

**КОМПЬЮТЕРНАЯ ПЕТРОФИЗИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ
РУДОВМЕЩАЮЩИХ ГОРНЫХ ПОРОД
ПО ДИАГРАММАМ КАРОТАЖА**

Даже в случае высокого выхода керна задача литологического расчленения разреза в рудных районах является актуальной в связи с отсутствием надежных критериев при субъективном описании признаков керна горных пород, наличием многочисленных переходных разностей, влиянием на вид образцов процессов регионального или локального метаморфизма и других факторов. Вместе с тем внедрение в практику компьютерной техники открывает широкие возможности для использования при литологическом расчленении разреза и отражения степени метаморфических преобразований пород комплекса диаграмм каротажа. Один из возможных подходов к решению этих задач покажем на примере классификации горных пород Шемурской колчеданосной структуры на Северном Урале.

Типичный геологический разрез через эту вулканическую структуру, в пределах которой выявлены два месторождения и несколько рудопроявлений, представляет непрерывное чередование вулканогенных пород различного состава от липаритов до базальтов, причем фациальная принадлежность пород одного и того же состава может быть самой разнообразной: лавы, туфы, туфобрекчии, субинтрузии, экструзивы, дайки и т. п. [2]. Считается, что породы разреза можно объединить по ряду критериев генетически комбинационного характера в крупные формации и более локальные субформации.

Основание изучаемой вулканической постройки составляют породы контрастной формации с преобладанием андезит-базальтов в низах и увеличением доли липарит-дацитовых разностей в ее верхней части, с которой пространственно и генетически связано рудообразование. Более молодые породы непрерывной формации базальт-андезит-дацит-липаритового ряда считаются пока малоперспективными на руду, так как, хотя и несут следы сульфидной минерализации, но промышленноценных руд в них не встречено.

В условиях достаточно пестрого разреза структуры, осложненного субинтрузиями различных размеров и формы (от маломощных даек до силлообразных тел) с проявлениями разновременной тектоники и околорудных преобразований горных пород задача по определению положения скважины в пределах сводной литолого-стратиграфической колонки является достаточно сложной, и помощь в ее решении геофизических данных может оказаться весьма существенной.

В рассматриваемом районе применяется следующий комплекс методов ГИС, используемых для качественной литологической классификации горных пород: ГГК-П, ГК, КМВ и КС. Для обоснования возможности определения количественных характеристик при литологическом расчленении разрезов скважин прежде всего были изучены статистические зависимости между параметрами, регистрируемыми первыми тремя методами. Как можно было ожидать, конкордантное соотношение выявилось между плотностью (σ) и магнитной восприимчивостью (χ) и антикордантное соотношение характерно для этих параметров и естественной радиоактивности (I_v). Установленные стохастические зависимости (рис. 1, а) свидетельствуют о возможности давать петрофизическую характеристику горным породам по комплексу методов. Связь между удельным сопротивлением и другими физическими

свойствами не исследовалась, так как известно, что оно слабо зависит от состава пород, а в большей степени определяется их механическим состоянием [3, 5].

По результатам детального описания колонок нескольких эталонных скважин, для которых помимо керна исследовались шлифы, построены зависимости, отражающие пределы изменения и центральные

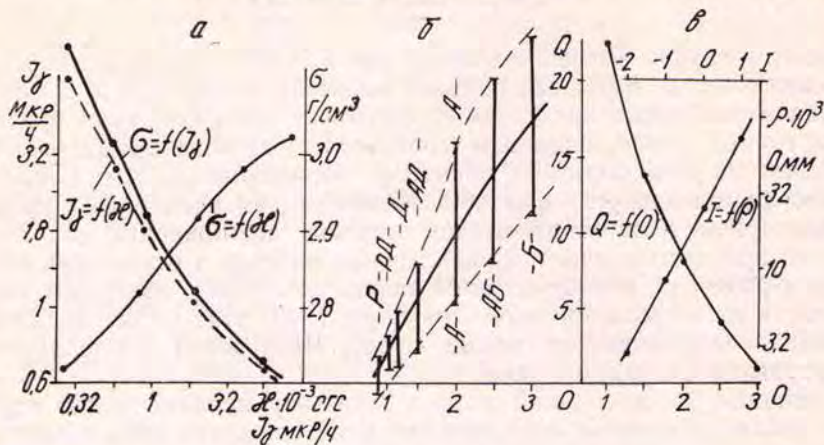


Рис. 1. Статистические петрофизические зависимости.

а — зависимости между физическими свойствами; б — зависимость между плотностью и условным показателем основности, установленная для главнейших литотипов горных пород; в — зависимости между показателями θ и O , а также I и удельным сопротивлением

P — риолиты, PD — риодациты, D — дациты, AD — андезиты-дациты, A — андезиты, AB — андезиты-базальты, B — базальты

значения физических характеристик для ряда литотипов, расположенных по мере нарастания основности этих горных пород. При этом все разновидности получили соответствующий условный индекс основности O от 1 до 3. Крайними членами этого ряда являлись липариты и базальты. Примером может служить зависимость между σ и O (рис. 1, б). После аппроксимации этой зависимости аналитической кривой индекс основности как функция плотности равен:

$$O_1 = 9,9\sigma^2 - 50,6\sigma + 65,5. \quad (1)$$

Другие уравнения получены для вычисления индекса O_2 по радиоактивности и индекса O_3 по магнитной восприимчивости.

Поскольку относительные пределы колебаний значений физических свойств для представителей комплекса пород оказались различными, то потребовалось определить информационный вес C каждого из методов при оценке индекса основности. Для этого согласно [1] были рассчитаны показатели контрастности γ выделения липаритов (как крайнего члена ряда по основности) на фоне базальтов, а затем — искомые характеристики C_j по формуле

$$C_j = |\gamma_j| / \left(\sqrt{\sum_{k=1}^n \gamma_k^2 \cdot \sum_{k=1}^n \gamma_k} \right). \quad (2)$$

С учетом информационного веса методов выражение для определения основности имеет вид:

$$O = 0,5O_1 + 0,35O_2 + 0,15O_3. \quad (3)$$

Из него видно, что максимальный вес имеют данные ГГК-П, а минимальный — данные КМВ. Последнее обстоятельство связано с сильной

зависимостью магнитных свойств литотипов от разнообразных процессов, сопровождающих вулканическую и рудообразующую деятельность рудно-магматической системы.

Другой способ классификации горных пород, также предполагающий выбор базальтов в качестве фона, основан на вычислении показателя контрастности в рядовой точке i , а затем — функции комплексного показателя θ [1], равного

$$\theta = \sum_{j=1}^n |\gamma_j, i|. \quad (4)$$

Например для плотности выражение γ_1 имеет вид:

$$\gamma_1 = \frac{3,08 - \sigma_i}{0,04}, \quad (5)$$

а при вычислении других показателей контрастности использован вариант формулы, учитывающий логнормальный закон распределения признаков. Связь между петрофизическими характеристиками θ и O получилась весьма четкой (рис. 1, θ), что позволяет производить литологическую классификацию пород и по величине θ . Учитывая антикордантность соотношений этих параметров, можно полагать, что по индексу O лучше дифференцированы породы основного состава, а по θ — кислые разности.

В дополнение к рассмотренным характеристикам могут быть рекомендованы еще два коэффициента, отклонение которых от некоторых фоновых значений (практически от нуля) будет свидетельствовать об аномальности некоторых физических свойств для конкретных литотипов пород, а по величине этих коэффициентов удастся охарактеризовать степень изменений, а также их качественный характер.

Смысл коэффициента M , равного

$$M = 2O_1 - O_2 - O_3, \quad (6)$$

состоит в том, что он отражает расхождение в определениях индекса O по плотности и двум другим свойствам. Если в породе проявлены следы околорудного метаморфизма, то наличие сульфидной вкрапленности вызывает увеличение плотности и, следовательно, значения O_1 . Одновременно ухудшается магнитная восприимчивость, а радиоактивность пород возрастает. В результате уменьшаются коэффициенты O_2 и O_3 , что в итоге приведет к получению положительных значений показателя M . Величина же последнего будет тем больше, чем сильнее проявлены последствия околорудных изменений горных пород. В относительно дальней зоне околорудного метаморфизма, напротив, отмечается относительное уменьшение плотности и радиоактивности, а магнитная восприимчивость горных пород усиливается. В итоге будут получены отрицательные значения показателя M . Возможны и другие ситуации, приводящие к отклонению физических свойств от своих характерных значений, но в подавляющем большинстве случаев причина аномальности физических свойств связана с преобразованием горных пород эпигенетическими процессами.

По данным статистических исследований в изучаемом районе все породы можно разделить на 4 статистически однородные группы по параметру КС (ρ). Группа с модальным значением 26 тысяч Ом·м выбрана в качестве фоновой, и она может быть классифицирована как породы, подвергшиеся региональному метаморфизму. Такие породы характерны для самых внешних частей известных месторождений. Примечательно, что величина ρ этой группы пород в исследуемом районе Северного Урала оказалась в 2—3 раза больше, чем у аналогичных

пород Южного Урала, где процессы регионального метаморфизма протекали более интенсивно [4, 6].

Более высокоомная группа пород с модальным значением 80 тысяч Ом·м в рассматриваемом районе представлена вулканитами основания колчеданоносной структуры и относительно молодыми телами субинтрузий. Две группы с модальными значениями 8 и 3 тысячи Ом·м объединяют породы с повышенной пористостью и трещиноватостью, что является признаком развития процессов околорудного метаморфизма [4, 6]. Поэтому эти группы пород можно условно отождествлять со слабо и средне преобразованными вулканитами с наименьшим основанием, чем это делается при классификации гидротермалитов с применением балльных оценок (П. А. Шехтман, В. А. Королев и др.).

Введем в рассмотрение I — условный показатель интенсивности преобразований, приводящих к увеличению пустотности, принимающий для пород с упомянутыми центральными значениями удельного сопротивления в порядке их убывания величины 1, 0, -1, -2, соответственно. Тогда зависимость этого показателя I от ρ может быть выражена аналитически:

$$I = 0,895 \ln \rho - 2,93. \quad (7)$$

С применением логарифмического масштаба по ρ она имеет вид прямой (рис. 1, в).

Достоинство показателя I состоит в том, что он сразу ориентирует пользователя на оценку отличия пород от фона и поэтому упрощает их классификацию по аномальности физико-механического состояния. Следует учитывать возможность увеличения этой аномальности за счет уменьшения удельного сопротивления поровых вод, связанного с концентрацией в них солей, являющихся индикаторами близрасположенных рудных залежей.

Таким образом, для петрофизической классификации горных пород по скважине следует ввести в компьютер систему значений глубин и физических параметров, снимаемых с диаграмм каротажа, и по достаточно простым программам с использованием формул (1—7) вычислить показатели O , Θ , M и I . Эффективность обработки данных повышается, если имеется возможность осуществить графическое изображение петрофизических характеристик, поскольку тогда легко представить общую картину изменения этих характеристик с глубиной и детально рассмотреть данные по отдельным интервалам. Обычно нетрудно на исходных графиках изобразить линейный тренд каждой из характеристик.

В качестве примера на рис. 2 показаны результаты подобной обработки диаграмм каротажа по скважине 2036, расположенной на удалении 1300 м к юго-востоку от Ново-Шемурского месторождения. Обработка реализована по программе, составленной А. М. Прутьяном и Р. Ф. Гилаздиновым на основе алгоритмов автора. Выбор на данную скважину пал потому, что в отличие от многих других скважин она прошла субнормально к серии вулканогенных образований верхней части рудоносной структуры и, по мнению автора, пересекла всю продуктивную толщу.

Представленные графики достаточно наглядно характеризуют разрез скважины в отношении литологии. По графикам O и Θ видно, что в низах скважины пересечены в основном андезито-базальты, которые можно отождествлять с верхней частью базальтовой (нижней) толщи, характерной для основания вулканической постройки рудоносной структуры. Кверху эта толща сменяется андезито-дацитами переходной толщи, над которыми залегает кислая толща риолит-дацитового состава. Если отвлечься от отдельных относительно маломощных слоев, то

отчетливо наблюдается постепенное увеличение кислотности вулканогенных пород вверх по разрезу, что позволяет говорить о возможности выделения в пределах контрастной формации непрерывной субформации, развитой в верхах первой.

Характерной особенностью верхней части разреза, вскрытого скважиной, является резкая смена кислых пород андезитовыми разностями, что служит признаком смены формации: непрерывная субформа-

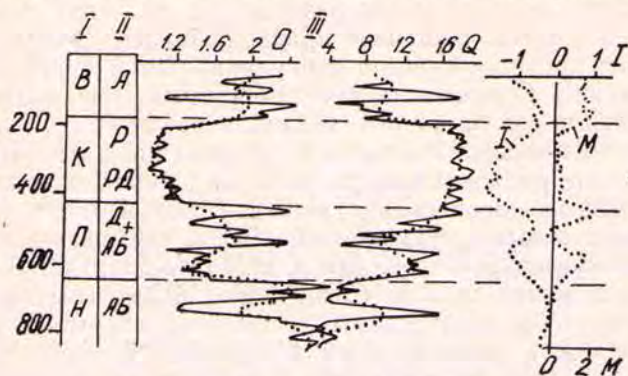


Рис. 2. Пример построения графиков петрофизических характеристик и расчленения по ним разреза скважины 2036:

I — толщи, *II* — главнейшие литотипы в пределах толщ, *III* — петрофизические характеристики (пунктир — осредняющие кривые)

Толщи: *B* — верхняя, *K* — кислая, *П* — переходная, *H* — нижняя

ция заканчивается, и над ней залегают породы андезит-базальтовой формации или, по классификации Ю. С. Каретина, андезитовой формации [2]. Вообще полученные петрофизические данные хорошо согласуются со схемой формационного деления разреза и представлением изучаемой структуры в виде крупной вулcano-тектонической депрессии (Ю. С. Каретин).

По осредненной кривой показателя *I* видно, что только низы разреза андезит-базальтового состава соответствуют фоновым значениям и в целом можно отметить общее нарастание степени изменений горных пород, приводящих к увеличению их пустотности. Отчетливо заметны два локальных минимума, соответствующих интервалам, где изменения выражены наиболее отчетливо. Нижний из них приходится на переходную андезит-дацитовую толщу, с которой начинается продуктивная часть разреза. Второй минимум лежит в пределах кислой толщи и приблизительно соответствует ее риодацитовй части, сменяемой кверху породами риолитового состава. Последние в отличие от риодацитов характеризуются низкой пористостью и имеют близкие к фону значения показателя *I*.

Примечательно, что оба минимума соответствуют двум горизонтам рудообразования, известным в пределах структуры. К нижнему горизонту приурочены залежи Шемурского, а к верхнему Ново-Шемурского месторождений. Очевидно эти горизонты являются наиболее благоприятными по физико-механическим свойствам для рудоотложения, и при наличии дополнительных факторов в них может происходить концентрация рудного вещества.

Согласно кривой показателя *M* следы метасоматических изменений отмечены только на нижнем аномальном по *I* горизонту. Это обстоятельство может означать, что данный горизонт имеет связь с рудо-подводящим каналом близрасположенного Ново-Шемурского место-

рождения, а верхний горизонт изолирован от канала пережимом или субвулканическим телом. Следовательно, рудоперспективность восточного фланга упомянутого рудоподводящего канала весьма ограничена и скопление сульфидов здесь можно ожидать лишь на большой глубине, и в том случае, если будет доказано существование локализуемых факторов.

В то же время хорошо заметны отчетливые признаки изменения андезит-базальтов верхней части разреза, где значения показателя M достигают 2—3 единиц. Наиболее правдоподобным объяснением этого факта является предположение о субвулканической природе образованной кислой толщи. Отмеченные изменения можно связывать с прогревом вмещающих пород основного состава, вследствие которого ухудшается их магнитная восприимчивость. Одновременно в этих породах отмечается повышение радиоактивности, которое в большей степени связано с миграционными процессами урана и калия. Поскольку андезитобазальты имеют повышенную проницаемость, увеличение их радиоактивности проявляется заметнее, чем в андезито-дацитах. В результате изменения вмещающих кислую толщу пород более отчетливо заметны в относительно однородной андезит-базальтовой покрывке и более локально проявлены в нижележащей неоднородной переходной толще, где андезитобазальты представлены в виде отдельных прослоев.

Можно высказать предположение, что многочисленные отрицательные аномалии магнитного поля, фиксируемые на площади Шемурской колчеданосной структуры, в том числе и над покровами верхней андезит-базальтовой толщи, связаны с влиянием субинтрузий. Косвенным доказательством этого явления служат факты обнаружения субвертикальных жил риодацитов, пронизывающих покровы лав основного состава и имеющих связь с лополитами кислой толщи. При этом прослеживается отчетливая закономерность в усилении магнитного поля по мере удаления от жил.

Таким образом, петрофизические исследования с применением компьютерной обработки диаграмм каротажа дают сведения, позволяющие в совокупности с другими материалами более объективно осуществлять геологическую классификацию рудовмещающих вулканогенно-магматических комплексов горных пород по составу, фациальной и формационной принадлежности, оконтуривать зоны гидротермально-метасоматических и динамических изменений. Наличие данных о сульфидной минерализации по аномальным характеристикам ПС и МЭП помогает выявить в разрезах пути поступления минералообразующих агентов к местам рудных скоплений и в итоге — восстановить картину образования месторождений. Например, в Шемурской вулканической постройке по данным петрофизики рудоносные растворы поднимались по трещинным зонам вдоль корней силлообразных субинтрузий кислого состава, а локализация промышленных руд происходила под экраном из этих тел в пределах ловушек из брекчированных пород. Такие ловушки возникали в местах сочленения двух относительно близко образовавшихся субинтрузий под сводом своеобразной П-образной структуры. В целом же Шемурская вулканическая постройка очень напоминает Маканскую колчеданосную кальдеру на Южном Урале.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вахромеев Г. С., Давыденко А. Ю. Моделирование в разведочной геофизике.— М.: Недра, 1987.—192 с.
2. Кусков Н. Н., Кусков В. Н. Ивдельский рудный район // Медноколчеданные месторождения Урала: Геологические условия размещения.— Свердловск: УНЦ АН СССР, 1985.— С. 226—230.

3. Саковцев Г. П., Сапожников В. М., Голиков Ю. В. Построение геомеханических моделей массивов рудовмещающих горных пород по данным скважинной электротомографии // Изв. вузов. Горный журнал.— 1978.— № 8.— С. 3—8.

4. Редозубов А. А. Об электрическом сопротивлении пород, вмещающих колчеданые месторождения Урала // Методика поисков и разведки глубокозалегающих рудных месторождений: Тр. СГИ, вып. 128.— Свердловск, 1975.— С. 53—61.

5. Сапожников В. М. Использование диаграмм каротажа для петрофизического картирования рудовмещающих горных пород // Методика поисков и разведки глубокозалегающих рудных месторождений: Межвуз. науч. темат. сб.— Свердловск, 1977, вып. 1.— С. 11—19.

6. Сапожников В. М., Шевченко В. Г. Теория и методика электроразведки в градиентных средах.— Л.: Недра, 1992.—135 с.

УДК 550.837.653

В. А. Серков

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ РУДНОЙ ПЕТРОФИЗИКИ

Необходимость автоматизации процесса обработки и интерпретации результатов петрофизических исследований обусловлена, с одной стороны, трудоемкостью вычислительных процедур, предусматривающих анализ большого объема числовых данных, с другой — потребностью частого повторения процесса по мере накопления петрофизической информации. Особенно это актуально, если рассматривать петрофизику не только в качестве основы для формирования комплекса методов полевой и скважинной геофизики, но и как самостоятельный метод исследований в рудной геофизике. В данной статье рассматриваются проблемы формализации процесса интерпретации результатов петрофизических исследований и возможные варианты их решения, реализованные автором в системе программного обеспечения интерпретации результатов измерений физических свойств керна поисковых и разведочных скважин.

Процесс получения геологической информации на основе анализа результатов петрофизических исследований можно представить в виде следующей схемы:

1. Обработка результатов полевых и лабораторных измерений, в основе которой, как правило, лежат методы статистического анализа. Целью обработки является выделение групп горных пород или структурно-вещественных комплексов, в пределах которых распределение физических свойств подчиняется нормальному или логнормальному закону [1, 4].

2. Физическая интерпретация данных или построение модели распределения физических свойств горных пород в изучаемой части геологического пространства.

3. Геологическая интерпретация — объяснение природы неоднородностей распределения физических свойств среды.

Первый этап приведенной выше схемы реализуется, как правило, с помощью хорошо известных алгоритмов [1, 2, 4] и в настоящее время достаточно хорошо обеспечен программными разработками для ЭВМ различных типов.

Компьютеризация третьего этапа предполагает включение в анализ геологической информации, формализация которой и разработка алгоритмов ее использования связаны с определенными трудностями.

Наибольший интерес в контексте рассматриваемой проблемы представляет процесс построения физической модели изучаемого пространства на основе анализа петрофизических данных. Во-первых, успехи в этой области значительно скромнее, нежели при решении задач обра-