

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРОБОВАНИЯ МАГНЕТИТОВЫХ РУД  
В ИХ ЕСТЕСТВЕННОМ ЗАЛЕГАНИИ**

А. А. Аузин

*Воронежский государственный университет*

Поступила в редакцию 23 января 2014 г.

**Аннотация:** приводятся факторы, влияющие на точность геофизического опробования магнетитовых руд в их естественном залегании. Рассматриваются вопросы применения каротажа магнитной восприимчивости с целью определения содержания магнетитового железа в железистых кварцитах, для которых типична анизотропия их электромагнитных параметров.

**Ключевые слова:** опробование магнетитовых руд, картаж магнитной восприимчивости, анизотропия.

**Abstract:** *the factors influencing accuracy of geophysical approbation of magnetites ores in situ are resulted. Questions of application a magnetic susceptibility logging are considered with the purpose of definition of the contents of magnetites iron in iron quartzites for which the anisotropy of their electromagnetic parameters is typical.*

**Key words:** *approbation of magnetites ores, magnetic susceptibility logging, anisotropy.*

Магнетитовые руды всегда являлись сырьевой основой отечественной черной металлургии. К настоящему времени только разрабатываемые месторождения-гиганты Курской магнитной аномалии (КМА), в которых сосредоточено не менее 2/3 разведанных запасов и прогнозных ресурсов железных руд России, обеспечивают порядка 52 % потребности страны в данном виде сырья.

Поскольку в железистых кварцитах КМА железо сконцентрировано преимущественно в обладающем аномально высокой магнитной восприимчивостью магнетите, то их геофизическое опробование на предмет содержания в рудах магнетита (железа магнетитового –  $Fe_M$ ) выполняется с использованием каротажа магнитной восприимчивости (КМВ). Как показывает производственный опыт, точность определения содержания железа магнетитового по данным КМВ может не уступать химическим анализам – средне-квадратическое расхождение между результатами геофизического и химического опробования не превышает 2,1–2,3 % абс.  $Fe_M$  [1; 2]. Кроме того, опробование полезных ископаемых, основанное на химических или иных анализах керна, является весьма трудоемким и дорогостоящим мероприятием. Привлечение геофизических методов исследований в скважинах, способных обеспечить непрерывное диагностирование вскрытых скважинами геологических разрезов, позволяет сделать опробование не только более оперативным и качественным, но и менее дорогостоящим.

При геофизическом опробовании переход от результатов скважинных измерений к определяемым параметрам руд осуществляется с помощью градуировочных зависимостей, получаемых по материалам каротажа «эталонной» скважины (или нескольких скважин), обеспеченной (обеспеченных) представительными данными по опробованию керна на определяемый параметр или по результатам исследований на искусственных физических моделях сред известного состава. При этом скважинные условия, геологические характеристики разреза (характер оруденения, вмещающие его породы и пр.) и диапазон изменения значений определяемого параметра в эталонной скважине должны соответствовать таковым на исследуемом месторождении в целом. Аналогичным требованиям обязаны удовлетворять и условия физического моделирования.

Одним из эффективных методов стандартизации результатов каротажа, выполняемого различными комплектами аппаратуры, и оперативного контроля стабильности работы аппаратуры является периодическое проведение исследований в контрольно-градуировочной скважине (КГС).

Кроме КГС, для стандартизации результатов исследований и контроля стабильности работы аппаратуры могут использоваться контрольно-градуировочные устройства (КГУ), представляющие собой физические модели среды, пересекаемой скважиной [1].

В информационном обеспечении геофизического опробования в целом важную роль играет процедура сопоставления результатов исследований керна

материала и данных каротажа, которая имеет место не только на этапе построения градуировочных зависимостей, но и при оценке точностных характеристик геофизического опробования. По целому ряду причин подобные сопоставления требуют к себе очень внимательного отношения. Среди таких причин следует выделить:

- влияние на результаты скважинных исследований структурно-текстурных характеристик оруденения; распределение оруденения в пределах рудного тела обычно бывает весьма неравномерным и поэтому объект анализа, осуществляемого *in situ* методами каротажа, принципиально отличается от такового при лабораторных исследованиях геологических проб, вещество которых, в результате пробоподготовки, на макроуровне оказывается практически однородным во всех отношениях;

- влияние на результаты лабораторных анализов достаточно характерного для рудных объектов избирательного истирания зерна, приводящего к его искусственному обогащению некоторыми компонентами или, наоборот, к разубоживанию в отношении каких-то компонентов;

- возможные неточности в определении места фактического отбора зерна, обусловленные его неполным выходом или иными причинами;

- различие в объемах областей исследования геофизическими и лабораторными методами, сказывающееся тем сильнее, чем более неоднородно оруденение; обычно объем области исследования методами ГИС в несколько раз превышает объем изучаемого зернового материала, однако нередки примеры и обратного соотношения, наиболее характерные для ядерных методов опробования;

- изменение физических свойств и вещественного состава пород в процессе их вскрытия бурением; характерно, что эти эффекты могут наблюдаться как у зерна, так и в прискважинной части разреза.

Как показали многочисленные исследования, универсального выражения, описывающего зависимость между магнитной восприимчивостью руд и содержанием в них магнетита, не существует. Среди прочего характер этой зависимости определяется магнитными свойствами самого магнетита и текстурно-структурными особенностями руд. Вместе с тем на практике, в пределах одного месторождения или отдельных его участков, наблюдается тесная корреляционная связь между содержанием железа магнетитового в рудах и их магнитной восприимчивостью [2–4].

Привлечение КМВ для определения содержания в железных рудах магнетитового железа требует предварительного сбора данных для информационного обеспечения возможности построения корреляцион-

ной зависимости  $Fe_M = f(\chi)$ , где  $Fe_M$  – процентное содержание магнетитового железа в рудах,  $\chi$  – их магнитная восприимчивость. Для решения этой задачи на стадии поисково-оценочных работ или предварительной разведки по всем скважинам проводится химическое опробование зерна с целью выяснения химико-технологических особенностей руд, в частности – определения содержания в них магнетитового железа, а также детальная капаметрия зерна [1]. Сопоставление результатов химического опробования и материалов КМВ позволяет определить корреляционную связь между этими данными, т.е. построить зависимость  $Fe_M = f(\chi)$ , что дает возможность уже на стадии детальной разведки проводить опробование руд, руководствуясь данными КМВ.

В большинстве случаев аппаратура КМВ строится на основе двух типов зондов – однокатушечного (с усилением магнитного потока) и двухкатушечного (с экранировкой магнитного потока). В первом случае катушка индуктивности в определенном смысле совмещает в себе функции и источника, и приемника поля, т.е. реализуется так называемый импедансный способ измерения, основанный на эффекте «вносимой индуктивности». Вторым типом зондов КМВ, который аналогичен зондам индукционного каротажа и содержит разнесенные генераторную и приемную катушки, оценивается эффект экранирования магнитного поля окружающей зонд средой [5; 6].

Достоинством двухкатушечных зондов КМВ является их бóльшая, по сравнению с однокатушечными, глубинность и, соответственно, меньшая зависимость результатов каротажа от диаметра исследуемой скважины. К их недостаткам следует отнести сложную, часто существенно асимметричную, форму аномалий на кривых КМВ, зарегистрированных против пластов повышенной магнитной восприимчивости, что осложняет обработку материалов КМВ в неоднородных разрезах (это характерно для магнетитовых месторождений). Кроме того, в области высоких значений магнитной восприимчивости зависимость сигнала на выходе двухкатушечного зондового устройства от  $\chi$  среды значительно отклоняется от прямолинейной. У однокатушечных зондов это явление менее выражено, однако из-за существенной зависимости показаний однокатушечных зондов от диаметров исследуемых скважин, количественная интерпретация их данных возможна только с привлечением результатов кавернометрии.

Корреляционная зависимость между магнитной восприимчивостью  $\chi$  и содержанием магнетитового железа  $Fe_M$  нелинейна – она достаточно резко выполаживается в области высоких значений  $\chi$ . Кроме того, ее аналитическое выражение часто имеет вид:  $Fe_M = a + b\chi + \dots + c\chi^n$  (т.е. содержит свободный член).

В частности, в [2] в качестве примера для одного из месторождений железистых кварцитов КМА, приведена зависимость:

$$Fe_M = 1,45 + 36,25 \chi_k.$$

С физической точки зрения, подобный вид зависимости может быть объяснен влиянием проводимости магнетитовых руд. Известно, что проводимость магнетита может достигать  $10^2$ – $10^3$  См/м [1; 3], т.е. ее величина соизмерима с проводимостью сульфидов. В пределах отдельных магнетитовых прослоек, зерна магнетита составляют единую электропроводную матрицу очень низкого удельного электрического сопротивления. Фаза магнитного поля вихревых токов, индуцируемых в очень хорошо проводящих объектах, сдвинута на  $180^\circ$  относительно первичного (возбуждающего) магнитного поля, таким образом, ЭДС в приемной катушке зонда КМВ, обязанная своим появлением вихревым токам, направлена против ЭДС, обусловленной влиянием магнитной восприимчивости, и занижает ее величину. На практике подавляющая часть используемых для построения корреляционной зависимости  $Fe_M = f(\chi)$  данных характеризует интервалы разреза с высоким содержанием магнетита, которые имеют высокие значения не только магнитной восприимчивости, но и проводимости. На возможность искажения данных КМВ в интервалах высокой проводимости указывается, в частности, в Инструкции по проведению геофизических исследований рудных скважин, где говорится, что «существенным образом результаты КМВ может исказить повышенная электропроводность пород и руд, связанная с зонами значительной сульфидной минерализации. При электропроводности выше 100 См/м изменяется полезный сигнал...» [1]. Следует обратить внимание, что наличие подобных интервалов увязывается исключительно с присутствием в рудах сульфидов, а роль собственно магнетита игнорируется, что представляется совершенно неверным. Уместно предположить, что выполнение зависимости  $Fe_M = f(\chi)$  в области высоких значений  $\chi$  связано именно с увеличением проводимости железистых кварцитов по мере роста содержания их в магнетите.

Не менее важен вопрос о влиянии на результаты геофизического опробования железистых кварцитов анизотропии их физических свойств, прежде всего – магнитной восприимчивости. Данные исследований свидетельствуют, что анизотропия магнитной восприимчивости, связанная со слоистостью руд и столь свойственная железистым кварцитам, оказывает влияние на результаты КМВ с любым типом зондов. В зависимости от ориентировки зондового устройства относительно слоистости эффективная магнитная проницаемость  $\mu_{эф}$  будет изменяться от  $\mu_{эф} = (\mu_t \mu_n)^{1/2}$

до  $\mu_{эф} = \mu_t$ , где  $\mu_t$  и  $\mu_n$  – магнитные проницаемости соответственно вдоль и вкрест слоистости. При больших значениях магнитной анизотропии  $\lambda = \mu_t / \mu_n$ , часто достигающих 2–3 и даже более единиц, что весьма характерно для КМА, этим крайним случаям будут отвечать существенно различающиеся между собой значения  $\mu_{эф}$  [7].

Необходимо подчеркнуть, что железистым кварцитам свойственна анизотропия электромагнитных свойств *в целом*, а не только одной лишь магнитной восприимчивости. С практической точки зрения, сказанное означает, что если железистые кварциты пересекаются скважиной по нормали к их слоистости, то их кажущаяся магнитная восприимчивость будет существенно меньше, чем в случае, когда они пересекаются скважиной параллельно слоистости. Причем в этом проявляется влияние двух факторов. С одной стороны, в данной ситуации силовые линии магнитного поля зондового устройства КМВ пересекают слоистость преимущественно по нормали, а при такой ориентировке намагничивающего поля магнитная восприимчивость железистых кварцитов минимальна. С другой стороны, показания аппаратуры КМВ еще более занижаются из-за влияния проводимости разреза, роль которой, при подобной взаимной ориентировке электрической составляющей электромагнитного поля зонда и слоистости, максимальна [8, 9].

Еще одним достоинством двухкатушечной схемы измерений является то, что она позволяет проводить так называемый «электромагнитный каротаж» (ЭМК). В данном контексте этот термин обозначает метод исследований, основанный на одновременном измерении магнитной восприимчивости ( $\chi$ ) и удельной электрической проводимости ( $\gamma$ ) вскрытых скважинами горных пород. Таким образом, ЭМК фактически объединяет в себе два метода – каротаж магнитной восприимчивости (КМВ) и индукционный каротаж (ИК) [3]. Первая аппаратура для параллельного измерения удельной электропроводности и магнитной восприимчивости АИМК была разработана на основе двухкатушечного индукционного зондового устройства в Московском геологоразведочном институте М. И. Плюсниным, В. В. Альферовым и А. И. Сердиновым.

ЭМК не только позволяет изучать распределение в разрезах скважин двух весьма информативных электромагнитных параметров –  $\chi$  и  $\gamma$ , но и дает возможность с большей надежностью интерпретировать материалы КМВ, что особенно важно, когда исследования проводятся на объектах, где высокомагнитные руды дополнительно являются и хорошими проводниками.

Одним из резервов повышения точности опробования железистых кварцитов на содержание в них магнетитового железа является учет их анизотропии, причем не только в отношении магнитной восприимчивости, но и проводимости. Поскольку степень влияния анизотропии на результаты исследований зависит от ориентировки ее оси относительно направления электромагнитного поля зондового устройства, то для корректного учета влияния анизотропии необходимо знание ориентировки микрослоистости относительно скважины. Подобную информацию может дать скважинная пластовая индукционная наклонметрия (СПИН), разработанная в свое время в МГРИ [10], тем более что последний вариант аппаратуры СПИН-1, разработанный в Воронежском государственном университете, позволял проводить параллельно не только наклонмерию, но и каротаж магнитной восприимчивости [11].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Инструкция по проведению геофизических исследований рудных скважин / под ред. Е. П. Лемана, А. П. Савицкого. – СПб. : ВИРГ-Рудгеофизика, 2000. – 414 с.
2. Методические указания по применению каротажа магнитной восприимчивости для определения содержания железа магнетитового при разведке и оценке запасов на месторождениях железистых кварцитов / В. П. Кальварская [и др.]. – Л. : Геофизика, 1979. – 108 с.
3. Екимов Е. С. Инструкция по каротажу магнитной восприимчивости и электромагнитному каротажу / Е. С. Екимов [и др.]. – Л. : Рудгеофизика, 1987. – 79 с.
4. Скважинная магниторазведка : методические рекомендации : в 2 ч. / под ред. В. Н. Пономарева и А. Н. Авдонина. – Свердловск : Уралгеология, 1984. – Ч. 1. – 112 с. ; Ч. 2. – 128 с.
5. Кудрявцев Ю. И. Индукционные методы измерения магнитной восприимчивости пород и руд в естественных условиях / Ю. И. Кудрявцев. – Л. : Недра, 1978. – 240 с.
6. Кудрявцев Ю. И. Каротаж магнитной восприимчивости / Ю. И. Кудрявцев, А. К. Сараев. – СПб. : Изд-во СПбГУ, 2004. – 269 с.
7. Мейер В. А. Геофизические исследования скважин / В. А. Мейер. – Л. : Изд-во ЛГУ, 1981. – 463 с.
8. Аузин А. А. Влияние структуры пород на их удельную проводимость / А. А. Аузин // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология. – 1998. – № 5. – С. 195–198.
9. Аузин А. А. Комплексирование методов геофизических исследований в скважинах (на примере Воронежской антеклизы) / А. А. Аузин. – Воронеж : Научная книга, 2010. – 260 с.
10. Аузин А. А. Скважинный индукционный пластовый наклонмер для исследования железорудных месторождений / А. А. Аузин // Геофизическая аппаратура. – Л. : Недра, 1984. – Вып. 79. – С. 95–98.
11. Аузин А. А. Некоторые результаты применения индукционной наклонметрии для определения залегания пород на Ломоносовском месторождении Северного Казахстана / А. А. Аузин // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология. – 1996. – № 2. – С. 187–189.

*Воронежский государственный университет*

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

*E-mail: AAuzin@yandex.ru*

*Тел.: 8 (473) 220-83-85*

*Voronezh State University*

*Auzin A. A., Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor of the Geophysical Department*

*E-mail: AAuzin@yandex.ru*

*Tel.: 8 (473) 220-83-85*