
Научные статьи

УДК 550.382.3

DOI: 10.31431/1816-5524-2022-3-51-5-15

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГРУППОВОГО УЧЕТА АРГУМЕНТОВ ДЛЯ АНАЛИЗА ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ

© 2021 О.М. Муравина¹, И.А. Пономаренко¹, М.В. Минц²

¹Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия, 394006;
e-mail: muravina@geol.vsu.ru

²Геологический институт РАН, Москва, Россия, 119017

В работе рассматривается круг задач, связанных с обработкой и анализом петрофизических данных, которые эффективно решаются методом группового учета аргументов (МГУА). МГУА — метод машинного обучения, который является альтернативой регрессионному анализу и нейросетевому моделированию. Метод был опробован при работе с информацией петрофизической базы данных кристаллических и осадочных пород Воронежского кристаллического массива (ВКМ). Основой технологии анализа является формирование комплексных идентификационных уравнений, которые позволяют обобщать, анализировать и эффективно использовать петрофизические данные. Ранее было рассмотрено использование таких уравнений для оценки рудоносности никеленосных интрузий мамонского комплекса. Приводятся примеры решения задач робастного оценивания и идентификации петрофизических данных. Показано, что идентификационные модели МГУА позволяют автоматизировать процедуру выявления выбросов в данных, оценить принадлежность пород к определенному вещественному комплексу пород. Поскольку петрофизическая информация является необходимым звеном геологической интерпретации геофизических наблюдений, интересен опыт получения комплексных моделей, связывающих плотность метаморфических и интрузивных пород ВКМ с удельным электрическим сопротивлением и магнитной восприимчивостью.

Ключевые слова: петрофизика, метод группового учета аргументов, Воронежский кристаллический массив.

ВВЕДЕНИЕ

Петрофизическая информация — важная часть знаний, на основе которой в ходе геолого-геофизической интерпретации осуществляется переход от физической к геологической модели среды.

Исследования, выполненные на кафедре геофизики Воронежского госуниверситета, показали эффективность метода группового учета аргументов (МГУА) при решении широкого круга задач, связанных с обработкой петрофизической информации (Муравина, 2009, 2012, 2013; Муравина, Глазнев, 2014; Муравина, Жаворонкин, 2014; Муравина и др., 2013; Муравина, Пономаренко, 2016; Muravina et al.,

2019). Метод был успешно применен в качестве одного из ключевых элементов технологии 3D петрофизического моделирования при создании петроплотностной цифровой модели верхней части литосферы территории Воронежского кристаллического массива (ВКМ) (Глазнев и др., 2016, 2020; Минц и др., 2017; Муравина, 2016). Структурно-параметрические уравнения, связывающие петрофизические, геологические и пространственные атрибуты, позволяют выполнить робастный, идентификационный, классификационный и пространственный анализ данных. Ранее было рассмотрено использование таких уравнений для оценки рудоносности никеленосных интрузий мамонского комплекса (Муравина и др., 2019).

В настоящей работе приведены примеры, которые демонстрируют возможности применения МГУА для решения различных задач, направленных на обобщение и формализацию петрофизической информации, что обеспечивает эффективность и геологическую содержательность комплексной интерпретации геофизических данных.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

При исследовании ВКМ основным источником фактического материала является цифровая пространственная петрофизическая база данных. Она сформирована по результатам более 90 000 петрофизических определений образцов керна кристаллических и осадочных пород по 4437 скважинам, пробуренным в пределах региона (рис. 1) (Глазнев и др., 2020). Объем данных обеспечивает репрезентативность выборок для пород различных возрастных групп, петрологических типов и структурно-вещественных комплексов (СВК). Каждое значение петрофизического параметра имеет географические координаты, соответствующие координатам скважины, из которой был взят образец керна, и глубину отбора образца. В базе данных дано

также геологическое описание образца, для кристаллических пород определена принадлежность к тому или иному СВК, а для осадочных — к соответствующей возрастной группе. Строгая пространственная привязка и описанные геологические атрибуты позволили отработать технологию идентификационного анализа МГУА.

МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Метод группового учета аргументов — это метод машинного обучения (индуктивного моделирования), базирующийся на идеях синергетики о самоорганизации сложных систем (Ивахненко, 1982; Муравина, 2012; Муравина, Пономаренко, 2016; Muravina et al., 2019). МГУА является альтернативой традиционному регрессионному анализу и нейросетевому моделированию, которые в настоящее время широко используются в практике геолого-геофизических исследований. В отличие от методов регрессионного анализа МГУА использует не априорно заданную структуру модели, а создает и анализирует многоуровневое множество вариантов модельных уравнений, которые различаются не только численными коэффициентами, но и

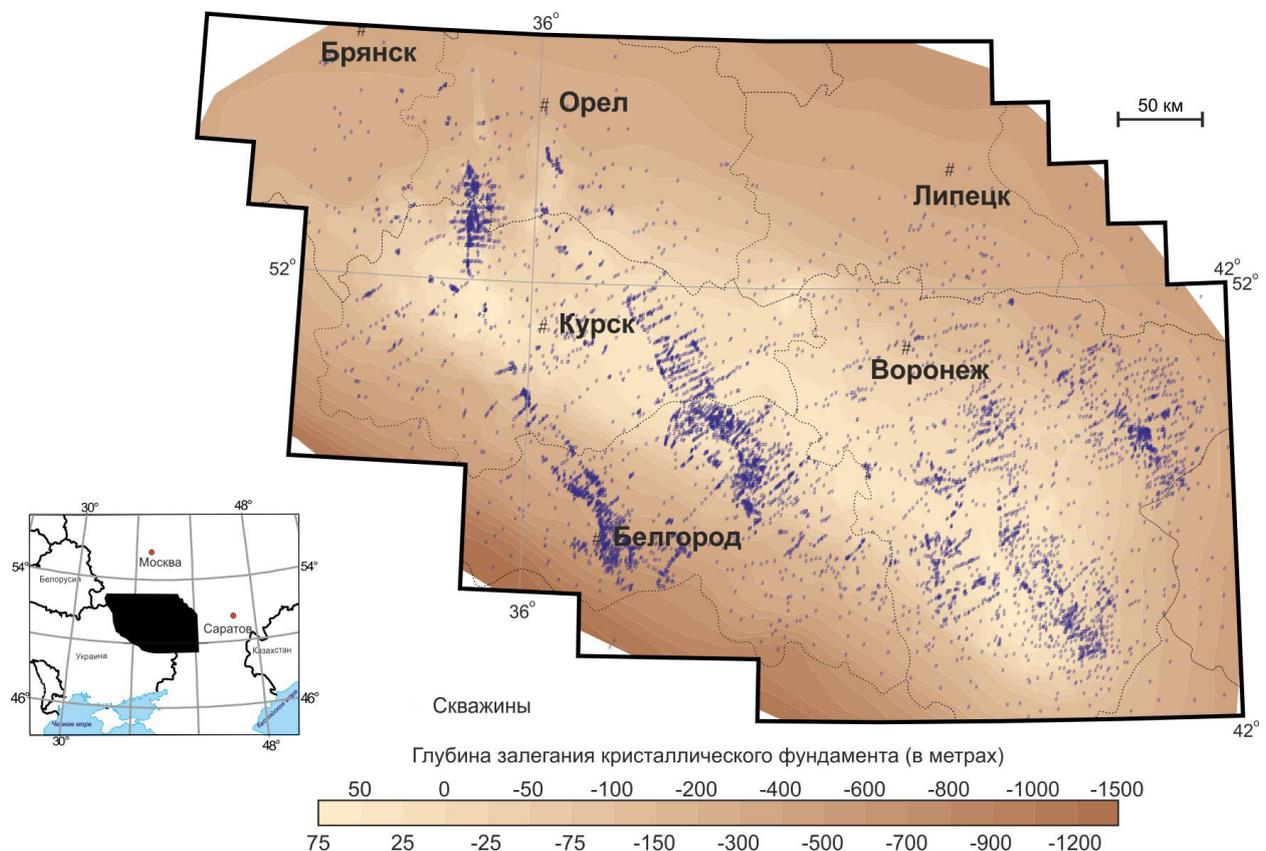


Рис. 1. Схематическая карта глубин фундамента ВКМ и расположения скважин (по Глазнев и др., 2020).

Fig. 1. Schematic map of the depths of the VCM foundation and the location of wells (according to Glaznev et al., 2020).

структурой и набором компонентов-факторов. Подобно нейронным сетям все модели формируются на обучающей последовательности, а оптимальная модель выбирается по минимальным значениям внешних критериев, рассчитываемых на тестовых данных, не участвующих в процедуре формирования моделей. При создании и выборе моделей используется многорядная селекция, т.е. фактически реализуется генетический алгоритм. МГУА позволяет избежать недостатков нейронных сетей, элементы обработки в которых ограничены аналогией с нейронами, в то время как в МГУА используются различные типы более мощных полиномиальных функций. МГУА использует внешние критерии проверки оптимизации для автоматического определения размера и связности сети, а также элементов и коэффициентов для оптимальной модели. Такой подход существенно оптимизирует процесс моделирования и минимизирует вмешательство пользователя: самые значимые входные параметры выбираются автоматически, а полученная стохастическая зависимость имеет полиномиальный вид. При этом существенно расширяются возможности геологического истолкования полученных результатов.

Для выполнения идентификационного анализа МГУА была использована программа, реализующая многорядный комбинаторный алгоритм, адаптированный к работе с геолого-геофизическими и петрофизическими данными (Муравина, Пономаренко, 2016). Объектом исследования является литологический тип пород в рамках определенного СВК либо совокупность литологических типов, характерных для изучаемого СВК. Результатом идентификационного моделирования является получение комплексных модельных уравнений, позволяющих объединить различные петрофизические параметры. Структура модельных уравнений зависит от номера частного описания и уровня генерации моделей. В приведенных далее примерах оптимальные уравнения были получены на первом или втором уровне генерации моделей. Модели первого уровня имеют вид одного из семи уравнений (частных описаний):

$$Y_1 = a_1 + a_2 \cdot x_i \cdot x_j \quad (1)$$

$$Y_2 = a_1 + a_2 \cdot x_i \quad (2)$$

$$Y_3 = a_1 + a_2 \cdot x_j + a_3 \cdot x_i \cdot x_j \quad (3)$$

$$Y_4 = a_1 + a_2 \cdot x_j \quad (4)$$

$$Y_5 = a_1 + a_2 \cdot x_i + a_3 \cdot x_i \cdot x_j \quad (5)$$

$$Y_6 = a_1 + a_2 \cdot x_i + a_3 \cdot x_j \quad (6)$$

$$Y_7 = a_1 + a_2 \cdot x_i + a_3 \cdot x_j + a_4 \cdot x_i \cdot x_j \quad (7)$$

Здесь Y_1 – Y_7 — варианты модельных значений зависимой переменной; a_1, a_2, a_3, a_4 — числовые коэффициенты; x_i и x_j — пара переменных-аргументов, выбранная из входных данных. При переходе во второй ряд модельные уравнения усложняются, так как в качестве переменных-аргументов выступают модели первого ряда. В общем виде модельное уравнение второго ряда можно записать следующим образом:

$$Z_k = f(Y_i, Y_j, b_1, b_2, b_3, b_4), \quad (8)$$

где Z_k — модельные значения зависимой переменной; k — номер частного описания; Y_i, Y_j — переменные аргументы — модели первого ряда (1)–(8); b_1, b_2, b_3, b_4 — числовые коэффициенты.

Организация базы данных в формате ГИС-проекта позволяет использовать в процессе идентификации не только петрофизические характеристики образца, но и его координаты в пространстве (широту, долготу и глубину отбора) (Муравина и др., 2013). Включение в процедуру идентификационного анализа пространственных атрибутов оправдано тем, что петрофизические характеристики пород одного петротипа могут существенно варьировать в зависимости от геодинамических условий их формирования (Афанасьев, 2012).

Зависимой переменной может выступать любая петрофизическая характеристика, но, как показывает опыт работы с петрофизическими данными, наиболее качественные зависимости получаются для плотности или скорости распространения упругих волн. Представление модельного уравнения в виде полиномиальной зависимости позволяет дать его физическую трактовку и однозначно оценить степень влияния каждого фактора. С помощью идентификационных уравнений рассчитываются модельные значения зависимой переменной. Оптимальная модель выбирается среди множества сгенерированных моделей по минимальным значениям внешних критериев (Ивахнеко, 1982; Муравина, 2012). Качество оптимальной модели, полученной для петрофизических данных, можно оценить независимо, соизмеряя среднеквадратичную невязку модельных и экспериментальных значений (*δmod*) со среднеквадратичным отклонением анализируемой выборки (*δэксп*). Логично считать модель приемлемой, если *δmod* не превышает *δэксп*. Очевидно, что не всегда можно получить идентификационные модели удовлетворительного качества, поскольку это зависит не только от репрезентативности выборок, но и определяется внутренними свойствами природных объектов. Однако, как показал опыт работы с большими объемами петрофизических данных (Глазнев

и др., 2016, 2020; Минц и др., 2017), поиск таких взаимосвязей часто бывает успешным. В этом случае полученные идентификационные модели можно использовать для решения различных задач, примеры которых рассмотрим далее.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Робастное оценивание. Рассмотрим результаты применения МГУА для робастного оценивания экспериментальных петрофизических данных. Основная идея робастного анализа (Huber, Ronchetti, 2009) заключается в выявлении и исключении выбросов, которые могут привести к искажениям оценок статистических характеристик изучаемой случайной величины. Природа выбросов значений петрофизических параметров может быть различной: ошибки измерений, ошибки записи данных, принадлежность образца к иной генеральной совокупности. С другой стороны, аномальные значения могут быть связаны с естественной изменчивостью петрофизических характеристик в рамках исследуемого объекта, и в этом случае не должны рассматриваться как выбросы. Использование идентификационных моделей МГУА позволяет автоматизировать процедуру выявления и классификации выбросов данных и сделать ее максимально объективной.

Методика робастного оценивания петрофизических данных определенной выборки заключается в следующем. На первом этапе выполняется расчет статистических характеристик: определяются среднее, медианные значения, дисперсия и стандартное отклонения. Наиболее вероятные границы вариаций параметра оцениваются по значениям 5% и 95% квантилей (Глазнев и др., 2020; Муравина, Глазнев, 2014). При этом для плотности и скорости распространения упругих волн мы ориентируемся на нормальный закон распределения, что, как правило, оправдано при условии статистической однородности и репрезентативности выборок. Для магнитных параметров и значений удельного электрического сопротивления, которые, меняются в очень широких пределах, предполагаем логнормальный закон распределения и, соответственно, рассматриваем десятичные логарифмы значений параметров.

На втором этапе рассчитываются идентификационные модели МГУА. Сравнение модельных и экспериментальных значений зависимой переменной позволяет выявить и классифицировать выбросы. Положим, что выбросом будем считать только те позиции, в которых расхождение экспериментальных и модельных значений превышает величину стандартного отклонения экспериментальных данных, т.е. будем рассматривать это значение, как пороговое.

Рассмотрим различные типы выбросов.

Экспериментальные и модельные значения выходят за границы диапазона разброса данных, оцененного на первом этапе на основе квантильного анализа, однако, разница между ними не превышает величину стандартного отклонения. Вывод — значения соответствуют идентификационному уравнению и могут быть вызваны естественными вариациями физических свойств, то есть принадлежать изучаемой генеральной совокупности;

Экспериментальные данные выходят за пределы достоверного диапазона, а модельные значения за границы диапазона не выходят. Разница модельных и экспериментальных значений превышает стандартное отклонение, следовательно, эти значения экспериментальных данных являются выбросами.

Модельные значения зависимой переменной выходят за рамки установленного диапазона. Причиной может быть выброс в экспериментальных значениях переменных-аргументов, которые формируют модельное уравнение.

Проиллюстрируем методику идентификации выбросов на примере сланцев александровской свиты ВКМ (Литосфера..., 2012; Чернышов и др., 2009). Объем выборки — 197 образцов. Идентификационное уравнение вида (7) связывает скорость упругих волн (V — зависимая переменная) с плотностью (σ) и глубиной отбора образца (H): $V=f(\sigma, H)$. Графики экспериментальных и модельных значений скорости упругих волн представлены на рис. 2. Наиболее вероятные границы вариаций скорости, определенные по значениям 5% и 95% квантилей составили от 4.7 км/с до 6.8 км/с. Величина стандартного отклонения рассматриваемой выборки составила 0.6 км/с и это значение примем за пороговое. Рассмотрим различные типы выбросов (рис. 2). Первый тип (образцы № 6 и № 165) — за нижнюю границу принятого диапазона разброса данных выходят как экспериментальные, так и модельные значения, однако, разница между ними не превышает пороговое значение, что свидетельствует о том, что эти значения соответствуют идентификационному уравнению и могут быть вызваны естественными вариациями физических свойств, то есть не считаются выбросами. Во втором случае наблюдается выход за пределы достоверного диапазона экспериментальных данных (рис. 2, обр. №№ 34–40, 42, 70, 115, 116), экспериментальные значения скорости ниже предельно допустимых, установленных по значению 5% квантиля. При этом модельные значения за границы диапазона не выходят. Разница модельных и экспериментальных значений превышает пороговое значение. В третьем случае для образцов №№ 133, 192, 194, 195 наблюдаются значительные отклонения от установленного диапазона только

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГРУППОВОГО УЧЕТА

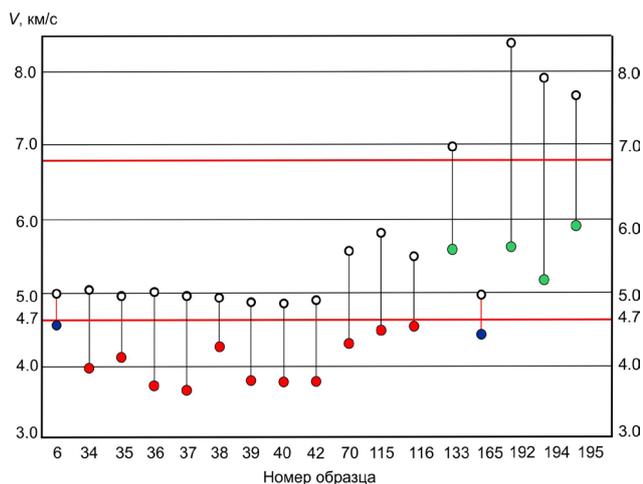


Рис. 2. Идентификация выбросов на примере сланцев александровской свиты: заполненные кружки соответствуют экспериментальным значениям скорости упругих колебаний, незаполненные — модельным; синим цветом показаны выбросы первого типа, красным — второго типа, зеленым — третьего типа; границы достоверного диапазона данных (4.7–6.8) км/с обозначены красным цветом.

Fig. 2. Identification of emissions using the example of the alexandrovskaya formation shales: filled circles correspond to experimental values of the elastic vibration velocity, unfilled ones correspond to model ones; blue ones are emissions of the first type, red ones are of the second type, green ones are of the third type; the boundaries of the reliable data range (4.7–6.8) km/s are indicated in red.

модельных значений скорости. Причина такого поведения модельной кривой становится ясной при изучении аргументов идентификационного уравнения: образцы №№ 194 и 195 имеют аномальные значения плотности (табл. 1), нехарактерные для сланцев александровской свиты.

Идентификационное уравнение высокой точности можно с полным основанием использовать в качестве основного инструмента робастного оценивания данных: в этом случае можно считать, что найденные взаимосвязи между петрофизическими параметрами и пространственными атрибутами являются характерными для изучаемого геологического объекта.

Индикатором принадлежности к такому объекту является такое соответствие модельных

и экспериментальных данных, когда их разница не превышает пороговое значение. В рассматриваемом примере можно с уверенностью отнести данные по 74% образцов к сланцам александровской свиты (рис. 3).

Другой пример иллюстрирует результаты робастного оценивания выборки из 53 образцов габброноритов мамонского комплекса (Литосфера..., 2012; Чернышов, 1986; Чернышова, 1999), отобранных из одной скважины (рис. 4). Нелинейное идентификационное уравнение получено на втором уровне генерации моделей и связывает плотность (σ) со скоростью распространения упругих волн (V), намагниченностью (χ) и поляризуемостью (η): $\sigma = f(V, \chi, \eta)$. Среднее значение плотности составляет 3.04 г/см³,

Таблица 1. Идентификация выбросов на примере сланцев александровской свиты

Table 1. Identification of emissions by the example of the shales of the alexanderskaya formation

№ обр.	$V_{\text{эксп}}$, км/с	$V_{\text{модел}}$, км/с	σ , г/см ³	H , м	ϵ , км/с
6	4.60	5.07	2.60	-92.7	-0.47
34	4.00	5.13	2.88	-853.1	-1.13
35	4.15	5.02	2.83	-860.8	-0.87
36	3.75	5.09	2.87	-866.3	-1.34
37	3.65	5.04	2.85	-873.5	-1.39
38	4.30	4.99	2.83	-880.3	-0.69
39	3.80	4.95	2.81	-886.5	-1.15
40	3.80	4.93	2.80	-890.3	-1.13
42	3.80	4.97	2.84	-910.9	-1.17
70	4.35	5.70	2.78	-208.6	-1.35
115	4.55	5.97	2.81	-92.0	-1.42
133	5.60	7.01	3.10	-182.1	-1.41
165	4.45	5.05	2.60	-122.8	-0.60
192	5.55	8.44	3.41	-119.3	-2.89
194	5.95	7.87	3.28	-129.2	-1.92
195	5.85	7.66	3.23	-133.1	-1.81

Примечание. $V_{\text{эксп}}$ — экспериментальные значения скорости упругих волн; $V_{\text{модел}}$ — модельные значения скорости упругих волн; σ — плотность; H — глубина отбора образца; ϵ — разница между экспериментальными и модельными значениями плотности.

Note. $V_{\text{эксп}}$ — experimental values of the elastic wave velocity; $V_{\text{модел}}$ — model values of the elastic wave velocity; σ — density; H — sampling depth; ϵ — the difference between the experimental and model density values.

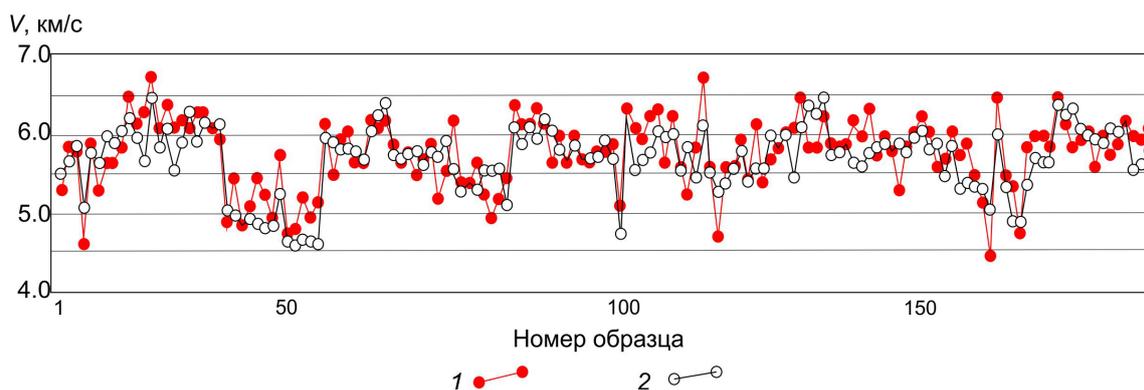


Рис. 3. Экспериментальные и модельные значения скорости распространения упругих волн для 74% данных: 1 — экспериментальные значения скорости; 2 — модельные значения

Fig. 3. Experimental and model values of the elastic wave propagation velocity for 74% of the data: 1 — experimental velocity values; 2 — model values.

границы достоверного диапазона по значениям квантилей 5% и 95% порядка составляют 2.96 г/см^3 и 3.14 г/см^3 , соответственно. Среднеквадратичное отклонение исходных значений плотности равно 0.05 г/см^3 , а среднеквадратичная невязка модельных и экспериментальных значений не превышает 0.03 г/см^3 , что свидетельствует о высоком качестве полученной зависимости. Для образца № 3 очевиден выброс первого типа. Анализ значений переменных-аргументов показывает, что этот образец, помимо плотности имеет также аномально высокое значение поляризуемости (18.9% при среднем 1.5%). Петрофизические определения для образцов № 12 и № 53 относятся к выбросам второго типа.

Таким образом, применение идентификационных уравнений, полученных МГУА,

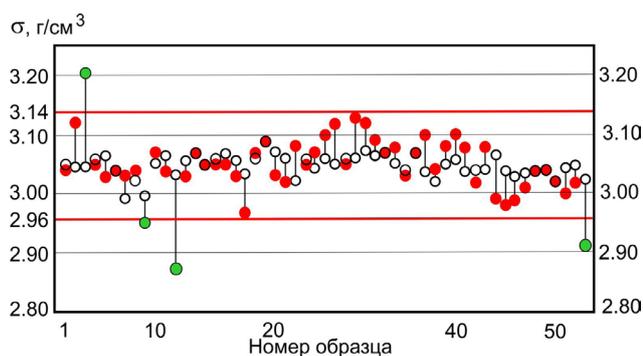


Рис. 4. Идентификация выбросов на примере габбро-норитов мамонского комплекса: заполненные кружки соответствуют экспериментальным значениям скорости упругих колебаний, незаполненные — модельным; зеленым цветом показаны выбросы 1 и 2 типа. Границы достоверного диапазона данных ($2.96\text{--}3.14 \text{ г/см}^3$) обозначены красным цветом.

Fig. 4. Identification of emissions by the example of gabbro-norites of the mamonsky complex: red circles correspond to experimental values of the elastic vibration velocity, unfilled ones — to model ones; green ones — emissions of type 1 and 2. The boundaries of the reliable data range ($2.96\text{--}3.14 \text{ г/см}^3$) are indicated in red.

с одной стороны позволяет автоматизировать процедуру выявления выбросов при работе с большим объемом информации, а с другой стороны обеспечивает гибкий подход, позволяющий максимально полно использовать уникальные экспериментальные данные. Технология робастного оценивания данных была применена при работе с петрофизической базой данных ВКМ и при формировании петроплотностной карты региона (Глазнев и др., 2020).

Идентификация пород. Следующий пример касается идентификации нерасчлененных пород михайловской серии (Литосфера..., 2012; Чернышов и др., 2009). Стратифицированные архейские образования в пределах ВКМ имеют достаточно широкое распространение. Породы михайловской серии относятся к верхнему архею и подразделяются на две свиты: нижнюю александровскую и верхнюю лебединскую. Существует также значительная часть петрофизических определений на образцах, принадлежность которых к конкретной свите не установлена. Такие данные отнесены к породам нерасчлененной михайловской серии.

Представительность выборки петрофизических характеристик для пород александровской свиты (петрофизические определения для 1396 образцов) сделала возможным получение для различных петрологических типов пород эмпирических модельных зависимостей, использование которых позволило проверить гипотезу о принадлежности образцов нерасчлененной михайловской серии к александровской свите.

Для получения структурно-параметрических уравнений были использованы петрофизические и пространственные характеристики, относящиеся к породам наиболее полно представленной александровской свиты. Были сформированы репрезентативные входные таблицы для пород тех литологических типов, которые присутство-

вали и в данных, отнесенных к нерасчлененной михайловской серии. В процессе идентификационного моделирования использовались следующие атрибуты: плотность, скорость продольных волн, поляризуемость, магнитная восприимчивость, широта скважины, долгота скважины и глубина отбора образца.

В результате были получены структурно-параметрические уравнения удовлетворительного качества для следующих типов пород: амфиболиты, гнейсы, мигматиты, плагиомигматиты, сланцы биотитовые, биотит-хлоритовые. Все уравнения были получены на первом уровне генерации моделей, следовательно являются одним из семи возможных частных описаний первого ряда (1–7).

В качестве зависимой переменной для всех моделей была использована плотность образца, а переменными — аргументами, автоматически выбранными из входной таблицы петрофизических и пространственных атрибутов, стали поляризуемость, магнитная восприимчивость, скорость продольных волн, глубина отбора образца и долгота расположения скважины.

Рассмотрим результаты идентификации на примере отдельных литологических типов пород.

Идентификация гнейсов. Модельное уравнение вида (5) связывает плотность породы с поляризуемостью и глубиной отбора образца. Среднеквадратичная погрешность оценки плотности для гнейсов александровской свиты составила 0.02 г/см³. Данные для соответствующих пород нерасчлененной михайловской серии представлены шестью образцами. Идентификация с помощью модельного уравнения дала следующие результаты (табл. 2): максимальная абсолютная погрешность оценки плотности составляет 0.03 г/см³ для образца № 1, Остальные пять образцов имеют абсолютную погрешность оценки плотности по значениям поляризуемости и глубины отбора образца не превышающую

0.02 г/см³, что позволяет отнести их к породам александровской свиты.

Идентификация плагиомигматитов и мигматитов. Оптимальная модель вида (7) для плагиомигматитов связывает поляризуемость (η) и глубину отбора образца (H). Для 82% образцов расхождение модельных экспериментальных значений плотности плагиомигматитов александровской свиты находится в интервале ± 0.02 г/см³ (табл. 3). Проверка модели на данных для 18 образцов плагиомигматитов михайловской серии, показала, что для 6 из них абсолютная погрешность оценки плотности не превышает ± 0.02 г/см³ (табл. 3, выделено полужирным шрифтом), что позволяет отнести их к породам александровской свиты. Другой пример касается идентификации мигматитов. В результате идентификационного анализа МГУА мигматитов александровской свиты была получена модель вида (7), позволяющая оценить плотность по значению магнитной восприимчивости и долготе расположения скважины. Для 42 образцов (93%), задействованных в процедуре формирования модельного уравнения, расхождение модельных и экспериментальных значений плотности находится в интервале ± 0.02 г/см³. Полученная зависимость была проверена на 52 образцах мигматитов михайловской серии. В результате для 7 из них абсолютная погрешность оценки плотности также не превысила ± 0.02 г/см³, что позволило предположить их принадлежность к породам александровской свиты (рис. 5).

В итоге из задействованных в процедуре идентификации 103 образцов нерасчлененной михайловской серии 25 образцов пород по 10 скважинам предположительно относятся к породам александровской свиты.

Выполненный идентификационный анализ петрофизических данных по образцам керна позволяет повысить достоверность отнесения изучаемых пород к конкретным геологическим комплексам.

Таблица 2. Идентификация гнейсов нерасчлененной михайловской серии

Table 2. Identification of gneisses of the undifferentiated mikhailovskaya series

№ образца	$\sigma_{\text{эксп}}$, Г/см ³	$\sigma_{\text{модел}}$, Г/см ³	η , %	H , м	ϵ , г/см ³
1	2.67	2.70	0.74	-166.3	0.03
2	2.74	2.72	1.06	-25.9	0.02
3	2.75	2.76	1.91	-30.1	0.01
4	2.76	2.77	1.96	-33.7	0.01
5	2.78	2.78	2.24	-42.7	0.00
6	2.78	2.75	1.65	-48.1	0.02

Примечание. $\sigma_{\text{эксп}}$ — экспериментальные значения плотности; $\sigma_{\text{модел}}$ — модельные значения плотности; η — поляризуемость; H — глубина отбора образца; ϵ — разница между экспериментальными и модельными значениями плотности.

Note. $\sigma_{\text{эксп}}$ — experimental density values; $\sigma_{\text{модел}}$ — model density values; η — polarizability; H — sampling depth; ϵ — the difference between experimental and model density values.

Таблица 3. Результаты идентификации плагиомигматитов михайловской серии

Table 3. Results of identification of plagiomigmatites of the mikhailovskaya series

№ образца	$\sigma_{\text{эксп}}$, г/см ³	$\sigma_{\text{модел}}$, г/см ³	η , %	H , м	ε , г/см ³
1	2.75	2.67	0.69	83.7	0.08
2	2.73	2.67	0.75	-93.9	0.06
3	2.74	2.67	0.73	-104.1	0.07
4	2.65	2.70	0.22	-58.5	-0.05
5	2.77	2.69	0.35	-65.9	0.08
6	2.72	2.69	0.43	-37.2	0.03
7	2.67	2.68	0.49	-74.1	-0.01
8	2.70	2.67	0.69	-78.7	0.03
9	2.65	2.67	0.75	-87.9	-0.02
10	2.65	2.67	0.86	-92.5	-0.02
11	2.68	2.49	4.56	-97.1	0.19
12	2.68	2.69	0.41	-106.3	-0.01
13	2.68	2.63	1.67	-110.9	0.05
14	2.67	2.69	0.41	-115.5	-0.02
15	2.65	2.68	0.57	-120.1	-0.03
16	2.59	2.68	0.55	-124.7	-0.09
17	2.78	2.61	2.50	-129.3	0.17
18	2.67	2.68	0.63	-138.5	-0.01

Примечание. $\sigma_{\text{эксп}}$ — экспериментальные значения плотности; $\sigma_{\text{модел}}$ — модельные значения плотности; η — поляризуемость; H — глубина отбора образца; ε — разница между экспериментальными и модельными значениями плотности.

Note. $\sigma_{\text{эксп}}$ — experimental density values; $\sigma_{\text{модел}}$ — model density values; η — polarizability; H — sampling depth; ε — the difference between experimental and model density values.

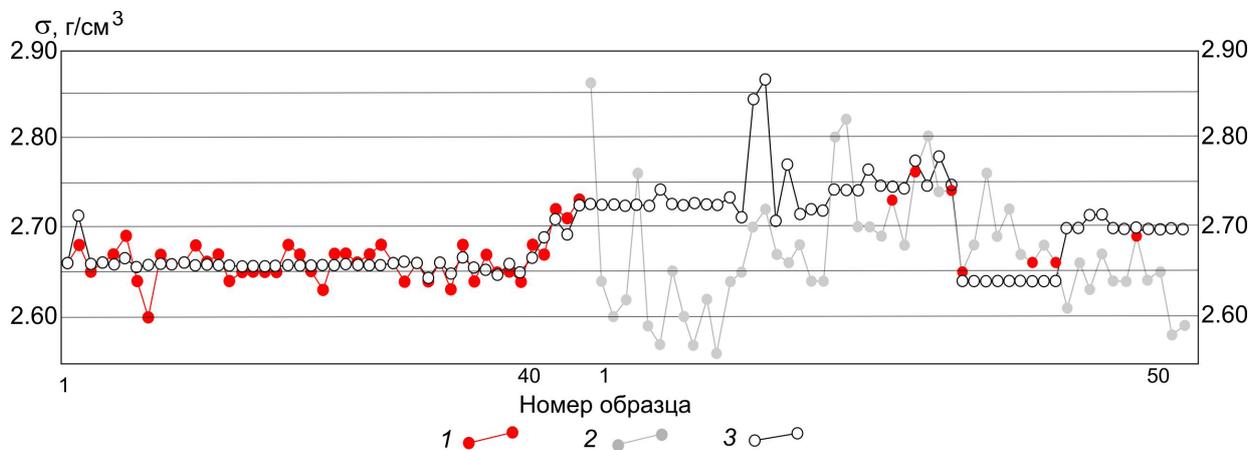


Рис. 5. Идентификация мигматитов нерасчлененной михайловской серии: 1 — экспериментальные значения плотности мигматитов александровской свиты; 2 — экспериментальные значения плотности мигматитов нерасчлененной михайловской серии; 3 — модельные значения плотности.

Fig. 5. Identification of migmatites of the undifferentiated mikhailovskaya series: 1 — experimental values of the density of migmatites of the alexandrovskaia suite; 2 — experimental values of the density of migmatites of the undifferentiated mikhailovskaya series; 3 — model values of the density.

Взаимосвязь петрофизических параметров.

Взаимосвязи между различными петрофизическими параметрами могут быть эффективно использованы в процедуре комплексной инверсии геофизических полей при изучении строения верхней части земной коры. Наиболее часто рассматриваются корреляционные зависимости между плотностью и скоростью упругих волн

при комплексировании гравиметрии и сейсмометрии. Зависимость может носить четко выраженный линейный характер, что обусловлено многими общими факторами, обуславливающие значения этих характеристик.

Взаимосвязь плотности с электрическими и магнитными параметрами не столь очевидна и, возможно, носит более сложный характер.

Приведем пример, показывающий, что с помощью МГУА можно получить комплексные модели, связывающие плотность метаморфических и интрузивных пород ВКМ с удельным электрическим сопротивлением и магнитной восприимчивостью.

Для выполнения идентификационного анализа МГУА была сформирована выборка данных о плотности, электрическом удельном сопротивлении и магнитной восприимчивости пород, представляющих распространенные в пределах ВКМ магматические, вулканогенно-осадочные и метаморфические образования. Объем выборки составил 224 образца. Для каждой группы были рассчитаны средние значения и стандартные отклонения плотности и логарифмов удельного электрического сопротивления и магнитной восприимчивости (рис. 6).

Как показано на рисунке, для большинства пород выявлены довольно значимые различия совокупных статистических характеристик

петрофизических параметров, что явилось предпосылкой для последующего анализа методом группового учета аргументов.

В результате были получены комплексные модельные уравнения, связывающие средние значения плотности с логарифмом удельного сопротивления и логарифмом магнитной восприимчивости (рис. 7):

$$\bar{\sigma} = a_1 + a_2 \overline{\log \rho} + a_3 \overline{\log \chi} + a_4 \overline{\log \rho} \cdot \overline{\log \chi} \quad (9)$$

ВЫВОДЫ

Использование МГУА при работе с петрофизической информацией позволяет получить комплексную идентификационную модель, которая объединяет несколько петрофизических параметров в единую полиномиальную зависимость, использование которой позволяет автоматизировать процесс обобщения и анализа

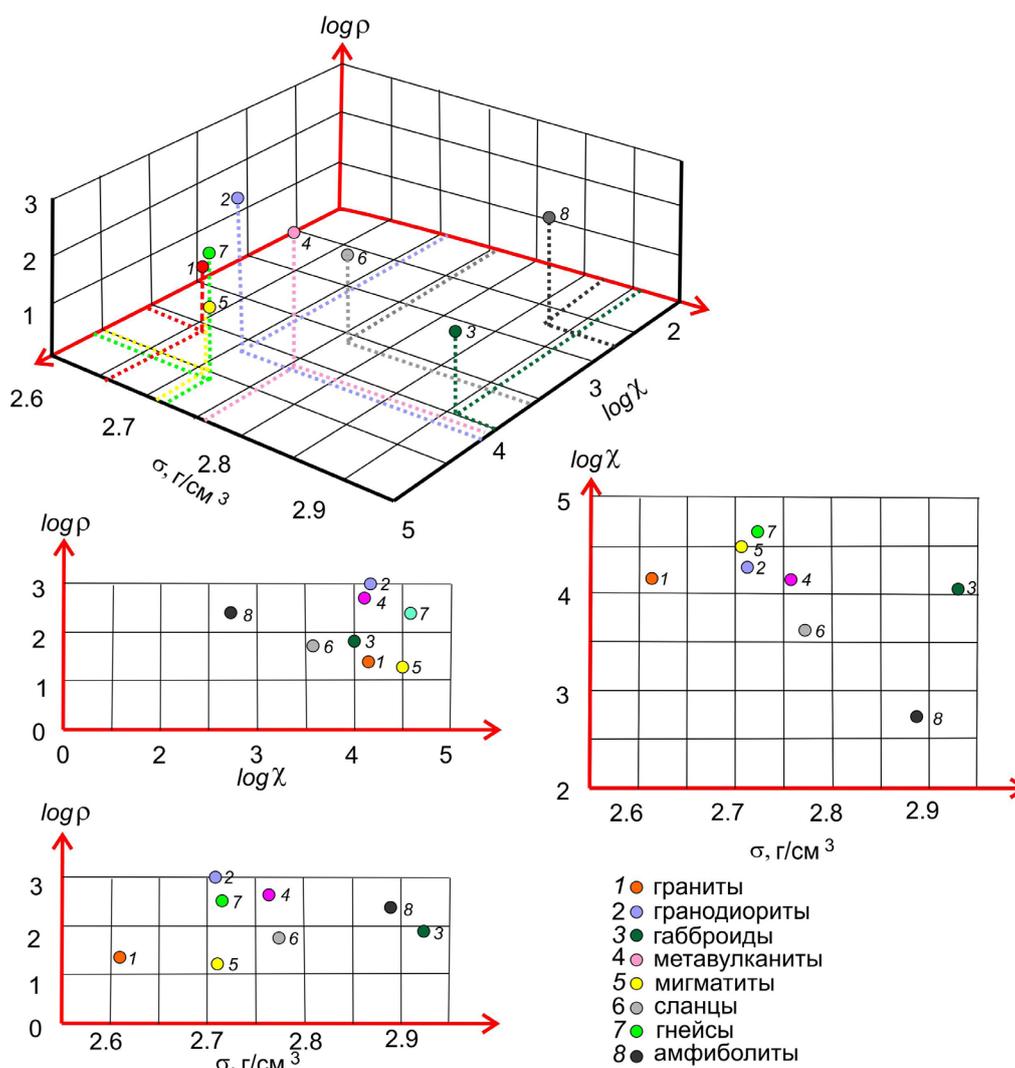


Рис. 6. Обобщенная точечная диаграмма распределения средних петрофизических параметров кристаллических пород ВКМ.

Fig. 6. Generalized dot diagram of the distribution of average petrophysical parameters of crystalline rocks of the VCM.

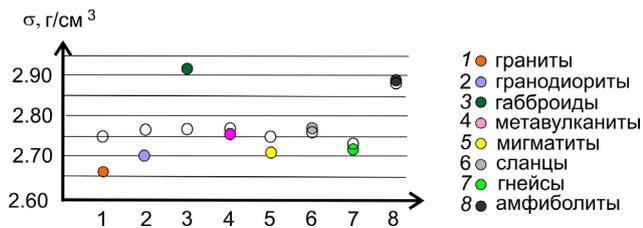


Рис. 7. Экспериментальные (цветные кружки) и модельные (незаполненные кружки) средних значений плотности основных литологических типов кристаллических пород ВКМ.

Fig. 7. Experimental (colored circles) and model (unfilled circles) average density values of the main lithological types of crystalline rocks of the VCM.

петрофизических данных, эффективно решить задачи робастного оценивания и идентификации, формализовать различные петрофизические параметры для включения в процедуру комплексной интерпретации геофизических полей.

Научные исследования выполнены в рамках грантов РФФИ № 20-05-00190 и № 19-05-00336.

Список литературы [References]

- Афанасьев Н.С.* Петрофизика земной коры ВКМ // Литосфера Воронежского кристаллического массива по геофизическим и петрофизическим данным. Воронеж: Научная книга, 2012. С. 21–88 [Afanasyev N.S. Petrofizika zemnoj kory VKM // Lithosphere of the Voronezh crystal massif according to geophysical and petrophysical data. Voronezh: Nauchnaya kniga, 2012. P. 21–88 (in Russian)].
- Глазнев В.Н., Минц М.В., Муравина О.М.* Плотностное моделирование центральной части Восточно-Европейской платформы // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. 2016. № 1. Вып. 29. С. 53–63 [Glaznev V.N., Mints M.V., Muravina O.M. Density modeling of the earth crust for the central part of the East-European platform // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2016. № 1(29). P. 53–63 (in Russian)].
- Глазнев В.Н., Муравина О.М., Жаворонкин В.И. и др.* Петроплотностная карта докембрийского фундамента Воронежского кристаллического массива // Воронеж: Научная книга, 2020. 101 с. [Glaznev V.N., Muravina O.M., Zhavoronkin et al. Petro-density map of the Precambrian basement of the Voronezh crystalline massif // Voronezh: Nauchnaya kniga, 2020. 101 p. (in Russian)].
- Ивахненко А.Г.* Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. Киев: Наукова думка, 1982. 296 с. [Ivahnenko A.G. Inductive method of self-organization of models of complex systems. Kiev: Naukova dumka, 1982. 296 p. (in Russian)].
- Литосфера Воронежского кристаллического массива по геофизическим и петрофизическим данным / Ред. Чернышов Н.М. Воронеж: Научная книга, 2012. 330 с. [Lithosphere of the Voronezh crystal massif according to geophysical and petrophysical data. Chernyshov N.M. (Red.) Voronezh: Nauchnaya kniga, 2012. 330 p. (in Russian)].
- Минц М.В., Глазнев В.Н., Муравина О.М.* Глубинное строение коры юго-востока Воронежского кристаллического массива по геофизическим данным: геодинамическая эволюция в палеопротерозое и современное состояние коры // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология. 2017. № 4. С. 2–23 [Mints M.V., Glaznev V.N., Muravina O.M. Deep structure of the crust in the southeast of the Voronezh crystalline massif according to geophysical data: geodynamic evolution in the Paleoproterozoic and the current state of the crust // Vestnik Voronezh state university. Ser. Geology. 2017. № 4. P. 2–23 (in Russian)].
- Муравина О.М.* Возможности метода группового учета аргументов при статистической обработке петрофизических данных // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология. 2009. № 2. С. 150–110 [Muravina O.M. The possibilities of the method of group accounting of arguments in the statistical processing of petrophysical data // Vestnik Voronezh state university. Ser. Geology. 2009. № 2. P. 150–110 (in Russian)].
- Муравина О.М.* Метод группового учета аргументов при анализе геофизических данных // Геофизика. 2012. № 6. С. 10–20 [Muravina O.M. Method of group accounting of arguments in the analysis of geophysical data // Geofizika. 2012. № 6. P. 10–20 (in Russian)].
- Муравина О.М.* Идентификационный анализ петрофизических характеристик пород осадочного чехла Воронежской антеклизы // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. 2013. № 2. Вып. 22. С. 20–25 [Muravina O.M. Identification analysis of petrophysical characteristics of sedimentary rocks from the Voronezh antecline // Vestnik KRAUNC. Nauki o Zemle. 2013. № 2(22). P. 20–25 (in Russian)].
- Муравина О.М.* Плотностная модель земной коры Воронежского кристаллического массива // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология. 2016. № 1. С. 108–114 [Muravina O.M. Density model of the Earth's crust of the Voronezh crystalline massif // Vestnik Voronezh state university. Ser. Geology. 2016. № 1. P. 108–114 (in Russian)].
- Муравина О.М., Глазнев В.Н.* Структурно-параметрические модели петрофизических параметров осадочного чехла Воронежской антеклизы // Известия СО РАЕН. Иркутск: Изд. ИГТУ, 2014. № 1 (44). С. 81–87 [Muravina O.M., Glaznev V.N. Structural-parametric models of petrophysical parameters sedimentary cover Voronezh antecline // Izvestiya SORAEN. Irkutsk: Izd. IGTU, 2014. № 1 (44). P. 81–87 (in Russian)].
- Муравина О.М., Жаворонкин В.И.* Магнитная восприимчивость фанерозойских отложений Воронежской антеклизы // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2014. № 1. Вып. 23. С. 79–88 [Muravina O.M., Zhavoronkin V.I. Magnetic susceptibility of the phanerozoic deposits of the Voronezh antecline // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2014. № 1(23). P. 79–88 (in Russian)].
- Муравина О.М., Жаворонкин В.И., Глазнев В.Н.* Петрофизическая характеристика осадочного чехла Воронежской антеклизы // Вестник Воронеж-

- ского государственного университета. Сер. Геология. 2013. № 1. С. 189–196 [Muravina O.M., Zhavoronkin V.I., Glaznev V.N. Petrophysical characteristics of the sedimentary cover of the Voronezh antecline // Vestnik Voronezh state university. Ser. Geology. 2013. № 1. P. 189–196 (in Russian)].
- Муравина О.М., Пономаренко И.А. Программная реализация метода группового учета аргументов при идентификационном моделировании геолого-геофизических данных // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология. 2016. № 2. С. 107–110 [Muravina O.M., Ponomarenko I.A. Features of application of the group method of data handling at identification modelling of geologic-geophysical data // Vestnik Voronezh state university. Ser. Geology. 2016. № 2. P. 107–110 (in Russian)].
- Муравина О.М., Чернышова М.Н., Жаворонкин В.И. Идентификационный анализ ультрамафит-мафитовы хинтрузий мамонского комплекса Воронежского кристаллического массива // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. 2019. № 3. Вып. 43. С. 89–98. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-3-43-89-98> [Muravina O.M., Chernyshova M.N., Zhavoronkin V.I. Identification analysis of ultramafic-mafic intrusions in the mamonsky complex of the Voronezh crystalline massif // Vestnik KRAUNTs. Ser. Nauki o Zemle. 2019. № 3(43). P. 89–98 (in Russian)].
- Чернышов Н.М. Типы никеленосных интрузий и медно-никелевого оруденения Воронежского массива // Советская геология. 1986. № 12. С. 42–54 [Chernyshov N.M. Tipy nikelenosnyh intruzij i medno-nikelevogo orudneniya Voronezhskogo massiva // Sovetskaya geologiya. 1986. № 12. P. 42–54 (in Russian)].
- Чернышов Н.М., Альбеков А.Ю., Рыборак М.В. О современном состоянии схемы стратиграфии и магматизма раннего докембрия Воронежского кристаллического массива // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология. 2009. № 2. С. 33–40 [Chernyshov N.M. Albekov A.Yu., Ryborak M.V. The current status of the scheme of stratigraphy and magmatism an early Pre-Cambrian of territory of the Voronezh crystalline massif // Vestnik Voronezh state university. Ser. Geology. 2009. № 2. P. 33–40 (in Russian)].
- Чернышова М.Н. Дайки мамонского никеленосного комплекса и их соотношение с оруденением. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1999. 121 с. [Chernyshova M.N. Dajki mamonskogo nikelenosnogo kompleksa i ih sootnoshenie s orudneniem. Voronezh: Izd-vo VGU, 1999. 121 p. (in Russian)].
- Huber P.J., Ronchetti E.M. Robust Statistics. Wiley, 2009. 384 p.
- Muravina O.M., Davudova E.I., Ponomarenko I.A. Possibility of identification of modeling in complex analysis geological and geophysical data / Practical and Theoretical Aspects of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences — Springer Nature Switzerland AG, 2019. P. 157–162.

APPLICATION OF THE METHOD OF GROUP ACCOUNTING OF ARGUMENTS FOR THE ANALYSIS OF PETROPHYSICAL DATA

O.M. Muravina¹, I.A. Ponomarenko¹, M.V. Mints²

¹Voronezh State University, Voronezh, Russia, 394018; e-mail: muravina@geol.vsu.ru

²Geological Institute RAS, Moscow, Russia

The paper considers a range of tasks related to the processing and analysis of petrophysical data, which are effectively solved by the method of group accounting of arguments (MGUA). MGUA is a machine learning method that is an alternative to regression analysis and neural network modeling. The method was tested when working with information from the petrophysical database of crystalline and sedimentary rocks of the Voronezh Crystal Massif (VCM). The basis of the analysis technology is the formation of complex identification equations that allow you to generalize, analyze and effectively use petrophysical data. Previously, the use of such equations for estimating the ore content of nickel-bearing intrusions of the mamonsky complex was considered. Examples of solving problems of robust estimation and identification of petrophysical data are provided. It is shown that the identification models of the MGUA allow automating the procedure for detecting outliers in the data, assess the belonging of rocks to a certain material complex. Since petrophysical information is a necessary link in the geological interpretation of geophysical observations, the experience of obtaining complex models linking the density of metamorphic and intrusive rocks of the VCM with electrical resistivity and magnetic susceptibility is interesting.

Keywords: petrophysics, method of group accounting of arguments, Voronezh crystal massif.

Поступила в редакцию 25.04.2021

После доработки 23.08.2021

Принята в печать 27.09.2021