

Современные проблемы геофизического опробования железорудных месторождений Казахстана

Modern problems of the geophysical tests of iron ores deposits of Kazakhstan

Портнов В.С., Турсунбаева А.К., Камаров Р.К., Маусымбаева А.Д.

Карагандинский государственный технический университет (E-mail: umo@kstu.kz)

Геофизикалық әдістер тәжірибелерін, геологиялық құрылысын, Қазақстанның кен орындарын пайдаға асыру кезінде минералды және химиялық құрамын қарап өткенде, байыту фабрикасынан бастап карьерге дейін барлық технологиялық процесс бойынша магнитті және селективті гамма-гамма әдістердің тиімділігі мен мақсаттылығы негізделген.

From the review of geophysical methods of research, a geological structure, mineral and a chemical compound of maintained deposits of Kazakhstan the expediency and efficiency of use magnetic and selective gamma scale of methods on all technological process from an open-cast mine to concentrating factory are proved.

Введение

Железорудная промышленность занимает одно из ведущих мест в экономике Казахстана. Экономическое значение освоения железорудных месторождений определяется не только богатыми запасами, позволяющими развернуть открытые горные работы в большом объеме, но и близостью месторождений к металлургическим предприятиям Урала и Казахстана [1–3].

Ведущими промышленными типами железорудных месторождений являются осадочно-метаморфогенные магнетит-гематитовые месторождения [4], связанные с формацией железистых кварцитов докембрия. К этому типу месторождений относятся крупнейшие месторождения Курской магнитной аномалии (КМА), Кривого Рога, Кольского полуострова и Малого Хингана. За рубежом месторождения этого типа имеются в США (район Верхнего озера), Канаде, Китае, Индии, Южной Африке, Австралии и других странах.

Скарновые (контактово-метасоматические) месторождения магнетитовых руд [5, 6] имеют форму пластообразных залежей, линз и штоков, приуроченных к активным контактам умеренно-кислых интрузий с карбонатными и эффузивными породами. Запасы отдельных месторождений составляют от нескольких миллионов до первых миллиардов тонн. К этому типу месторождений относятся месторождения Тургайского прогиба Казахстана и Горной Шории, Ангаро-Илимские и другие, а из зарубежных месторождений — Айрон-Спринг (США).

Магнетитовые руды являются сильномагнитными, что и определило использование для их опробования магнитных методов. Поскольку магнетит-гематитовые, гематитовые, оолитовые руды являются слабомагнитными, то для их опробования разрабатывались ядерно-физические методы. В настоящее время почти все шахты Криворожского рудного района перешли на гамма-гамма-опробование добытой рудной массы.

В настоящей работе сделан анализ современного состояния проблемы геофизического опробования железорудных месторождений. Особое внимание уделено теоретическим и экспериментальным методам магниторазведки и нерешенным к началу наших исследований задачам. Рассмотрены

вопросы использования селективного гамма-гамма метода для опробования железорудных месторождений и его аппаратурной реализации [7, 8].

Характеристика геофизических методов опробования железорудных месторождений

Основными геофизическими методами поисков и разведки железорудных месторождений, которые могут использоваться для их опробования, являются грави-, электро-, магниторазведка и ядерно-физические.

Геологической основой гравиразведки является неравномерное распределение масс различной плотности, обусловленное концентрацией тяжелых или легких минералов, образованием складок, смещением слоев и т.п. [1–5].

В формулировке обратной задачи требуется, чтобы гравитационное поле было задано на бесконечном множестве точек и именно тех масс, которые подлежат определению [9–11]. Наиболее широко гравиразведка использовалась на пластовых месторождениях Кривого Рога. За рубежом (США, Канада, Китай и др.) для железорудных месторождений типа Курской магнитной аномалии и Кривого Рога, месторождения Зигерланд (Германия) методы гравиразведки применяются для обнаружения рудных тел в межвыработочном пространстве.

Нами были сделаны измерения вторых производных гравитационного потенциала на Соколовском подземном руднике с целью выявления рудных тел в межвыработочном и призабойном пространствах, однако наличие в недрах полостей, заполненных водой, глинистым материалом, мощных зон разуплотненных руд, пространственное положение которых трудно определимо, привели к неоднозначности интерпретации результатов исследований.

Имеется сравнительно небольшой опыт применения метода вызванной поляризации для поисков месторождений магнетита (главным образом, скарнового типа). Использование дипольного электромагнитного профилирования (ДПМ) и дипольного индуктивного профилирования (ДИП) на месторождениях КМА и Кривого Рога дали положительные результаты [9, 12, 13].

Использование ДИП на рабочих площадках карьеров месторождений Качарский, Кентобе, Соколовский, Сарбайский сдерживается ограниченностью их размеров, наличием линий электропередач, буровых станков, железных дорог, а также достаточно высокими требованиями к геометрии установок и их положению относительно исследуемой среды. Проведенные исследования на месторождении Кентобе методом ДИП показали, что погрешность этого метода при определении содержания железа по рудному блоку составляет 5,1 % абс., что выше погрешности магнитных методов опробования.

Нами были проведены исследования возможности опробования баритизированных гематит-магнетитовых руд месторождения Западный Каражал методом удельного электрического сопротивления с разработанной конструкцией прижимного зонда для разведочных, взрывных скважин шахты [14]. Результаты определения содержания железа по зависимости между электрическим сопротивлением и содержанием железа были использованы для выделения рудных контактов, нерудных пропластов, оценки содержания железа с погрешностью 3,0–3,8 % абс. Низкая точность опробования обусловлена наличием сульфидной минерализации, интервалами обводнения и низкоомных пород.

Ограниченное применение методов электроразведки на магнетитовых месторождениях обусловлено также тем, что вкрапленные, вкрапленно-прожилковые руды, составляющие большую часть запасов, имеют слабую зависимость между содержанием железа и удельным сопротивлением.

Магниторазведка представляет собой комплекс методов решения геологических задач, основанных на различии магнитных свойств пород и руд [15, 16]. Наиболее важные параметры, необходимые при интерпретации результатов магниторазведки, — общая намагниченность пород I , магнитная восприимчивость α , естественная остаточная намагниченность I_n .

Достоверность найденных по магнитному полю значений I горных пород зависит от соответствия принятой модели реальному изучаемому магнитному объекту. Относительная погрешность модуля I , как правило, не превышает 10 %, при допустимой — ± 30 % [17, 18].

В скважинах проводятся измерения магнитной восприимчивости и компонент магнитного поля [19].

Применение методов магниторазведки наиболее эффективно на месторождениях магнитных руд: железистых кварцитов (магнетитовые разности), магнетитовых, титаномангнетитовых руд [20–22]. В магнитных породах ($\alpha > (50:100) \cdot 10^{-5}$ ед. СИ и содержание ферромагнитной фракции $> 0,01$) наблюдается закономерная корреляционная связь между магнитной восприимчивостью и содержанием

магнетитового железа, которая и является основой магнитного опробования железорудных месторождений [22, 23].

Разрабатываемые месторождения железистых кварцитов расположены в пределах Криворожско-Кременчугского бассейна, Курской магнитной аномалии, на Кольском полуострове.

Методика применения каротажа магнитной восприимчивости для опробования предложена и апробирована ВИРГОм совместно с «Кривбассгеология», «Днепрогеофизика» и другими экспедициями. Оценка достоверности работ показала, что определение содержания железа магнетитового по точности не уступает химическому (геологическому) опробованию [22].

Проведенные исследования на этих месторождениях [22] свидетельствуют об отсутствии единой зависимости между магнитной восприимчивостью пород и руд и концентрацией в них магнетита, что требует анализа этих закономерностей в пределах участков, горизонтов. Отмечается необходимость использования комплекса геофизических методов для определения общего железа и железа, связанного с магнетитом.

Таким образом, к общим задачам, которые следует решить для обеспечения точности, достоверности геофизического опробования, относятся: устранение дестабилизирующих факторов, которые можно разделить на две группы: факторы, связанные с минералогическим составом, текстурой, структурой руд, и факторы, связанные с условиями измерений магнитными методами и ядерно-физическими. Для уменьшения влияния первой группы факторов следует разработать методику классификации руд для геофизического опробования. Влияние второй группы может быть достигнуто новыми конструкциями датчиков, зондов, устройств, методикой измерений и градуирования.

Основные месторождения железных руд Казахстана представлены магнетитовыми рудами [3]. Это и обусловило широкое применение методов магниторазведки на этих месторождениях при поисковых, разведочных работах и в процессе эксплуатации месторождений.

Основными ядерно-физическими методами, применяемыми для опробования железных руд, являются [24, 25] гамма-методы, рентгенорадиометрический и нейтронные методы.

Рентгенорадиометрический метод определения железа применяется ограничено из-за малого квантового выхода низкоэнергетического рентгеновского излучения железа и требует специальной подготовки проб, учета влияния рентгеновского излучения других элементов, например, кальция.

При облучении горных пород нейтронами их взаимодействие сопровождается разнообразными ядерными реакциями. Типичным приложением нейтронных методов является определение элементов с аномально большими сечениями поглощения нейтронов. Атомы железа имеют сравнительно малое сечение поглощения, что, наряду со сложностью аппаратного, методического обеспечения, сложностью хранения источников, объясняет небольшое число разработок по применению нейтронных методов на железорудных месторождениях [26].

Гамма-методы, особенно ГГК-С, широко применяются на железорудных месторождениях из-за четкой корреляционной связи между содержанием железа и интенсивностью рассеянного гамма-излучения [27, 28].

Основные задачи, решаемые магнитными методами исследований на месторождениях магнетитовых руд

Основные направления использования скважинной магниторазведки для опробования магнетитовых руд определены в [15, 29]:

- оконтуривание, установление строения и морфологии рудных тел, построение физико-геологических моделей месторождений;
- выделение в скважинах интервалов магнитных руд и оценка их качества.

Теоретические задачи в скважинной магниторазведке делятся на:

- задачи, связанные со средствами измерений магнитного поля, создаваемого рудными телами и анализом их магнитных характеристик;
- задачи, связанные непосредственно с расчетом магнитных полей от рудных тел различной геометрической формы.

Первый тип задач связан с расчетом характеристик различных датчиков (индукционных, параметрических).

Второй тип задач связан с интерпретацией, основанной на анализе как внешних, так и внутренних полей намагниченных тел [20–22].

Метод скважинной магниторазведки сформировался в 1956 г. после создания В.Н.Пономаревым аппаратуры для регистрации вертикальной составляющей магнитного поля и магнитной восприимчивости горных пород.

Расчётам магнитных полей, создаваемых геологическими объектами, посвящены исследования А.К.Вейнберга, В.Н.Пономарева, А.Н.Бахвалова, Б.А.Брюсова, В.Н.Страхова, В.В.Колубакина, М.И.Лапиной, А.М.Полонского, Т.Н.Розе, А.И.Кудрявцева и многих других.

Аналитические выражения внутренних полей в большинстве случаев получены для тел, бесконечных по простиранию и падению, или тел конечных размеров, ограниченных поверхностями второго порядка [20, 21]. Выполнены расчеты внутреннего индуцированного поля в цилиндре конечных размеров [30]. В настоящей работе предложены новые подходы к решению как прямых, так и обратных задач магниторазведки.

В упомянутых выше исследованиях рассматривались стационарные задачи, описываемые уравнениями эллиптического типа. В магниторазведке существует ряд методов, приводящих к нестационарным задачам для магнитного потенциала. В первую очередь, это относится к методу искусственного подмагничивания, впервые предложенного В.Д.Стадухиным [31, 32]. Суть метода состоит в подмагничивании пород постоянным или низкочастотным первичным полем. Измеряются параметры вторичного поля, величины которых зависят от магнитных свойств рудного тела, его геометрии и глубины залегания.

На практике известными являются лишь первичные возбуждающие источники магнитного поля. В этом случае задача для магнитного потенциала сводится к уравнению, которое является уравнением параболического типа

$$\nabla^2 U - \gamma \mu_0 \partial U / \partial t = -q_0 / (\epsilon \epsilon_0). \quad (1)$$

Решение нестационарных задач для магнитного потенциала важно, по крайней мере, еще по двум причинам.

Во-первых, существует метод определения магнитных характеристик руд в естественном залегании по магнитным вариациям во времени.

Метод был предложен Б.М.Яновским [33] для выяснения природы намагниченности тел, т.е. является ли наблюдаемая намагниченность индуктивной, изменяющейся при магнитных вариациях, или обусловлена остаточной намагниченностью пород. Метод, в основном, применяют над телами с высокой намагниченностью, к которым относятся и магнетитовые руды.

Во-вторых, известно, что многие землетрясения сопровождаются вариациями геомагнитного поля. В 1961 г. С.А.Савадский предложил использовать сейсмомагнитный эффект для поисков магнетитовых руд, не выходящих на дневную поверхность. Полевые работы, включающие взрывы в скважинах, проведенные в 1967 г. Б.А.Ундзенковым и В.А.Шапиро, подтвердили наличие четкого сейсмомагнитного эффекта [34]. Однако отсутствие теории и достаточного массива экспериментальных данных не привело пока к широкому использованию сейсмомагнитного эффекта при поиске магнетитовых месторождений.

Приведенные ниже полученные нами решения нестационарной задачи для магнитного потенциала легко приводятся к известным задачам в стационарном случае, подробно решенным В.Н.Пономаревым и А.Н.Бахваловым.

Полученное аналитическое решение задачи о нестационарном магнитном потенциале открывает путь к созданию теории методов, основанных на воздействии на намагниченные объекты упругих колебаний и магнитного поля, а также комплексной интерпретации результатов исследований.

Результаты магнитометрических измерений существенно зависят от физико-химических свойств минералов, их текстуры, размера зёрен, давления, условий образования и ряда других факторов. Наличие столь большого количества факторов часто затрудняет интерпретацию экспериментальных данных и может привести к существенным ошибкам при подсчёте запасов руд. Магнитные свойства железосодержащих минералов исследовались в работах Т.Нагаты, Д.М.Печерского, Г.Н.Петровой, В.Н.Сухорада, Л.Е.Шолпо, В.И.Трухина, А.К.Курскеева, Б.М.Уразаева, А.А.Смелова, Л.П.Жоголева, И.И.Глухих, П.Н.Кобзаря, А.А.Сафронова и многих других. Были найдены эмпирические закономерности влияния размера зёрен, минерального состава, текстуры и других факторов на магнитные свойства железосодержащих минералов, изучены зависимости магнитной восприимчивости от объёмного содержания магнетита и т.д.

Однако общей теории, описывающей все эти влияния на магнитные свойства минералов, не существовало. В настоящей работе на основе методов неравновесной статистической термодинамики впервые построена теория, охватывающая большой круг закономерностей влияния различных факторов на магнитные свойства минералов.

Наиболее широкое распространение для оценки качества магнетитовых руд при их естественном залегании, отбитой рудной массы, бурового шлама, дробленных руд нашел метод магнитной восприимчивости (ММВ).

Каротаж магнитной восприимчивости впервые был осуществлен В.А.Шпаком в 1937 г. В дальнейшем трудами А.В.Вешева, Р.А.Бродинга, В.А.Мейера, Н.А.Иванова, С.И.Шавыкина, В.П.Кальварской, Б.Н.Тихонова, И.И.Глухих, С.Л.Жоголева, Ю.И.Кудрявцева и других развивались экспериментальные и теоретические основы индукционных методов измерения магнитной восприимчивости горных пород и руд в естественных условиях.

К началу наших исследований многие вопросы теории и практики метода магнитной восприимчивости оставались открытыми и получили своё решение в наших работах. В частности, были разработаны новые конструкции накладных датчиков, создана теоретическая модель индукционного проходного датчика и решён ряд других вопросов метода магнитной восприимчивости.

Индукционные методы измерения магнитной восприимчивости горных пород и руд в условиях естественного залегания [29, 35–37] основаны на явлении намагничивания геологических сред низкочастотным первичным полем и на изучении их вторичного поля. Однако индуцируемые в среде вихревые токи создают помеху при измерениях. Их воздействие подавляется аппаратными мерами: снижением частоты и синхронным выпрямлением сигнала. При переменном поле, в принципе, можно ожидать и явления дисперсии магнитных свойств. Лабораторными измерениями, однако, установлено отсутствие частотной зависимости и не обнаружено вязкой компоненты проницаемости в диапазоне звуковых частот [38]. Измеряемая магнитная восприимчивость имеет смысл обратимой восприимчивости. При относительно низких значениях первичного поля она близка к начальной восприимчивости, определяемой традиционным магнитометрическим методом.

В качестве устройств, преобразующих информацию о магнитной восприимчивости среды, используют индукционный зонд с источником и приемником поля. Источником является генераторная катушка, приемником поля служит приемная индукционная катушка. Иногда генераторная катушка совмещает функции источника и приемника (однокатушечный зонд). На приемник воздействует как первичное поле источника, так и вторичное поле намагничиваемой среды, которое зависит от магнитной восприимчивости.

Метод искусственного подмагничивания (МИП) [31, 32] позволяет определять магнитную восприимчивость горных пород и руд в естественном залегании и в сравнительно большом объеме пород (десятки и сотни тысяч кубических метров) [39, 40]. Сущность метода состоит в возбуждении магнитного поля с помощью расположенного на поверхности земли незаземленного контура с постоянным или пульсирующим током малой частоты (около 0,7 Гц). Породы, подмагниченные этим полем, создают дополнительный (вторичный) эффект, величина которого зависит от магнитной восприимчивости, глубины залегания и формы тел. Определению подлежит вторичное магнитное поле, создаваемое подмагниченными породами. Для этого непосредственно измеряют магнитное поле на исследуемом участке при отсутствии в контуре тока, а также нормальное поле контура над немагнитными породами (на контрольном участке). По вычисленному вторичному магнитному полю определяют магнитную восприимчивость пород или руд участка. Измерения производят магнитометрами наиболее высокой чувствительности. Аномальный эффект, составляющий 1–8 %, измеряют путем компенсации первичного намагничивающего поля контура [39].

Величина относительного аномального эффекта в центре квадратного контура для полупространства определяется формулой

$$(\Delta Z)_a / B_{z_0} = K \sqrt{2} / [1 + 4(h/K)^2] \cdot \sqrt{2 + 4(h/R)^2}, \quad (2)$$

где $(\Delta Z)_a$ — абсолютное значение аномального эффекта; B_{z_0} — нормальное поле контура в его центре; R — периметр квадратного контура; K — коэффициент отображения; h — глубинность исследований.

Аномальные эффекты в МИП не зависят от I_n и имеют максимальное значение над горизонтально залегающими телами. Под нормальным, или первичным, магнитным полем в МИПе понимается потенциал либо напряженность поля, создаваемого током в рамке при отсутствии намагничивающих

тел. Так как методикой работ предусмотрено точное соблюдение размеров и формы прямоугольной рамки, то для оценки вертикальной составляющей Z_0 в точках, расположенных в плоскости XOY с началом координат в центре рамки, использовалась формула расчета первичного поля:

$$Z_0 = CIN \left\{ \sqrt{\frac{1}{(R+x)^2} + \frac{1}{(R+y)^2}} + \sqrt{\frac{1}{(R-x)^2} + \frac{1}{(R-y)^2}} + \sqrt{\frac{1}{(R+x)^2} + \frac{1}{(R-y)^2}} + \sqrt{\frac{1}{(R-x)^2} + \frac{1}{(R+y)^2}} \right\}, \text{нТл}, \quad (3)$$

где N — число витков; C — коэффициент пропорциональности (СИ $C = 1/4\pi$, в СГС $C = 0,1$).

Из (3) следует, что для получения интенсивного намагничивающего поля следует изготавливать рамку из провода с малым сопротивлением, большим числом витков и питать максимально возможным током. Практика работ показала, что при существующей технологии отработки магнетитовых месторождений открытым способом размеры рабочих площадок горизонтов позволяют работать с рамками 15x15, 30x30 м, а измерения выполнять в пределах относительно однородного поля, где недостаточно точная установка прибора не приводит к существенным погрешностям. Для квадратной рамки формула (3) принимает вид

$$Z_0 = \frac{56,6INC}{R}. \quad (4)$$

Основные характеристики использования гамма-гамма-методов для опробования железных руд

Магнитные методы опробования железных руд, где железо входит в состав слабомагнитных или немагнитных минералов, неэффективны. В этом случае наиболее перспективными являются ядерно-физические методы исследования и, в частности, гамма-гамма методы.

Благодаря основополагающим работам М.М.Соколова, Г.М.Воскобойникова, Е.М.Филипова, В.А.Арцыбашева, В.А.Мейера, Ю.И.Кудрявцева, А.П.Очкура, Г.А.Пшеничного и многих других, гамма-гамма методы прочно вошли в практику геофизического опробования руд. Однако в случае гамма-гамма методов число факторов, влияющих на результаты геофизического опробования, значительно больше, чем в случае магнитных измерений. Помимо минерального состава, текстуры руд и т.д., существенную роль играет геометрия измерений, которая предъявляет довольно жёсткие требования к конструкции измерительных устройств. К этому нужно добавить и влияние влажности, и зависимость результатов измерений от энергии первичных гамма-квантов.

Гамма-гамма метод изучения состава и плотности пород и руд основан на регистрации рассеянного ими гамма-излучения от внешнего источника [27, 28]. В плотностном гамма-гамма-методе (ГГМ-П) с источниками излучения с энергией более 300 кэВ основным фактором изменения интенсивности вторичного гамма-излучения является комптоновское рассеяние [24].

В селективном гамма-гамма методе (ГГМ-С), использующем энергии, гамма-квантов меньше (200–300) кэВ, но не меньше K -скачка поглощения, сечение фотоэлектрического поглощения сильно зависит от энергии гамма-кванта и атомного номера вещества, при этом интенсивность поглощения излучения источника растёт с ростом атомного номера вещества (элемента).

Таким образом, при опробовании железных руд возможность использования гамма-методов основана на зависимости линейных коэффициентов ослабления гамма-излучения и коэффициентов преобразования первичного излучения во вторичное от плотности горных пород и руд и содержания в них железа [27]. Измерения в гамма-методах осуществляются либо в геометрии прохождения гамма-излучения через слой, либо в геометрии отражения гамма-излучения от слоя.

При исследовании скважин, стенок горных выработок, обнажений, дробленой руды различной крупности в методе используют случай, когда источник и детектор расположены по одну сторону исследуемой среды [41].

Конструкции зондовых устройств, используемых в ГГМ-П и ГГМ-С, принципиального отличия не имеют. Основные варианты их расположения (источник–детектор–исследуемая среда) приведены на рисунке 1.

Проведенные нами исследования минералогического состава железных руд месторождений Казахстана, их текстурных и структурных факторов свидетельствуют о том, что при опробовании руд ГГМ-С в естественном залегании в пределах выделенных групп руд содержание «тяжелых» элемен-

тов, плотность, пористость, влажность изменяются незначительно, что предопределило выбор ГГМ-С для определения общего железа. Использование оптимальных низкоэнергетических источников гамма-излучения, разработанных зондовых устройств, методик измерения и обработки результатов исследований дало возможность оценивать содержание общего железа со среднеквадратической погрешностью не менее 2,1 % абс. Применение для опробования руд в естественном залегании, отбитой рудной массе ядерно-физических методов, использующих нейтронные источники, сдерживается сложностью обеспечения безопасности работы с ними [42]. Эти методы используются в стационарных установках при определении Fe^0 на транспортерных лентах (Костомукшский, Нижне-Тагильский ГОКи).

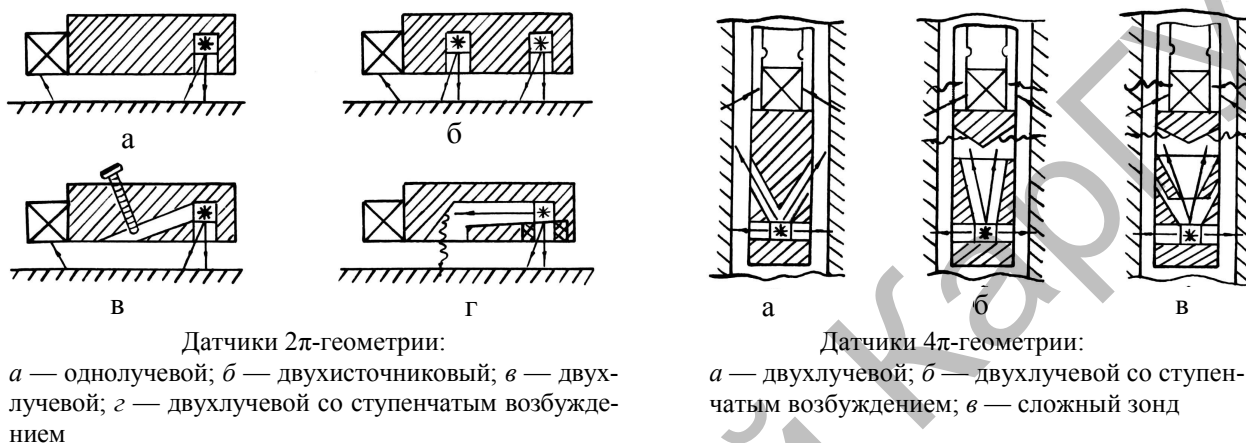


Рис. 1. Конструкции зондовых устройств для ГГМ-С

Основное условие использования ГГМ-С для количественных определений содержания железа в руде — наличие однозначной связи между его содержанием и эффективным атомным номером. Метод основан на регистрации рассеянного рудой низкоэнергетического (50–300) кэВ гамма-излучения. В качестве источников используют изотопы: америций-241 ($E_j = 60$ кэВ, $T = 465$ дн.), кобальт-57 ($E_j = 122$ кэВ, $T = 270$ дн.) и селен-75 ($E_j = 121, 135, 265, 280, 401$ кэВ, $T = 127$ дн.). Для данного диапазона энергий основными эффектами взаимодействия гамма-излучения с веществом являются эффект Комптона и фотоэлектрическое поглощение.

Полный коэффициент ослабления гамма-излучения в веществе равен:

$$\mu = \mu_k + \mu_\phi, \quad (5)$$

где μ_k, μ_ϕ — линейные коэффициенты комптоновского рассеяния и ослабления первичного излучения за счет фотоэффекта [27]. Для горных пород и руд μ рассчитывают по формуле:

$$\mu = \sum_{i=1}^n C_i \mu_i, \quad (6)$$

где C_i — содержание в руде i -го элемента.

Для оценки величины взаимодействия гамма-излучения со сложной средой введено понятие эффективного атомного номера $Z_{эф}$ [27], который определяется как атомный номер некоторого условного элемента, линейный коэффициент ослабления которого равен коэффициенту для данной среды. Для энергии квантов менее 300 кэВ, но более энергии K -оболочки, эффективный атомный номер определяется по формуле:

$$Z_{эф} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^n C_i Z_i^3}. \quad (7)$$

Таким образом, при увеличении плотности железной руды и ее эффективного атомного номера растет сечение комптоновского рассеяния. График зависимости относительной к эталону (J_s) интенсивности рассеянного излучения (J/J_s) от содержания железа и плотности руд в буровзрывных скважинах Куржункульского месторождения приведен на рисунке 2.

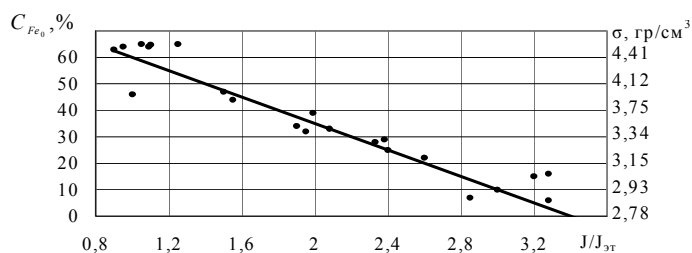


Рис. 2. Зависимость относительной интенсивности рассеянного гамма-излучения от содержания общего железа и плотности руд

При проведении исследований использовался двухлучевой 2π-зонд длиной 14 см, имеющий отверстия: дальнее — 10 мм, ближнее — 2,45 мм, с наклоном коллимационного отверстия 60°, с источником Co^{57} , детектором NaJ (Т1), с площадью окна 35x30 мм.

Произведенные расчеты $Z_{эф}$ по среднему химическому составу железных руд месторождений Казахстана (рис. 3) показывают, что существует корреляционная зависимость между $Z_{эф}$ (Fe) и $Z_{эф}$ (m), т.е. железную руду можно представить как бинарную смесь наполнителя (легких окислов, в основном SiO_2) и полезных компонентов — окислов железа. Из рисунка 3 видно, что руды месторождений, содержащих значительное количество CaO (Малый Куйбас, г. Дальняя, Кентобе), отличаются по $Z_{эф}$ при содержании железа до 30 %, затем эти различия не существенны, что связывается с практически полным замещением окислами железа CaO. Графики $Z_{эф}$ (Fe) для магнетитовых (Fe=72,36) и для гематитовых (Fe=70,70) совпадают при Fe>40 %. Графики 9, 10 отображают изменение $Z_{эф}$ от содержания магнетита и гематита. Пунктирными линиями показаны зависимости $Z_{эф}$ от объемной концентрации магнетита, которая рассчитана по формуле (7).

Основным критерием применения ГГК-С для опробования железных руд является погрешность анализа, определяемая выражением [25]:

$$\sigma^2 = \sigma_a^2 + \sigma_c^2 + \sigma_m^2, \tag{8}$$

где σ_a , σ_c , σ_m — аппаратная, статистическая и методическая погрешности.

Уменьшение σ_a достигается повышением стабильности режимов работы регистрирующей аппаратуры, а σ_c — путем увеличения числа зарегистрированных за одно измерение гамма-квантов.

Методическая погрешность оценивается из выражения:

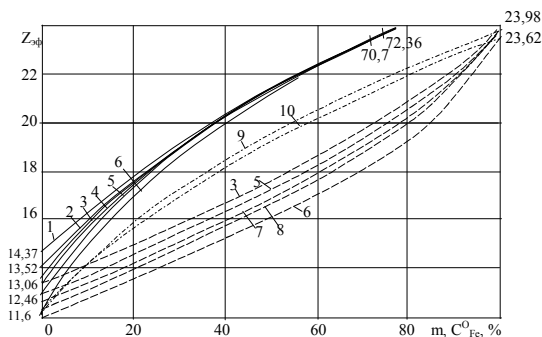
$$\sigma_m = \sqrt{\sum_i \left(\frac{S_i}{S_{Fe}} \right)^2 D_i}, \tag{9}$$

где S_{Fe} , S_i — чувствительность к содержанию железа и i -мешающему фактору; D_i — дисперсия i -го параметра.

Чувствительность метода вычисляется по формуле:

$$S = \frac{1}{N} \frac{dN}{dC} \cdot 100\%, \tag{10}$$

где $dN/N \cdot 100\%$ — относительное изменение интенсивности зарегистрированного гамма-излучения при изменении содержания железа в руде на dC .



1 — Малый Куйбас, г. Дальняя; 2 — Кентобинское; 3 — Сарбайское; 4 — Куржункульское; 5 — Соколовское; 6 — Лисаковское; 7 — Качарское; 8 — Южно-Ломоносовское месторождения; 9 — $Z_{эф} = f(Fe_3O_4)$, 10 — $Z_{эф} = f(Fe_2O_3)$

Рис. 3. Зависимость эффективного атомного номера от содержания железа и объемной концентрации магнетита

Для уменьшения методической погрешности необходимо уменьшать чувствительность метода к мешающим факторам. Как показано в [25], чувствительность метода к железу зависит от отношений сечений рассеяния и ослабления полезного компонента к наполнителю и от содержания полезного компонента. С увеличением содержания чувствительность к железу уменьшается. Отношение сечений существенно зависит от энергии первичного γ -излучения. Проведенные нами исследования с различными источниками гамма-излучения на пробах железных руд показывают, что с уменьшением энергии чувствительность к железу возрастает в пределах изменения энергии (60–200) кэВ (рис. 4).

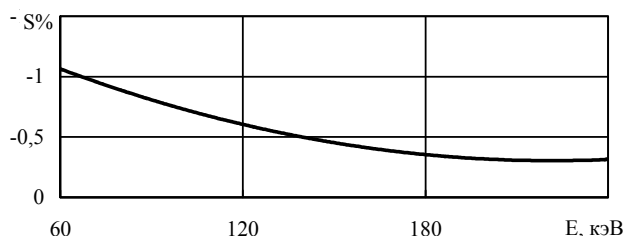


Рис. 4. Зависимость чувствительности метода ГГК-С к содержанию железа от энергии гамма-излучения

Основными мешающими факторами при проведении опробования железных руд являются изменения: геометрии измерений, влажности, плотности, пористости, текстуры руды и т.д. Плотность железных руд, в основном, зависит от содержания в них железа. Повышение влажности руды увеличивает интенсивность регистрируемого излучения, что приводит к занижению определяемого содержания железа. Влияние диаметра скважины устраняется использованием прижимных устройств и инверсионных двухлучевых 2π -, 4π -зондов, разработанных нами [43–47].

Текстура руд, размеры зёрен минерала оказывают меньшее влияние на результаты ГГМ-С, чем перечисленные выше мешающие факторы.

Управление качеством руды на основе геофизического опробования является одним из важнейших горно-технологических процессов. Однако отсутствие научно-методических основ геофизического опробования руд месторождения или его участков, отсутствие системы управления качества руд на всех стадиях технологического процесса часто приводило к неоправданным потерям на горнодобывающих и перерабатывающих предприятиях.

Из перечисленных проблем следует, что для создания научно-методических основ геофизического опробования железорудных месторождений Казахстана требуется комплексный подход.

Заключение

Из обзора геофизических методов опробования, геологического строения, минерального и химического состава эксплуатируемых месторождений Казахстана обоснованы целесообразность и эффективность использования магнитных и селективного гамма-гамма методов по всему технологическому процессу от карьера до обогатительной фабрики.

Анализ состояния теории магнитных измерений в геологоразведке и их аппаратная реализация выявили следующие основные проблемы:

- практически отсутствуют решения нестационарных задач магниторазведки, что сдерживает внедрение методов временных вариаций магнитного поля и искусственного подмагничивания, применение сейсмамагнитного эффекта перспективных для обнаружения рудных тел, не выходящих на дневную поверхность, и оценку их качественных и количественных показателей;
- недостаточно развиты теоретические подходы к решению обратных задач магниторазведки;
- слабо изучены теоретические и экспериментальные вопросы конструирования новых датчиков ММВ, обладающих высокой чувствительностью и стабильностью работы.

Основными проблемами в селективном гамма-гамма-методе и его использовании при опробовании железорудных месторождений являются:

- отсутствие теории, позволяющей хотя бы качественно учесть влияние различных факторов (энергии первичного излучения, минерального и химического состава, влажности руд и т.д.) на результаты измерений;

– существенная зависимость результатов опробования от геометрии измерений, особенностей конструкции зондов, типа используемого источника гамма-излучения и т.д.

References

1. *Nazarbayev N.A.* Kazakhstan — 2030. — Almaty: Bilim, 1997. — 176 p.
2. *Ontoyev D.O.* Description of the magnetite ore deposits // Magnetite ores of Kustanay region. — M., 1958. — P. 147–164.
3. *Berkaliev B.* Ore Industry of Kazakhstan. — Alma-Ata, 1974. — 140 p.
4. Instructions for use classification of reserves to deposits of iron ores. (State Commission on Mineral Reserves of the Council of Ministers of the USSR). — M., 1984. — 40 p.
5. *Kobzar P.* Metasomatism in magnetite deposits Turgay's downfold. — Almaty: Kaz. IMS, 1966. — 154 p.
6. *Kozlowski E.A.* Geology of the USSR. Volume XX. Central Kazakhstan. Minerals. — M.: Nedra, 1989. — 541 p.
7. Gravity survey. Directory of Geophysics. — M.: Nedra, 1981. — 397 p.
8. *Prilepko A.I.* On the uniqueness of the determination of density and body shape in inverse problems of potential theory / USSR. — T. 193. — 1970. — № 2. — P. 288–291.
9. *Alpin L.M., Daev D.S., Karinsky A.D.* Field theory used in geophysics. — M.: Nedra, 1985. — 385 p.
10. *Cherednichenko V.G.* The inverse problem for the potential of layered media in the two // Differential equations. — 1978. — № 1. — P. 140–147.
11. *Novoselytsia V.* The theory of determining the change in density in a horizontal layer of gravity anomalies // Izv. USSR / Geophysical Ser. — 1966. — № 6. — P. 15–32.
12. *Dortman N.B.* Physical properties of rocks and minerals // Directory of Geophysics. — M.: Nedra, 1976. — 568 p.
13. *Kudryavtsev I.* Field theory and its applications in geophysics. — L.: Nedra, 1988. — 335 p.
14. *Borisenko J.N., Makhotin A., Portnov V.S.* The design of the probe method of apparent resistivity // Geophysical equipment. — Vol. 62. — L.: Nedra, 1977. — P. 36–39.
15. *Ponomarev V., Avdonina A.N.* Downhole magnetic survey // Guidelines in two parts. — Sverdlovsk: Uralgeologiya, 1984. — 186 p.
16. *Nikita V.E.* Magnetic induction and magnetic field strength — their importance in magnetic prospecting // Theory and Practice of the geological interpretation of gravity and magnetic anomalies. — Alma-Ata: PGO Kazgeofizika, 1984. — Vol. 3. — P. 3–6.
17. *Revyakin P.S., Brodova V.V., Revyakina E.A.* Precise magnetic prospecting. — M.: Nedra, 1986. — 238 p.
18. *Bulina L.V., Ryabkova M.S.* Integral method for estimating the average magnetization of bodies on the anomalies of the magnetic field / Labor of 1976. — T. 264. — P. 66–73.
19. *Ponomarev V.N., Bakhvalov A.N.* Method of measurement in wells and interpretation of results // Express Info / Regional exploration and well logging. — Vol. 13. — M.: ONTI VIEMS, 1975. — P. 25–56.
20. *Ponomarev V.N., Bakhvalov A.N.* Interpretation of the vector magnetic field of two-dimensional bodies // Announcement. — Vol. 68. — M.: ONTI VIEMS, 1965. — P. 7.
21. *Bakhvalov A.N.* Mathematical modeling of three-dimensional magnetic bodies with homogeneous and inhomogeneous magnetization // Applied Geophysics. — 1981. — № 101. — P. 164–173.
22. *Kalvar'skaya V.P., Fillipycheva L.G. et al.* Guidance on the Application log to determine the magnetic susceptibility of the iron content of magnetite in the exploration and evaluation in the fields of ferruginous quartzites. — L.: Geophysics, 1977. — 108 p.
23. *Weinberg, A.K.* Physical properties of iron ores of different origins // Method, technique and results of geophysical exploration. — M.: Nedra, 1967. — P. 327–331.
24. *Zaporozhets V.* Borehole Nuclear Geophysics. — M.: Nedra, 1978. — 247 p.
25. *Yakubovich A.L., Zaitsev E.N., Przhivalgovsky S.M.* Nuclear Methods of analysis of mineral raw materials. — M.: Nedra, 1973. — 390 p.
26. *Meyer V.A., Vaganov P.A.* Fundamentals of Nuclear Geophysics. — L., 1985. — 408 p.
27. *Evdokimov E.D.* Gamma-gamma method in mine geology. — M.: Nedra, 1971. — 102 p.
28. *Wheat G.A., Ochkur A.P. et al.* Gamma-gamma method in mine geology. — McGraw, 1974. — 450 p.
29. *Ponomarev V.N., Avdonin A.N.* Guide downhole magnetic survey and magnetic logging. — Sverdlovsk, 1966. — 187 p.
30. *Filippycheva L., Savitsky A.P.* Calculation of the internal field induced by the bodies of finite dimensions // Methods of exploration geophysics. — Vol. 17. — L.: VIRG, 1973. — P. 76–82.
31. *Stadukhin V.D., Gourmets V.N. et al.* The method of artificial bias in the search of the magnetite deposits. Methodological recommendations. — Sverdlovsk: UNC AN SSSR, 1982. — 106 p.
32. *Shabanov N.* Theory and practice of techniques of artificial bias in the search for iron ore deposits. — Sverdlovsk: Ural Scientific Center of the USSR, 1982. — 18 p.
33. *Yanovsky B.M.* Terrestrial Magnetism. — L.: LSU, 1978. — 592 p.
34. *Ivanov N., Shapiro V.A.* Modeling seismomagnetic effect on Kurzhunkul'skom deposit of magnetite // The method of magnetic measurement and interpretation in geophysics. — Sverdlovsk, 1970. — P. 17, 18.
35. *Kalvar'skaya V.P.* Comparative analysis of a single coil and dual coil systems in the magnetic susceptibility and conductivity // Applied Geophysics. — 1961. — Vol. 30. — P. 198–205.
36. Guidelines for the magnetic method of testing with the equipment RIMV-2, LA, NGOs Rudgeofizika. — 1985. — 103 p.

37. Kudryavtsev Yu. Induction methods for measuring the magnetic susceptibility of rocks and ores in natural conditions. — L.: Nedra, 1978. — 240 p.
38. Bakhvalov A.N., Deaf I.I., Portnov V.S. Consideration of the complex nature of the magnetic susceptibility measurement of single coil at its tip // Geophysical equipment. — Vol. 74. — L.: Nedra, 1981. — P. 27–32.
39. Portnov V.S. Assessment of the quality of magnetite ore in situ // Mining J. — M.: Nedra, 1986. — № 6. — P. 36–37.
40. Report number 75051064 KarPTI. Experimental and methodological work on industrial testing of methods of complex analysis on the total ore and magnetite iron. — Karaganda, 1977. — 240 p.
41. Ivanov I.A., Stadukhin V.D., Ulitina G. Determination of iron in magnetite ore deposits by artificial bias // Problems of sampling methods for mineral resources prospecting and exploitation. — Sverdlovsk: GIS, 1969. — P. 63–68.
42. Nifontova B.I., Avsaragova J.B. The nuclear-geophysical methods for testing the mining and mineral processing. — L.: Nedra, 1972. — 150 p.
43. Portnov V.S., Borisenko N. Colonels V. A.S. Number 1229705. The USSR. Clamping device for well logging instruments. Publ. 08. 01. 86.
44. Borisenko N., Portnov V. The design of the downhole tool 2π -two-beam probe // Geophysical equipment. — L.: Nedra, 1975. — Vol. 59. — P. 32–36.
45. Portnov V.S., Borisenko J.N. Two-beam 4π -device for geophysical studies using gamma-ray. A.S. number 472 591. The USSR. Publ. 19. 11. 74.
46. Borisenko N., Portnov V., Colonels Yu. Dual-beam sensor with 4π -step excitation // Geophysical equipment. — L.: Nedra, 1981. — Vol. 72. — P. 72–74.
47. Borisenko N., Portnov V. Peculiarities of the probe device for testing GGMS iron ore // Proc. Nauchn. Proceedings KazPTI / Procedures and results of geophysical studies. — Alma-Ata, 1984. — P. 41–43.

УДК 538.95.405

Поверхностное натяжение и постоянная Толмена металлов

The superficial tension and Tolmen's constant of metals

Юров В.М.

Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова (E-mail: exciton@list.ru)

Мақалада периодтық жүйенің 55 элементі үшін беттік керілудің, сындық радиустың және Толмен тұрақтысының мәндері келтірілген. Балку температурасы төмен металдар үшін беттік керілудің мәні Дж/м² ондық бөлігін құрайды, ал қиын балкитын металдар үшін Дж/м² бірлік мәндеріне сай. Сындық радиус ішкі өлшемдік эффектілерді сипаттайды және зерттелген металдар үшін 10 нм аспайды. Толмен тұрақтысы металл бетінің екі өлшемді кристалдық торының периодымен сай келеді және металл көлемінің кристалдық торының периодынан екі немесе одан да көп артық, ол металл бетінде атомаралық әсерлесудің азаюымен байланыстырылады.

In work for 55 elements of periodic system the superficial tension, critical radius and Tolmen's constant are calculated. For metals with low temperature of fusion the size of a superficial tension makes shares of the j/m^2 , and for refractory — units of the j/m^2 . The critical radius «d» characterizes the internal dimensional effects and does not exceed 10 nanometers for the investigated metals. Tolmen's constant is compared with the period of a two-dimensional crystal lattice of a surface of metal and in two and more times exceeds the period of a crystal lattice in metal volume that contacts reduction of internuclear interaction by surfaces.

Введение

Из 118 химических элементов, открытых на сегодняшний день, 96 относятся к металлам. Несмотря на появление большого количества неметаллических материалов, их значение в технике и в жизни человека остается огромным. При работе различных машин и механизмов во многих случаях основную роль играет поверхность металла и физико-химические процессы на его поверхности.

Поверхностные явления имеют место в любой гетерогенной системе, состоящей из двух или нескольких фаз. По существу весь материальный мир гетерогенен. Как гомогенные можно рассматривать системы лишь в ограниченных объемах пространства. Поэтому роль поверхностных явлений в природных и технологических процессах чрезвычайно велика.