ИДЕНТИФИКАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ УЛЬТРАМАФИТ-МАФИТОВЫХ ИНТРУЗИЙ МАМОНСКОГО КОМПЛЕКСА ВОРОНЕЖСКОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАССИВА

© 2019 О.М. Муравина, М.Н. Чернышова, В.И. Жаворонкин

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

В работе рассматриваются методика и результаты идентификационного анализа петрофизических параметров ультрамафит-мафитовых пород мамонского интрузивного комплекса Хоперского мегаблока Воронежского кристаллического массива. В качестве эталонной была выбрана скважина в пределах хорошо изученного месторождения Нижнемамонское. Для разных типов пород мамонского комплекса (перидотитов, пироксенитов и серпентинитов) методом группового учета аргументов были получены характерные корреляционные уравнения взаимосвязи плотности с другими петрофизическими параметрами. Полученные идентификационные уравнения эталонной скважины были применены к аналогичным породам других (рядовых) скважин, расположенных в пределах Хоперского мегаблока. Результаты выполненного идентификационного анализа продемонстрировали возможности применения метода группового учета аргументов для решения важнейшей задачи — дифференциации разновозрастных интрузий на рудные и безрудные.

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

ВВЕДЕНИЕ

Петрофизическая информация — необходимое звено в логической схеме геолого-геофизической интерпретации, на основе которого осуществляется переход от физической к геологической модели среды. Характерной особенностью фактических петрофизических данных является их неравномерная локализация в пространстве. Большие объемы петрофизических данных нуждаются в обобщении, при этом наряду с традиционной статистической обработкой активно используются методы робастного анализа. В случае же неполноты информации эффективны стохастические способы оценивания параметров с использованием метода Монте-Карло и корреляционных способов анализа данных (Глазнев и др., 2016). Представление петрофизических данных в формате трехмерных комплексных петрофизических моделей на базе геоинформационных технологий позволяет эффективно устранять проблемы, связанные с неравномерностью распределения петрофизической информации. Петрофизические модели фактически формализуют априорные данные, а их использование в качестве стартовых моделей среды в процессе

комплексной интерпретации геофизических полей обеспечивает геологическую содержательность результатов. При формировании петрофизических моделей необходимо выполнять решение вероятностно-статистических задач, таких как обработка, анализ и обобщение данных о физических свойствах горных пород. Новые способы индуктивного моделирования на основе метода группового учета аргументов позволяют эффективно выполнить робастное оценивание и идентификационный анализ большого объема петрофизической информации (Глазнев и др., 2016; Muravina et al., 2019b). Совместно с традиционной статистической обработкой эти процедуры позволяют выявить и исключить выбросы в данных, идентифицировать принадлежность образца к тому или иному петрографическому типу пород или структурно-вещественному комплексу. В настоящей работе рассмотрены методика и результаты идентификационного моделирования методом группового учета аргументов (МГУА) в процессе анализа петрофизических характеристик ультрамафит-мафитовых пород различных интрузий мамонского комплекса Хоперского мегаблока Воронежского кристаллического массива (ВКМ) (рис. 1).

Рис. 1. Схема структурно-тектонического районирования Воронежского кристаллического массива: *I* — Брянский мегаблок; *II* — мегаблок КМА; *III* — Лосевская шовная зона; *IV* — Хоперский мегаблок; *V* — зоны развития железистых кварцитов КМА; 1 — Нижнемамонское месторождение; 2 — местоположение интрузий мамонского типа; 3 — Суходобровский интрузивный массив.

Fig. 1. The scheme of structural-tectonic zoning of the Voronezh Crystalline Massif: *I* — Bryansk megablock; *II* — megablock KMA; *III* — Losevskaya suture zone; *IV* — Hopersky megablock; *V* — zones of development of ferruginous quartzite KMA; 1 — Nizhnemamonsky deposit; 2 — location of the Mamonsky type intrusions; 3 — Sukhobiryzovsky typhon.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Метод группового учета аргументов — метод анализа данных на основе индуктивного моделирования (Ивахненко, 1982). В англоязычных публикациях метод получил название Group Method of Data Handlin (GMDH) (Aksenova et al., 2001; Farrow, 1984; Fernández & Lozano, 2010; (Kondo et al., 1999; Upadhyaya, Lu, 2004). Он позволяет анализировать многокомпонентные системы и способен выявлять скрытые взаимосвязи между элементами, в том числе и нелинейные. Алгоритмы МГУА позволяют создать и протестировать множество вариантов математических моделей и определить модельное уравнение оптимальной сложности. Генерация моделей осуществляется комбинаторно на основе опорной функции. Лучшая модель выбирается по минимальным значениям внешних критериев. Внешние критерии рассчитываются по данным, которые не задействуются в процедуре определе-

ния структуры и параметров модели. Характер алгоритмов МГУА позволяет рассматривать его как альтернативу многоуровневым нейронным сетям. Наиболее часто в качестве опорной функции используется полином Колмогорова-Габора. Многоуровневая структура алгоритма позволяет последовательно увеличивать степень модельного полинома и число переменных-аргументов при переходе на следующий уровень (ряд). Так при использовании полинома Колмогорова-Габора первой степени, в моделях первого ряда зависимая переменная Y выражается следующим образом:

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_1 X_2, \quad (1)$$

где a_0, a_1, a_2, a_3 — числовые коэффициенты; X_1, X_2 — переменные аргументы.

Модели второго ряда имеют вид:

$$Y = b_0 + b_1 Z_1 + b_2 Z_2 + b_3 Z_1 Z_2, \quad (2)$$

где b_0, b_1, b_2, b_3 — числовые коэффициенты; Z_1, Z_2 — лучшие модели первого ряда, перешедшие во второй ряд.

Таким образом, с переходом в каждый следующий ряд сложность моделей возрастает. Так степень модельного уравнивания третьего ряда может достигать четырех и содержать до восьми переменных-аргументов. Расчет числовых коэффициентов производится на обучающей последовательности наблюдений. Использование полиномов в качестве базовых функций дало еще одно название методу — полиномиальные нейронные сети (Yurachkovsky, 1981).

В последние десятилетия в связи с развитием информационных технологий метод активно развивается и применяется в различных научных и прикладных сферах, как в России, так и за рубежом (Антипов, 2017; Бояринов, 2006; Калинина, 2016; Fernández, Lozano, 2010; Niassat, et al., 2004; Upadhyaya, Lu, 2004). Метод доказал эффективность для решения прогнозных задач в экономике и социальной сфере (Бояринов, 2006; Старцев, 2017), в экологии (Калинина, 2016), в горном деле (Антипов, 2017; Шурыгин и др., 2014), в нефтяном производстве (Скобелев и др., 2015) и др.

С 2009 г. кафедра геофизики Воронежского госуниверситета проводит исследования, направленные на изучение возможности МГУА для анализа геолого-геофизической информации (Жаворонкин, Фаустова, 2018; Муравина, 2012; Muravina et al., 2019b). Важной частью этих исследований является анализ петрофизических данных (Муравина, 2009, 2013; Муравина, Глазнев, 2014; Муравина и др., 2013).

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Никель-платиноносная дунит-перидотит-габбронорит-габбровая формация мамонского комплекса развита в пределах Хоперского мегаблока ВКМ (рис.1). Она представлена различными типами интрузивных тел, сформировавшихся в условиях неодинаковых уровней магмогенерации и различающихся по структурному положению, разному уровню эродированности, полноте дифференцированности, насыщенности дайковыми образованиями, масштабом и степени продуктивности на цветные и благородные металлы. В настоящее время выделяется четыре типа интрузивов (Чернышов, 1986; Чернышова, 1999): 1) ранние ультрамафитовые высоко и умеренно-магнезиальные в разной мере дифференцированные, бесполовошпатовые (мамонский тип); 2) ультрамафит-мафитовые умеренномагнезиальные камерно-дифференцированные (ширяевский тип); 3) ультрамафит-мафитовые фазные (елань-вязовский тип); 4) слабодифференцированные и недифференцированные габброидные интрузивы (каменский тип).

Объектом нашего исследования явились ультрамафит-мафитовые породы из интрузий первого типа (мамонский тип). Среди них, в свою очередь, по комплексу признаков (состав и полнота дифференцированности интрузивов, степени их продуктивности) выделяются следующие разновидности:

- отчетливо дифференцированные умеренно-магнезиальные, с полной ассоциацией сингенетического ряда ультрамафитов и сопровождающиеся сульфидными платиноидно-медно-никелевыми месторождениями и рудопроявлениями (например, Нижнемамонское месторождение, Астаховское рудопроявление);

- дифференцированные умеренно-магнезиальные с неполной ассоциацией сингенетического ряда ультрамафитов (перидотиты-оливиновые пироксениты). С ними связаны многочисленные разномасштабные по ресурсам проявления сульфидных платиноидно-медно-никелевых руд (например, Шишовское рудопроявление);

- недифференцированные (преимущественно роговообманковые разновидности перидотитов и оливиновых пироксенитов), безрудные массивы (Сухоберезовский массив).

ФАКТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

При идентификационном моделировании нами использована пространственная цифровая база данных петрофизических параметров кристаллических и осадочных пород территории ВКМ, созданная на основе фондовых материалов разных лет. В ней приводятся результаты измерений физических свойств образцов пород из керна скважин, пробуренных в процессе изучения региона. В базе данных в разном объеме представлены сведения о плотности, скорости распространения упругих волн, магнитной восприимчивости и остаточной намагниченности, поляризуемости, удельного электрического сопротивления и естественной радиоактивности пород — в целом около 90000 определений по 4400 скважинам (Муравина, Глазнев, 2014; Муравина, Жаворонкин, 2014; Муравина и др., 2013). База данных имеет открытую структуру и постоянно пополняется за счет измерений, выполняемых в петрофизической лаборатории кафедры геофизики Воронежского госуниверситета.

Организация базы данных в формате ГИС-проекта обеспечивает точную пространственную привязку информации, что позволяет эффективно использовать ее для решения различных геолого-геофизических задач. Для выполнения настоящего исследования из единой базы была сформирована выборка данных для

скважин, локализованных в пределах Хоперского мегаблока ВКМ. Затем для идентификационного анализа были отобраны результаты петрофизических измерений по скважинам, вскрывшим интрузии мамонского комплекса, а также по скважинам, пространственно приуроченным к зонам распространения пород воронцовской серии, в которых были вскрыты интрузивные породы базит-гипербазитового состава.

Для формирования идентификационных моделей была выбрана одна из скважин в пределах Нижнемамонского месторождения (скв. 500а), принятая за эталонную (рис. 1). Для этой скважины характерна достаточная представительность петрофизических данных (534 определения, выполненных на 107 образцах керн), а также высокая степень геологической изученности (Чернышов, 1986; Чернышова, 1999).

МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Вычислительный эксперимент выполнялся с помощью программы, реализующей многорядный алгоритм МГУА с комбинаторным перебором вариантов (Муравина, Пономаренко, 2016).

По данным эталонной скважины были сформированы обучающие и тестовые последовательности для всех петрографических типов пород с представительными выборками петрофизических данных. Для выбора оптимальной модели использован критерий регулярности, определяемый отношением:

$$cr = \frac{\|Y - Y_M\|^2}{\|Y_M\|^2}, \quad (3)$$

где Y — экспериментальные значения зависимой переменной, Y_M — модельные значения зависимой переменной. В соответствии с принципом саморегуляции для расчета критерия использовались независимые данные тестовых последовательностей, не участвующие в вычислении коэффициентов модельных уравнений.

На первом этапе исследований была предпринята попытка получения обобщенного модельного уравнения, связывающего условный петрографический индекс с петрофизическими параметрами и пространственными атрибутами. Однако получить модель хорошего качества не удалось, что, вероятно, обусловлено высокой степенью статистической неоднородности петрофизических параметров. На втором этапе идентификационное моделирование было выполнено для наиболее представительных петрографических типов пород. В качестве зависимой переменной была выбрана плотность, а в качестве пере-

менных-аргументов использовались следующие параметры: скорость распространения упругих волн, магнитная восприимчивость, остаточная намагниченность и поляризуемость, а также глубина отбора образца.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИДЕНТИФИКАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В результате численного моделирования для петрофизических параметров эталонной скважины были получены идентификационные уравнения хорошего качества для перидотитов, пироксенитов и серпентинитов, в том числе рудных (рис. 2).

Все модели получены на первом уровне генерации и определяются уравнением (1). Некоторые характеристики входных массивов плотности и описание моделей эталонной скважины приведены в таблице. Модельные уравнения связывают плотность горной породы (σ) с двумя переменными-аргументами. Для всех моделей первым и наиболее значимым фактором является скорость распространения продольных упругих волн (V_p). Влияние второго фактора менее существенно. В трех случаях выявлено влияние на плотность магнитных свойств. Для перидотитов — это магнитная восприимчивость (χ), в случае с пироксенитами и серпентинитами вторым аргументом является остаточная намагниченность (J_r). Для рудных серпентинитов установлена статистическая зависимость со скоростью продольных волн (V_p) и глубиной отбора образца (H).

Структура и набор параметров модельных уравнений не противоречит физической природе петрофизических характеристик. Тесные корреляционные взаимосвязи между плотностью и скоростью пород установлены многими исследователями для различных пород и для разных регионов, в том числе и для ВКМ (Глазнев и др, 2012). Присутствие в моделях в качестве вторых аргументов петромагнитных параметров или глубины также оправданно и может быть связано с изменением физических свойств пород в процессе метаморфизма.

Полученные идентификационные уравнения эталонной скважины были применены к аналогичным породам других (рядовых) скважин, расположенным в пределах Хоперского мегаблока. По этим скважинам с использованием модельных уравнений для каждого типа пород были рассчитаны модельные значения зависимой переменной — плотности горных пород. Всего в процессе вычислительного эксперимента были проанализированы данные по 30 скважинам и протестировано 50 наборов входных петрофизических параметров.

ИДЕНТИФИКАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ

Рис. 2. Результаты идентификационного моделирования для пород эталонной скважины: а — перидотиты; б — пироксениты; в — серпентиниты рудные; г — серпентиниты.

Fig. 2. The results of identification modeling for the rocks from the reference borehole: а — peridotites; б — pyroxenites; в — ore serpentinites; г — serpentinites.

Идентификационные модели эталонной скважины

Identification models of the reference borehole

Породы	n	σ , $\pm \text{кг/м}^3$	δ , $\pm \text{кг/м}^3$	cr	Тип зависимости
Перидотиты	19	60	40	0.026	$\sigma = f(v, \chi)$
Пироксениты	15	170	50	0.001	$\sigma = f(v, Jr)$
Серпентиниты рудные	16	50	20	0.007	$\sigma = f(v, H)$
Серпентиниты	41	80	30	0.004	$\sigma = f(v, Jr)$

Примечание: n — длина последовательности наблюдений; σ — стандартное отклонение экспериментальных значений плотности; δ — среднеквадратичная ошибка моделирования; cr — внешний критерий.

Note: n — the length of the observation sequences; σ — the standard deviation of the experimental density values; δ — the mean-square error of modeling; cr — an external criterion.

Среднеквадратичная ошибка соответствия модельных значений экспериментальным для эталонной скважины находится в интервале (20 – 50) кг/м³ и не превышает размер стандартного отклонения исходных массивов плотности (таблица). Исходя из этого, для оценки качества моделирования на рядовых скважинах, было принято считать пороговым значение среднеквадратичной ошибки 50 кг/м³.

Общая длина идентификационной последовательности для перидотитов составила 132 значения по 14 скважинам. Для 6 скважин среднеквадратичная ошибка моделирования зависимой переменной не превышает порогового значения.

В процедуре идентификационного анализа для пироксенитов были задействованы данные по 10 скважинам, общая длина последовательности наблюдений составила 93 значения. Для 6 скважин среднеквадратичная ошибка моделирования также не превышает пороговой величины.

Модельные и экспериментальные значения плотности серпентинитов сравнивались для 20 скважин по 250 значениям, положительные результаты были получены для 6 скважин. Рудные серпентиниты проанализированы по 7 скважинам, длина общей последовательности тестируемых данных составила 114 значений. В целом для 13 из 30 скважин среднеквадратичная ошибка моделирования не превысила пороговое значение при использовании хотя бы для одного из четырех вариантов моделей.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотрим скважины с лучшими результатами идентификационного моделирования,

представляющие разные типы интрузий мамонского типа (рис. 1, 3).

Для этих скважин хорошая сходимость модельных и экспериментальных данных (разница экспериментальных и модельных значений плотности в большинстве случаев существенно меньше принятого порогового значения) была получена для двух или более типов пород (рис. 4, 5). Все это с большой степенью достоверности позволяет предположить, что интрузии, вскрытые этими скважинами, являются рудоносными.

В пользу этого предположения говорит и то, что все рассматриваемые скважины локализованы в непосредственной близости друг от друга в северо-западной части Хоперского мегаблока (рис. 1) и возможно относятся к одному очагу магмогенерации. Эталонная скважина 500а (Нижнемамонское месторождение, рис.1) расположена на расстоянии 90–80 км в юго-восточном направлении.

Согласно известным геологическим данным (Чернышов, 1986; Чернышова, 1999), вскрытые скважинами 6910 и 6914 породы являются рудоносными (Астаховское рудопоявление), или потенциально рудоносными (Шишовское рудопоявление, скв. 6916), что согласуется с результатами идентификационного моделирования.

Скважины 367а и 378а расположены в пределах Сухоберезовского интрузивного массива, который на основании ранее выполненных исследований был отнесен к безрудным. Однако, принимая во внимания относительно небольшую глубину бурения этих скважин (300–500 м), можно предположить наличие рудоносных зон на больших глубинах.

Таким образом, в результате идентификационного моделирования ультрамафит-мафитовых

Рис. 3. Схема расположения скважин с лучшими результатами идентификационного моделирования: 1 — габброиды мамонского комплекса; 2 — мафит-ультрамафитовые породы; 3 — гранитоиды бобровского комплекса; 4 — вмещающие породы воронцовской серии; 5 — скважины и их номера. Цифрами в кружках обозначены: 1 — Астаховское рудопоявление; 2 — Шишовское рудопоявление; 3 — Сухоберезовский интрузивный массив.

Fig. 3. Borehole location scheme with the best results of identification modeling: 1 — gabbroids from the Mamonsky complex; 2 — mafic-ultramafic rocks; 3 — granitoids from the Borovky complex; 4 — host rocks from the Vorontsovskaya series; 5 — boreholes and their numbers. Numbers in the circles denote: 1 — Astakhovskoye ore occurrence; 2 — Shishovskoye ore occurrence; 3 — Sukhoberezovskiy intrusive massif.

ИДЕНТИФИКАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ

Рис. 4. Результаты идентификационного моделирования: *а* — скв. 6910 (рудопроявление Астаховское); *б* — скв. 6914 (рудопроявление Астаховское); *в* — скв. 6916 (рудопроявление Шишовское).

Fig. 4. The results of identification modeling: *a* — borehole 6910 (Astakhovskoye ore occurrence); *б* — borehole 6914 (Astakhovskoye ore occurrence); *в* — borehole 6916 (Shishovskoye ore occurrence).

интрузий мамонского комплекса Воронежского кристаллического массива получены модельные уравнения, позволяющие выявить рудоносные интрузии по комплексу петрофизических параметров.

ВЫВОДЫ

Результаты выполненного идентификационного анализа продемонстрировали возможности применения метода группового учета аргументов для решения важнейшей задачи — дифференциации разновозрастных интрузий на рудные и безрудные.

МГУА позволяет максимально эффективно использовать комплексные петрофизические данные и пространственные атрибуты, выявить неявные взаимосвязи между анализируемыми параметрами и получить в результате идентификационную модель, как уникальную характеристику геологического объекта.

Таким образом, МГУА является чрезвычайно перспективным инструментом при решении задач геологического картирования и, в частности, идентификации объектов различного генезиса.

Научные исследования выполнены в рамках гранта РФФИ № 18-05-00226-а.

Рис. 5. Результаты идентификационного моделирования: *а* — скв. 367а (Сухоберезовский интрузивный массив); *б* — скв. 398а (Сухоберезовский интрузивный массив).

Fig. 5. The results of identification modeling: *a* — borehole 367a (Sukhoberezovsky intrusive massif); *b* — borehole 398a (Sukhoberezovsk intrusive massif).

Список литературы [References]

- Антипов И.В.* Обоснование критерия прогноза внезапных выдавливаниях угля с помощью метода группового учета аргументов // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук.* 2017. Т. 4. № 2. С. 7–12 [*Antipov I.V.* Substantiation of a prediction criterion for sudden coal extrusions by the group method of data handling // *Fundamentalnye i prikladnye voprosy gornyh nauk.* 2017. Т. 4. № 2. Р. 7–12 (in Russian)].
- Бояринов Ю.Г.* Построение моделей региональных социально-экономических систем с помощью нейро-нечёткого метода группового учета аргументов // *Системы управления и информационные технологии.* 2006. Т. 24. № 2.1. С. 117–120 [*Boyarinov Yu.G.* Postroenie modelej regionalnyh socialno-ekonomicheskikh sistem s pomoshchyu nejro-nechytotkogo metoda gruppovogo ucheta argumentov // *Sistemy upravleniya i informacionnye tekhnologii.* 2006. Т. 24. № 2.1. Р. 117–120 (in Russian)].

- Глазнев В.Н., Жаворонкин В.И., Хованский Н.Е.* Корреляция скорости и плотности пород Воронежского кристаллического массива // *Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей. Материалы 39-й сессии Международного научного семинара им. Д.Г. Успенского.* Воронеж: Научная книга, 2012. С. 71–75 [*Glaznev V.N., Zhavoronkin V.I., Hovansky N.E.* Korrelyaciya skorosti i plotnosti porod Voronezhskogo kristallicheskogo massiva // *Voprosy teorii i praktiki geologicheskoy interpretacii geofizicheskikh polej. Materialy 39-j sessii Mezhdunarodnogo nauchnogo seminar im. D.G. Uspenskogo.* Voronezh: Nauchnaya kniga, 2012. Р. 71–75 (in Russian)].
- Глазнев В.Н., Минц М.В., Муравина О.М.* Плотностное моделирование центральной части Восточно-Европейской платформы // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле.* 2016. № 1. Вып. 29. С. 53–63 [*Glaznev V.N., Mints M.V., Muravina O.M.* Density modelling of the Earth crust for central part of the East-European platform // *Vestnik*

- KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2016. № 1(29). P. 53–63 (in Russian)].
- Жаворонкин В.И., Фаустова Ю.С.* Идентификационный анализ данных об электропроводности осадочного чехла Воронежского кристаллического массива // XIX Международная конференция «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле». Материалы конференции. М.: ИГЕМ РАН, 2018. С. 120–123 [Zhavoronkin V.I., Faustova Yu.S. Identification analysis of data on the electrical conductivity of the sedimentary case of the Voronezh crystalline massif // XIX Mezhdunarodnaya konferenciya «Fiziko-himicheskie i petrofizicheskie issledovaniya v naukah o Zemle». Materialy konferencii. M.: IGEM RAN, 2018. P. 120–123 (in Russian)].
- Ивахненко А.Г.* Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. Киев: Наукова думка, 1982. 296 с. [Ivahnenko A.G. Induktivnyj metod samoorganizacii modelej slozhnyh sistem. Kiev: Naukova dumka, 1982. 296 p. (in Russian)].
- Калинина Е.С.* Возможности метода группового учета аргументов в задачах прогнозирования безопасности химических производств // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2016. № 4 (20). С. 33–38 [Kalinina E.S. Possibilities of the group method of data handling in problems of forecasting of safety of chemical productions // Prirodnye i texnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty). 2016. № 4 (20). P. 33–38 (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. Possibilities of the method of group accounting of arguments in the statistical processing of petrophysical data // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Geologiya. 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. The 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. Науки о Земле. 2013. № 2. Вып. 22. С. 20–25 [Muravina O.M. Identification analysis petrophysical characteristics stick of sedimentary rocks of the Voronezh antecline // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2013. № 2(22). P. 20–25 (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 SO RAEN. Irkutsk: Izd. IG TU, 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(23). С. 79–88. [Muravina O.M., Zhavoronkin V.I. Magnetic susceptibility of the phanerozoic deposits of the Voronezh antecline // Vestnik KRAUNC. 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 Воронежского 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 Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Geologiya. 2013. № 1. P. 189–196].
- 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 Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Geologiya. 2016. № 2. P. 107–110 (in Russian)].
- Скобелев Д.О., Коваленко В.П., Выбойченко Е.И.* Алгоритм формирования ограничительных норм показателей качества нефтепродуктов с использованием метода группового учёта аргументов (далее - МГУА) // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. 2015. № 1. С. 45–49 [Skobelev D.O., Kovalenko V.P., Vyboychenko E.I. Algoritm formirovaniya ogranichitelnyx norm pokazatelej kachestva nefteproduktov s ispolzovaniem metoda gruppovogo ucheta argumentov (dalee - MGUA) // Mir nefteproduktov. Vestnik neftyanux kompanij. 2015. № 1. P. 45–49 (in Russian)].
- Старцев Е.А.* Синтез классификаторов для прогноза профессиональных заболеваний на основе метода группового учета аргумента и нейросетевого моделирования // Энергосбережение и эффективность в технических системах. Материалы IV Международной научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Тамбовский государственный технический университет. 2017. С. 519–520 [Startsev E.A. Sintez klassifikatorov dlya prognoza professionalnyh zabolevanij na osnove metoda gruppovogo ucheta argumenta i nejrosetevogo modelirovaniya // Energoberezhenie i effektivnost v texnicheskix sistemax. Materialy IV Mezhdunarodnoj

- nauchno-texnicheskoy konferencii studentov, molodykh uchenykh i specialistov. Tambovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskij universitet. 2017. P. 519–520 (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 nikelenosnykh intruzij i medno-nikelevogo orudeneniya Voronezhskogo massiva // Sovetskaya geologiya. 1986. № 12. P. 42–54 (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 orudeneniem. Voronezh: Izd-vo VGU, 1999. 121 p. (in Russian)].
- Шурыгин Д.Н., Власенко С.В., Шастик Д.С. и др.* Моделирование оптимальной теоретической вариограммы мощности пласта на основе метода группового учета аргументов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2014. № 4 (179). С. 76–78 [*Shurygin D.N., Vlasenko S.V., Shastik D.S. et al.* Modelirovanie optimalnoj teoreticheskoy variogrammy moshhnosti plasta na osnove metoda gruppovogo ucheta argumentov // Izvestiya vysshix uchebnykh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Seriya: Texnicheskie nauki. 2014. № 4 (179). P. 76–78 (in Russian)].
- Aksenova T.I., Tetko I.V., Volkovich V.V.* GMDH-type Neural Network in Quantative-Structure Activity Relationship Studis on the Internet, Modelling and simulation // 15th European Simulation Multiconference (ESM2001). Prague, 2001. P. 685–689.
- Farrow S.J.* The GMDH algorithm of Ivakhnenko // The American Statistician. 1981. № 4(35). P. 210–215.
- Fernández F., Lozano F.H.* GMDH algorithms implemented in the intelligent identification of a bioprocess // ABCM Symposium Series in Mechatronics. 2010. V. 4. P. 278–287.
- Hiassat M., Abbod M.F., Mort N.* Using Genetic Programming to Improve the Group Method of Data Handling in Time Series Prediction // Statistical Data Mining and Knowledge Discovery. Chapman&Hall/CRC, 2004. P. 282–293.
- Kondo T., Pandya A.S., Zurada J.M.* GMDH-type neural networks with a feedback loop and their application to nonlinear system identification // Smart Engineering System: Neural Networks, Fuzzy Logic, Evolutionary Programing, Data Mining, and Rough Sets. ASME Press. 1999. V. 9. P. 117–124.
- Muravina O.M., Davydova 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, 2019a. P. 157–162.
- Muravina O.M., Glaznev V.N., Zhavoronkin V.I., Mints M.V.* Reflection of the Petrophysical Basement Rocks Models in Geophysical Fields // Practical and Theoretical Aspects of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences – Springer Nature Switzerland AG, 2019b. P. 49–53.
- Upadhyaya B.R., Lu B.* Data Mining for Monitoring Plant Devices Using GMDH and Pattern Classification // Statistical Data Mining and Knowledge Discovery. Chapman&Hall/CRC, 2004. P. 294–304.
- Yurachkovsky Y.P.* Restoration of Polynomial Dependencies Using Self-Organization // Soviet Automatic Control. 1981. № 14. P. 17–22.

IDENTIFICATION ANALYSIS OF ULTRAMAFIC-MAFIC INTRUSIONS IN THE MAMONSKY COMPLEX OF THE VORONEZH CRYSTALLINE MASSIF

O.M. Muravina, M.N. Chernyshova, V.I. Zhavoronkin

Voronezh State University, Voronezh, Russia, 394006; e-mail: muravina@geol.vsu.ru

The paper describes the methods and results of identification analysis of the petrophysical parameters in ultramafic-mafic rocks from the Mamon intrusive complex in the Khopersky megablock of the Voronezh crystalline massif. In order to create identification models, the authors chose one of the boreholes within the Nizhnemamon deposit as the reference one. For different types of rocks, characteristic correlation equations of the relationship of density with other petrophysical parameters were obtained. The obtained identification equations of the reference borehole were applied to similar rocks from other (ordinary) boreholes located within the Khopersky megablock. The modeling showed that it is possible to apply the group method of data handling in order to solve the most important task, which is to say that is the differentiation of even-aged intrusions as ore and barren.

Keywords: group method of data handling, petrophysics, Voronezh crystalline massif.