad (2)$$

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

Разделение таблицы наблюдений осуществлялось следующим образом:

$$N_1 = (0,7) N;$$

$$N_2 = (0,3) N,$$

где N_1, N_2 – размерность векторов переменных обучающей и проверочных последовательностей соответственно; N – размерность векторов переменных входной таблицы данных.

Такой способ разделения традиционно 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 эпигнозного прогноза состоит в том, что он ориентирован на выбор модели, которая будет оптимальной на множестве тех точек, которых еще нет в таблице входных данных.

Подробное описание алгоритма, используемого в программе LIT_FORM, приводится в работе [4].

Предметом настоящего исследования стала оценка геологической результативность исследований методами ГК, СМ, КМВ и ИК. Основной задачей статистического анализа было построение идентификационной модели, отражающей корреляционные зависимости между литотипом породы и параметрами наблюдаемых геофизических полей.

Специфика используемого статистического подхода позволила автоматизировать процесс выбора наиболее информативных методов, которые могут использоваться для выделения конкретных литотипов пород при литологическом расчленении геологических разрезов по данным геофизических исследований в скважинах.

Разработанная модель может использоваться для автоматизации процесса геологической интерпретации материалов ГИС, что представляет значительный интерес в связи с использованием компьютеризированных каротажных станций (КАМК «Алмаз-1» и пр.), выполняющих цифровую регистрацию данных каротажа и укомплектованных персональным компьютером.

Таблица входных данных была сформирована по результатам ГИС и геологическому описанию пород по скважине Б1.

Показания геофизических методов индексировались в зависимости от значений зарегистрированных геофизических параметров (полей) в соответствии с табл. 1. При этом были выделены слабоинтенсивные (1), средней интенсивности (2) и высокоинтенсивные поля (3).

В соответствии со стратиграфической колонкой скважины Б1 было выделено три основных литотипа пород, индексация которых приведена в табл. 2.

Таблица 1

Индексация показаний геофизических методов

Интенсивность поля	Индекс	ГК, мкР/ч	СМ, нТл	КМВ, $\times 10^{-5}$ ед. СИ	ИК, мСм/м
Слабоинтенсивное	1	0–4	54 300–54 500	0–160	0–30
Средней интенсивности	2	4–7	54 500–54 650	160–350	30–60
Высокоинтенсивное	3	7–10	54 650–54 800	350–500	60–100

Таблица 2

Индексация литотипов пород

Литотип	Индекс
Супесь	1
Песчаник	2
Ксенотуфобрекчия и кимберлит	3

В табл. 3 описаны параметры, используемые для построения идентификационных моделей.

Согласно табл. 1–3 по данным каротажа и геологическому описанию разреза по скважине Б1 была сформирована таблица входных данных для выполнения моделирования (табл. 4).

Таблица 3

Параметры, используемые для построения моделей

Параметр	Геол. смысл параметра	Обозначение	Показатель индексации параметра
1	Литотип	x_1	Литотип
2	Данные ГК	x_2	Уровень интенсивности
3	Данные СМ	x_3	Уровень интенсивности
4	Данные КМВ	x_4	Уровень интенсивности
5	Данные ИК	x_5	Уровень интенсивности

Таблица 4
Входные данные для выполнения математического моделирования

Литотип	Индекс показаний геофизических методов			
	ГК	СМ	КМВ	ИК
1	3	3	3	3
1	1	3	1	1
2	1	3	1	1
2	1	3	1	1
3	2	2	3	3
3	3	2	2	3
3	2	2	2	3
3	2	2	2	3
3	2	2	2	3
3	3	2	3	3
3	3	2	2	3
3	2	2	1	3
2	1	2	1	1

Размерность таблицы входных данных и вид опорной функции позволили включить в идентификационный процесс только на одном ряду 42 модели, при необходимости прохождения во второй ряд число моделей-претендентов возрастает до 357.

Исходя из задач моделирования, зависимой переменной был назначен литотип горной породы, значения геофизических параметров (полей), получаемые по данным ГИС, принимались переменными-аргументами.

В результате проведенного вычислительного эксперимента получены две математические модели, отражающие корреляционные связи между литотипами пород и данными ГИС.

Выполним анализ полученных моделей.

Модель 1 получена после второго ряда селекции. В переборе участвовало 357 вариантов уравнений. Параметры выбранной модели приведены в табл. 5.

По значениям коэффициентов, приведенным в табл. 5, используя методику «обратного хода» [3], получаем уравнение (3):

$$x_1 = -3,79 - 2,22x_3 - 1,34x_3x_4 + 6,83x_4 + 0,20x_3^2 + 0,29x_3^2x_4 - 0,01x_3x_4^2 + 0,04x_3^2x_4. \quad (3)$$

Анализ данного уравнения свидетельствует о том, что в первой модели из 4 аргументов, задействованных в процессе математического мо-

делирования, выявлена связь моделируемого параметра лишь с двумя из них – интенсивностью магнитного поля x_3 и величиной магнитной восприимчивости x_4 .

Таблица 5
Параметры оптимальной модели, рассчитанной для варианта 1

Номер в данном ряду	1-й параметр (Т)	2-й параметр (Т)	Номер вида частного описания	Номер ряда	Коэффициенты частного описания				Значение критерия
					a_1	a_2	a_3	a_4	
1	4	10	7	2	0,038	0,289	1,400	0,037	0,000146
2	3	4	5	1	5,74	1,377	0	0,023	0,021693
3	3	4	7	1	3,17	0,388	1,417	0,583	0,015181

Рассмотренная модель (3) позволяет по этим данным определить литотип породы. На рисунке показаны графики экспериментальных и модельных значений петрографического типа пород для модели 1.

Оценка качества полученной модели приводится в табл. 6, из которой следует, что по данным СМ и КМВ горные породы, представляющие в данной геологической ситуации наибольший интерес (ксенотуфобрекчия), выявляются практически однозначно. Песчаники выделяются с достоверностью, близкой к 30 %, а супеси – с достоверностью, близкой к 50 %.

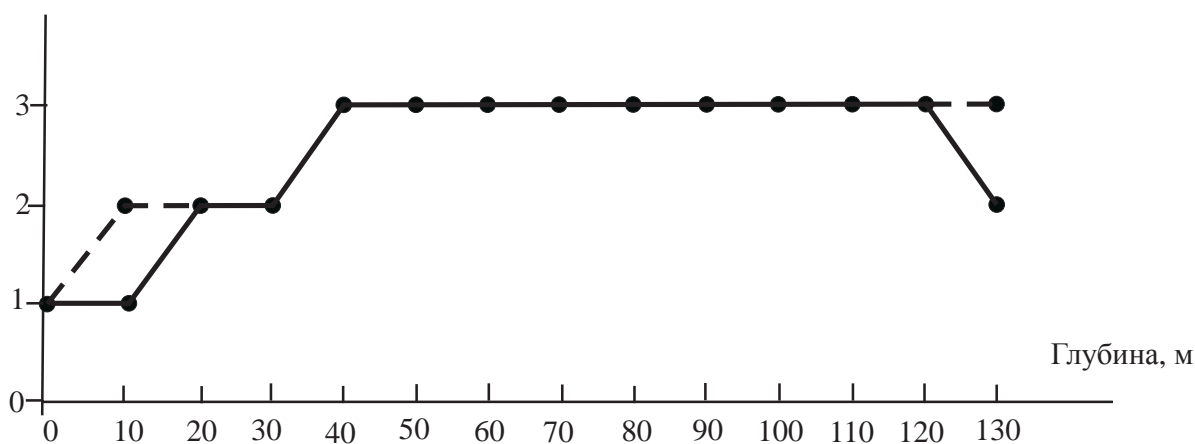
Таблица 6
Сравнительные результаты моделирования

Литотип	Достоверность определения литотипа (%) по методам	
	СМ и КМВ (модель 1)	ИК и СМ (модель 2)
Ксенотуфобрекчия	100	71
Песчаник	30	100
Супесь	50	0

Полученные результаты согласуются с известными данными о физических свойствах горных пород, которые достаточно хорошо изучены в пределах опытно-методического полигона. Согласно результатам петрофизических исследований, на фоне остальных пород ксенотуфобрекчии обладают аномальными высокой магнитной восприимчивостью (максимальное значение магнитной восприимчивости – порядка 700×10^{-5} ед. СИ,

Модель 1

Литотип пород



Модель 2

Литотип пород

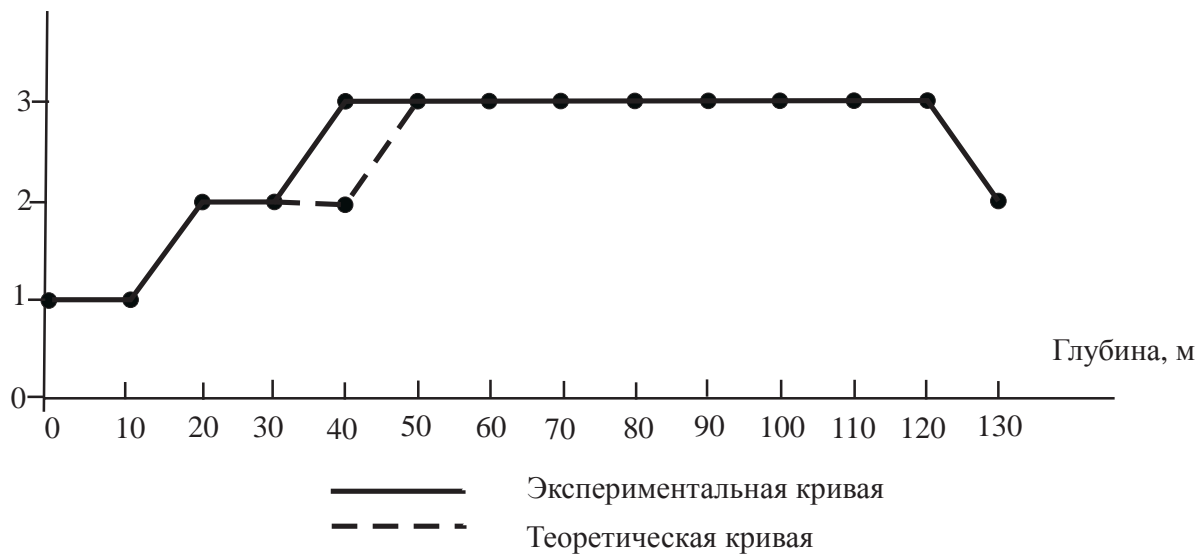


Рис. 1. Результаты моделирования литотипов пород как функции данных каротажа

среднее – порядка 300×10^{-5} ед. СИ). Следовательно, они и должны хорошо выявляться по данным СМ и КМВ.

На основании результатов моделирования (выбор в качестве наиболее значимого фактора данных КМВ) можно предположить, что интенсивность магнитного поля, регистрируемого при проведении СМ, определяется преимущественно индукционной намагниченностью.

В этом случае под вопрос ставится целесообразность постановки палеомагнитного метода в комплексе с абсолютными методами с целью

геологического (возрастного) датирования кимберлитов (такие выводы были сделаны в процессе первичной интерпретации).

Рассмотрим модель 2. Данная модель получена после первого ряда селекции. В переборе участвовало 42 варианта уравнений. Параметры выбранной модели приведены в табл. 7.

По значениям коэффициентов, приведенным в табл. 7, была получена модель 2, которая определяется уравнением (4):

$$x_1 = 2,03 - 0,25x_3 + 0,29x_5 + 0,12x_3x_5. \quad (4)$$

Таблица 7
 Параметры оптимальной модели, рассчитанной
 для варианта 2

Номер в данном ряду	1-й параметр (Г)	2-й параметр (Г)	Номер вида частного описания	Номер ряда	Коэффициенты частного описания				Значение критерия
					a_1	a_2	a_3	a_4	
1	2	3	7	1	2,030	0,251	0,295	0,121	0,053026

Анализ уравнения (4) свидетельствует о том, что во второй модели из 4 аргументов, задействованных в процессе математического моделирования, наиболее существенная зависимость моделируемого параметра выявлена от двух аргументов – интенсивности магнитного поля x_3 и величины удельной электрической проводимости x_5 .

Модель (4) позволяет по этим данным определить литотип породы. На рисунке показаны графики фактических и полученных моделированием (модель 2) литотипов пород по скважине Б1.

Из табл. 6 следует, что по этой модели наиболее достоверно определяются породы второго литотипа – песчаники. Ксенотуфобрекчии определяются с достоверностью порядка 71 %, супеси – 0 %. Такие результаты вполне объяснимы. Индукционный каротаж наиболее эффективен для выявления песчаников, которые в данном разрезе обладают аномально высокими значениями удельного электрического сопротивления.

Попытки включить в модель результаты гамма-каротажа не привели к удовлетворительным результатам. Использование в модели данных ГК снижает надежность определения всех трех типов пород.

Полученные результаты моделирования позволяют оценить используемые методы ГИС с

точки зрения их информативности, в частности:

– для выявления продуктивных интервалов разреза оптимальным является применение методов СМ и КМВ, их комплексное использование повышает достоверность исследований;

– ИК наиболее эффективен при выявлении в разрезе песчаников, обладающих аномально высокими значениями удельного электрического сопротивления.

Модели, в которых в качестве значимого фактора использовались данные ГК, оказались наименее достоверными, что может быть связано с ограниченными рамками выполненных исследований.

Рассмотренный способ интерпретации позволяет автоматизировать литологическое расчленение разрезов и повысить надежность интерпретации данных ГИС, особенно при условии их цифровой регистрации.

Вместе с тем, представленные результаты следует рассматривать лишь в качестве предварительных, призванных оценить саму возможность использования метода группового учета аргументов для литологического расчленения геологических разрезов по материалам ГИС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стародубцев В. С. Квантификация природных систем. Гидрогеоэкологические системы / В. С. Стародубцев. – Воронеж : Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2000. – 72 с.
2. Зинчук Н. Н. Петрофизика кимберлитов и вмещающих пород / Н. Н. Зинчук, А. Т. Бондаренко, М. Н. Гарат. – М. : Недра-Бизнесцентр, 2002. – 695 с.
3. Ивахненко А. Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем / А. Г. Ивахненко. – Киев : Наук. думка, 1982. – 296 с.
4. Муравина О. М. Возможности метода группового учета аргументов при статистической обработке петрофизических данных / О. М. Муравина // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2009. – № 2, июль–декабрь. – С. 150–154.

Воронежский государственный университет

А. А. Аузин, кандидат технических наук, доцент
 кафедры геофизики

AAuzin@yandex.ru

Тел. 8 (473) 220-83-85

О. М. Муравина, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геофизики

Omur@bk.ru

Тел. 8 (473) 220-83-85

Voronezh State University

A. A. Auzin, the Candidate of Technical Sciences, the Senior lecturer of Chair of Geophysics

AAuzin@yandex.ru

Tel. 8 (473) 220-83-85

O. M. Muravina, the Candidate of Geology and Mineralogy Sciences, the Senior lecturer of Chair of Geophysics of Geophysics

Omur@bk.ru

Tel. 8 (473) 220-83-85