

## ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В СКВАЖИНАХ ПРИ ПОИСКАХ И РАЗВЕДКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ РУДНЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ НА ВОРОНЕЖСКОЙ АНТЕКЛИЗЕ

А. А. Аузин

*Воронежский государственный университет*

*Поступила в редакцию 23 февраля 2013 г.*

**Аннотация.** *Статья посвящена геофизическим исследованиям в скважинах при поисках и разведке месторождений рудных полезных ископаемых, которые характерны для территории Воронежской антеклизы. Рассмотрены возможности геофизических методов и некоторые вопросы методики проведения скважинных исследований.*

**Ключевые слова:** *геофизические исследования в скважинах, месторождения рудных полезных ископаемых, Воронежская антеклиза.*

**Abstract.** *This article is devoted to geophysical borehole investigations by researches of ore deposits which are located on Voronezh anticline. Some questions of a technique of borehole investigations and researching ability of geophysical methods are considered.*

**Key words:** *geophysical borehole investigations, ore deposits, Voronezh anticline*

Сокращение площадей относительно легкодоступных для обнаружения и опробования в их пределах месторождений рудных полезных ископаемых обусловило необходимость ориентации геологоразведочных работ на выявление достаточно глубокозалегающих рудных объектов, в том числе и в пределах закрытых территорий, где потенциально рудоносные породы кристаллического фундамента погребены под образованиями осадочного чехла. При значительной мощности осадочных пород и характерной для них вертикальной и латеральной вещественной и физической неоднородности резко снижается эффективность изучения нижележащих продуктивных образований наземными геофизическими методами. В подобных условиях ведущая роль в выявлении и информационном обеспечении геометризации рудных объектов принадлежит геофизическим исследованиям в скважинах.

В пределах Воронежской антеклизы находится ряд эффективно действующих горнодобывающих предприятий, среди которых ведущее место занимают предприятия по добыче и переработке железорудного сырья. Открыты достаточно крупные месторождения бокситов, фосфоритов, апатит-магнетитовых, титан-циркониевых и медно-никелевых руд. Имеются серьезные предпосылки прогнозировать наличие месторождений и других

видов полезных ископаемых, в числе которых – золото, элементы платиновой группы и алмазы.

Для закрытых территорий, и Воронежская антеклиза являет тому характерный пример, типична локализация наиболее промышленно значимого оруденения в породах кристаллического фундамента. Исключение обычно составляют россыпные месторождения и месторождения, связанные с древними корами выветривания. Для Воронежской антеклизы это – фосфориты и титано-ильменитовые россыпи. С погребенными корами выветривания железисто-кремнистых пород докембрия КМА связаны месторождения богатых железных руд и бокситов, которые плащеобразно залегают на отложениях кристаллического фундамента.

Относительная маломощность осадочного чехла, перекрывающего рудоносные породы кристаллического фундамента, делает локализованные в нем полезные ископаемые перспективными для промышленного освоения.

Основные проблемы, касающиеся геофизических исследований в скважинах при поисково-разведочных работах на месторождениях никеля Воронежской антеклизы, достаточно подробно были освещены в относительно недавно опубликованных работах [1–3] и в данной статье не рассматриваются.

Рассмотрение возможностей ГИС применительно к конкретным типам полезных ископаемых, целесообразно предварить некоторыми замечаниями общего характера, касающимися метрологического обеспечения ГИС, соотношения геофизи-

ческих и лабораторных методов исследования вещественного состава геологических сред, а также вопросов оптимального представления геолого-геофизической информации с целью ее последующего анализа. При этом проблемы метрологии и соотношения различных методов изучения вещества будут рассмотрены, прежде всего, применительно к решению такой важной задачи, как геофизическое опробование полезных ископаемых в их естественном залегании (*in situ*).

Следует отметить, что опробование полезных ископаемых, основанное на химических или иных анализах керна, является весьма трудоемким и дорогостоящим мероприятием. Кроме того, неполный выход керна и его избирательное истирание приводят к тому, что качество подобного опробования далеко не всегда соответствует предъявляемым требованиям. Привлечение геофизических методов исследований в скважинах, способных обеспечить непрерывное диагностирование вскрытых скважинами геологических разрезов, позволяет сделать опробование более оперативным и качественным, а также менее дорогостоящим.

При геофизическом опробовании переход от результатов скважинных измерений к определяемым параметрам горных пород (плотности, водородосодержанию, минеральному составу и пр.) 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 с известными свойствами. 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 применяемой аппаратуры является периодическое проведение исследований в контрольно-градуировочной скважине (КГС). Обычно КГС выбирается из числа скважин уже выполнивших свое геологическое назначение. Если в этой роли выступает скважина, ранее использовавшаяся для построения градуиро-

вочной зависимости, то облегчается периодический контроль стабильности градуировочной зависимости эксплуатируемой аппаратуры и построение таковой для аппаратуры, вновь вводимой в эксплуатацию.

Кроме контрольно-градуировочных скважин для стандартизации результатов исследований и контроля стабильности работы аппаратуры, могут использоваться контрольно-градуировочные устройства (КГУ), представляющие собой физические модели среды, пересекаемой скважиной [5]. Обычно эти модели изготавливаются в виде цилиндров со сквозным отверстием, в которое помещается зондовая часть скважинного прибора. Материал цилиндров имеет различные значения изучаемого параметра. В соответствии с величиной сигнала, регистрируемого каротажной аппаратурой, зондовая часть которой помещена в КГУ, по градуировочной зависимости определяют условное значение исследуемого параметра, отвечающее КГУ.

В информационном обеспечении опробования 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 можно 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 керна, приводящего к его искусственному обогащению некоторыми компонентами или, наоборот, к разубоживанию в отношении каких-то компонентов;
- неточности в определении места фактического отбора керна, обусловленные его неполным выходом;
- 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 кернового материала, однако нередки примеры и обратного соотношения, наиболее характерного для рентгенорадиометрического каротажа (РПК), который часто применяется при геофизическом опробовании;

– изменение физических свойств и вещественного состава пород в процессе их вскрытия бурением. В результате бурения в породах возникает искусственная трещиноватость, они глинизируются (в том числе имеет место залечивание глинистым материалом трещин и каверн, имевших место в естественном залегании), поровое пространство насыщается буровым раствором, возможен принос металлических частиц с буровой коронки и пр. Характерно, что эти эффекты могут наблюдаться как у керна, так и в прискважинной части разреза.

Кроме того, следует иметь в виду, что показания ядерно-геофизических методов, наиболее часто применяемых при опробовании, не зависят от минеральных форм или химических соединений, в которых определяемые элементы находятся, поэтому они дают общее (валовое) содержание элементов в породе. Таким образом, при интерпретации материалов ядерно-геофизических исследований, следует принимать в расчет то обстоятельство, что определяемый элемент может находиться не только в составе одного определенного минерала, но и в иных формах [5].

### Руды железа

В пределах Воронежской антеклизы руды железа, имеющие промышленное значение, представлены двумя типами – железистыми кварцитами и, генетически связанными с ними, остаточными богатыми железными рудами, имеющими преимущественно маргитовый состав.

Месторождения *железистых кварцитов* концентрируют в себе большую часть запасов железных руд и в настоящее время являются основой сырьевой базы металлургической промышленности страны. Содержание железа в рудах достигает 35–40 %, и, при существенно магнетитовом составе, они легко обогащаются магнитным способом.

На месторождениях железистых кварцитов геофизические исследования в скважинах проводятся с целью решения следующих основных задач:

- расчленение и корреляция разрезов (в пределах рудной толщи и по вмещающим породам);
- выделение в разрезах пластов железистых кварцитов и определение содержания в них железа, как магнетитового, так и общего;
- уточнение пространственного положения известных и выявление новых рудных тел в околоскважинном пространстве.

Расчленение разрезов осуществляется с помощью КС и ГК в их осадочной части и с привлечением результатов КМВ по продуктивным интервалам. Межскважинная корреляция разрезов проводится на основе материалов исследований теми же методами.

Для геометризации железорудных тел, как подсеченных скважинами, так и слепых, используются данные скважинной магниторазведки.

Среди важнейших в прикладном отношении вопросов, решение которых может быть реализовано геофизическими методами, следует отметить повышение достоверности структурно-геологических построений. Как было показано в работе [1], применение скважинной пластовой индукционной наклонотрии по магнитной восприимчивости позволяет получить надежную информацию, характеризующую геологическое строение месторождений железистых кварцитов.

Поскольку в железистых кварцитах КМА железо сконцентрировано преимущественно в обладающем аномально высокой магнитной восприимчивостью магнетите, то геофизическое опробование руд выполняется по данным каротажа магнитной восприимчивости (КМВ).

Как показали многочисленные исследования, универсального выражения, описывающего зависимость между магнитной восприимчивостью пород и руд и содержанием в них магнетита, не существует. Кроме того, что характер этой зависимости определяется магнитными свойствами самого магнетита, большую роль играют текстурно-структурные особенности руд, а также иные факторы. Вместе с тем, практическое применение КМВ свидетельствует, что в пределах одного месторождения или отдельных его участков наблюдается тесная корреляционная связь между содержанием железа магнетитового в рудах и их магнитной восприимчивостью.

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).

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, то есть 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 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 [5], 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...”. Следует обратить внимание, что наличие подобных интервалов увязывается исключительно с присутствием в рудах сульфидов, а роль собственно магнетита игнорируется, что представляется совершенно неверным. Кроме того, уместно предположить, что выполаживание зависимости  $Fe_M = f(\chi)$  в области высоких значений  $\chi$  связано именно с увеличением проводимости железистых кварцитов по мере роста содержания в них магнетита.

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  $\mu_{эф} = (\mu_\tau \mu_n)^S$  до  $\mu_{эф} = \mu_\tau$ , где  $\mu_\tau$  и  $\mu_n$  – магнитные проницаемости соответственно вдоль и вкрест слоистости. При больших значениях магнитной анизотропии  $\lambda = \mu_\tau / \mu_n$ , часто достигающих 2-3 и даже более единиц, что весьма характерно для КМА, этим крайним случаем будут отвечать существенно различающиеся между собой значения  $\mu_{эф}$  [6]. В данном контексте следует 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.

В большинстве случаев для железистых кварцитов характерна однозначная связь содержания железа с эффективным атомным номером ( $Z_{эф}$ ) и плотностью руд [6]. Поэтому для определения границ промышленного оруденения и подсчета запасов применяются ГГК-С и ГГК-П. Кроме того, достаточно часто на магнетитовых месторождениях наблюдается тесная связь между содержанием в них магнетитового и общего железа, что позволяет определять концентрацию последнего, привлекая данные КМВ.

Возобновление практического интереса к рыхлым *остаточным богатым рудам железа* КМА произошло не только в связи с высоким содержанием в них железа, достигающим 60–70 %, но и из-за возможности их разработки по методике скважинной гидродобычи (СГД). СГД предполагает гидромониторную дезинтеграцию полезного ископаемого и его извлечение на поверхность из откатных скважин в составе пульпы. Подобная методика не только выгодна с экономической точки зрения, но и весьма экологична.

Опробование *остаточных мармитовых руд* геофизическими методами является весьма сложной задачей, поскольку их магнитная восприимчивость не является характерным параметром, что не позволяет использовать для этих целей КМВ, а отличающая руды повышенная пористость, приводящая к несвязанным с содержанием железа, закономерным изменениям плотности, осложняет применение ГГК, как в плотностной, так и в селективной модификациях. В подобных случаях ни ГГК-П, ни ГГК-С, реализуемые стандартными заинверсионными зондами, оказываются неприменимы не только для количественных определений, но и для качественного выделения интервалов разреза, сложенных мармитовыми рудами. Устранение или, как минимум, существенное ослабление негативного влияния закономерных изменений плотности на результаты ГГК-С возможно применением зондов, работающих в области инверсии, где их показания практически не зависят от плотности. Положительный опыт проведения подобного рода работ имеется на железорудных месторождениях Кривого Рога [6].

Благодаря достаточно высокому сечению захвата тепловых нейтронов атомами железа и существенному различию спектров радиационного захвата железа и основных нерудных компонентов, железорудные месторождения являются весьма благоприятным объектом для исследования методом спектрометрического нейтронного гамма-каротажа (НГК-С). При этом применяется способ спектральных отношений, основанный на изучении отношения вторичных гамма-излучений в двух энергетических диапазонах, один из которых определяется излучением радиационного захвата железа ( $\Delta E_{\gamma} > 6,2$  МэВ), а другой, играющий роль стандарта-фона, соответствует кремнию ( $\Delta E_{\gamma} = 3-4$  МэВ).

### Руды марганца

В пределах стран бывшего СССР промышленные месторождения марганца представляют собой субгоризонтальные залежи с практически одинаковым строением продуктивной части разреза, нижняя зона которого сложена окисленными рудами, содержащими четырехвалентный марганец в составе псиломелана и пиролюзита, а верхняя представлена карбонатными рудами с двухвалентным марганцем, входящим в состав манганина и манганокальцита. Причем, как правило, эти зоны разделены прослоем глауконитовых песков.

С того момента как Никопольское и Чиатурское месторождения марганца изменили свою государс-

твенную принадлежность, принципиального решения проблемы обеспечения металлургических предприятий России марганцевым сырьем до сих пор не найдено.

На территории Воронежской антеклизы в породах осадочного чехла установлены многочисленные проявления марганцевых руд. В частности, в пределах ВКМ выделяются несколько потенциально марганцевоносных зон, в числе которых: Малиновско-Шляховская (Белгородская обл.), Тимская (Курская обл.), Павловско-Богучарская и Новохоперская (Воронежская обл.).

Материалы геолого-геофизических исследований свидетельствуют о возможности присутствия в отложениях девона Воронежской антеклизы залежей окисных и карбонатных марганцевых руд никопольского типа. Характерным примером является Павловско-Богучарская, зона, установленная на юго-востоке Воронежской области, отложения которой представлены песчаниково-алевролитово-аргиллитовыми породами с прослоями известняков мосоловской, ардаатовской и ястребовской свит, которые накапливались в гумидных условиях в пределах внешней части шельфа нижне-среднедевонского палеобассейна. В этом бассейне в ардаатовское время мог существовать фациальный рудный профиль, аналогичный Никопольскому месторождению: окисные – окисно-карбонатные – карбонатные марганцевые руды. Подтверждением этому являются аномально высокие содержания марганца, установленные в пределах Сергеевского участка этой зоны, которые с определенной долей условности могут быть связаны с первыми двумя из перечисленных выше составляющих рудного профиля.

Для месторождений марганца, в целом, характерна достаточно четкая дифференциация разрезов по удельной электрической проводимости: превышение проводимости руд над проводимостью вмещающих пород достигает 5–25 раз у рыхлых руд и 2 раз у плотных их разновидностей. Кроме того, марганцевоносные отложения отличаются повышенной естественной и вызванной электрические поляризуемости и магнитная восприимчивость [9].

Многочисленные измерения магнитной восприимчивости пород и руд месторождений марганца свидетельствуют, что в большинстве случаев их магнитные свойства существенно отличаются (рис. 1). Кроме того, наблюдаются различия в магнитной восприимчивости руд марганца различного состава. В частности карбонатные руды Никопольского месторождения имеют магнитную вос-

приемчивость в 2–3 раза большую, чем окисные (В.П. Кальварская, Г.К. Зорин, 1967).

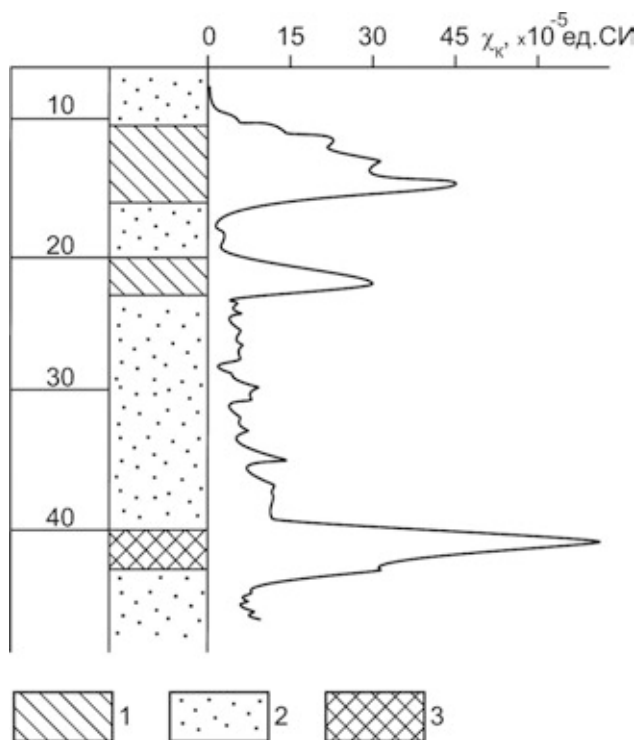


Рис. 1. Кривая КМВ на Никопольском марганцевом месторождении (по В.П. Кальварской и др.).

1 – суглинки, обогащенные окислами железа; 2 – пески; 3 – руда марганцевая окисная

Таким образом, для выделения в разрезах марганцевых руд и их межскважинной корреляции могут применяться КС, ПС, ГК, каротаж ВП и КМВ. Для изучения околоскважинного пространства, определенные перспективы сулит применение высокоточной скважинной магниторазведки (СМ) и скважинных вариантов методов ЕП и ВП (ЕП-С и ВП-С).

Опробование руд марганца может быть осуществлено способом спектральных отношений методом НГК-С. Измерения должны осуществляться в двух энергетических диапазонах:  $\Delta E_1 = 6,0-7,4$  МэВ, где преобладающим является захватное гамма-излучение марганца и подчиненным – железа, и  $\Delta E_2 > 7,4$  МэВ, где регистрируется практически только излучение, обусловленное радиационным захватом железа.

Благодаря аномально высокому сечению активации тепловыми нейтронами изотопа марганца  $^{55}\text{Mn}$ , весьма эффективен как для выделения рудных интервалов, так и для их опробования, нейтронно-активационный каротаж (НАК). При проведении исследований в непрерывном режиме, регистрируется интегральное гамма-излучение (порог диск-

риминации  $E_\gamma > 0,3$  МэВ), возникающее в результате распада радиоактивного изотопа  $^{56}\text{Mn}$ , образующегося по реакции  $^{55}\text{Mn}(n,\gamma)^{56}\text{Mn}$ . При интерпретации материалов, необходимо, привлекая данные ГК, учитывать фон естественного гамма-излучения. Из-за низкой производительности, НАК-Мп с целью опробования обычно проводят только в пределах предварительно выделенных тем или иным методом каротажа рудных интервалов.

### Руды титана

В различных частях территории Воронежской антеклизы известны песчаные отложения, содержащие промышленные концентрации титан-циркониевых минералов [7], т.н. “титан-циркониевые россыпи”. Наиболее крупными из них являются Центральное и Кирсановское россыпные месторождения, расположенные в относительной близости друг от друга в Тамбовской области, и, находящееся в Брянской области, Унечское месторождение, представляющее собой титан-циркониевую фосфатосную россыпь.

Для литологического расчленения и корреляции разрезов подобных россыпных месторождений обычно применяются стандартный комплекс методов – КС, ПС и ГК. Поскольку для циркона характерно изоморфное замещение содержащегося в нем циркония ураном, то ГК в этом комплексе играет ведущую роль.

Высокое макроскопическое сечение захвата тепловых нейтронов титана позволяет использовать НГК-С для определения его содержания в рудах. Для этого регистрируют отношение ГИРЗ в энергетических интервалах 3–4,6 МэВ ( $I_{\text{ny}}^{3-4,6 \text{ МэВ}}$ ) и 5–6,6 МэВ ( $I_{\text{ny}}^{5-6,6 \text{ МэВ}}$ ) и по его значениям выделяют руды и определяют содержание в них титана [10]. Опробование на содержание в рудах титана методом НГК-С обеспечивает нижний предел обнаружения на уровне 0,5–1 % [197]. При этом зависимость между содержанием титана в руде и отношением интенсивностей  $I_{\text{ny}}$  в указанных энергетических интервалах линейна вплоть до 25 %.

### Руды алюминия

Бокситы на КМА были выявлены в процессе разведки богатых железных руд еще в 1955 г.

В погребенных корах выветривания локализованы залежи латеритных бокситов Висловское месторождение Белгородской области. Кроме Висловского выявлены и оценены Олимпийское, Ольховатское и Мелихово-Шебекинское месторождения высококачественных бокситов.

Бокситы пространственно и генетически связаны с богатыми железными рудами. Приподнятость над окружающим палеорельефом полос железистых кварцитов способствовала сохранности бокситов от размыва.

Бокситы представляют собой каменные, преимущественно полускальные, хрупкие, пористые (средняя пористость 32 %) образования со средней влажностью до 10 %.

В разрезах большинства бокситовых залежей отмечается закономерность в пространственном распределении литологических типов бокситов: в нижней части располагаются псевдобобовые бокситы, выше по разрезу в центральной части залежи – наиболее качественные макропористые бокситы и в кровле – псевдобобовые плотные и псевдообломочные бокситы.

Содержание  $Al_2O_3$  в белгородских бокситах изменяется от 28 до 77,8 %. В бокситах присутствуют минералы с двухвалентным железом – шамозит и сидерит, а также широкий комплекс редких и малых элементов содержаниями от долей процента до аномальных значений – галлий, ванадий, бор, литий, скандий.

По своим физическим свойствам на фоне вмещающих пород бокситы весьма мало контрастны: для Белгородского района их магнитная восприимчивость составляет около  $130 \times 10^{-5}$  ед. СИ на фоне  $40 \times 10^{-5}$  ед. СИ у вмещающих их сланцев; по плотности и скорости упругих волн ( $2,25 \text{ г/см}^3$  и  $3600 \text{ м/с}$ ) бокситы близки к перекрывающим их глинистым известнякам карбона –  $2,45 \text{ г/см}^3$  и  $3900 \text{ м/с}$  соответственно. Проводимость бокситов соответствует проводимости коры выветривания кристаллических пород фундамента.

Для определения содержания алюминия в рудных интервалах весьма эффективен нейтронно-активационный каротаж (НАК). При этом измеряется наведенная гамма-активность изотопа  $^{28}Al$  ( $T_s = 2,3$  мин), образующегося по реакции  $^{27}Al(n,\gamma)^{28}Al$ . Необходимо иметь в виду, что этот же изотоп образуется и по реакции  $^{28}Si(n,p)^{28}Al$ . Для раздельного определения  $Al_2O_3$  и  $SiO_2$  НАК проводят поочередно с двумя источниками – плутоний-бериллиевым или полоний-бериллиевым и калифорниевым ( $^{252}Cf$ ). Обладающие высокой энергией нейтроны первого источника инициируют обе ядерные реакции, а, имеющие меньшую энергию, нейтроны  $^{252}Cf$ , активируют преимущественно ядра алюминия. Анализ полученных по способу “двух источников” данных, позволяет выполнить раздельное определение содержаний Al и Si. Пределы

обнаружения Al и Si при непрерывном каротаже составляют 0,2–0,5 % по  $Al_2O_3$  и 4–6 % по  $SiO_2$  [6]. Если на конкретном месторождении имеется возможность ограничиться определением содержания лишь глинозема ( $Al_2O_3$ ), а такое становится возможным, если содержания  $SiO_2$  не превышают 10–15 %, то целесообразно проведение НАК только с одним источником –  $^{252}Cf$ . Перед выполнением количественной интерпретации из результатов НАК необходимо вычесть фон естественного гамма-излучения.

Рациональный комплекс ГИС на бокситы в Белгородском рудном районе КМА включает в себя ГК, КС, ПС, кавернометрию, инклинометрию, термометрию и скважинную магниторазведку (В.И. Петренко и др., 1989). Аномальные по ГК интервалы детализируются в масштабе глубин 1:50 (рис. 2). В пределах продуктивной толщи применяется НАК на  $^{28}Al$  и ННК по тепловым нейтронам. Кроме того, для изучения строения рудной толщи и выделения среди бокситов отдельных разновидностей, могут применяться ГК-С (для бокситов характерны аномально повышенные значения отношения  $Th/K$ ), ГГК-П и КМВ. Скважинная магниторазведка имеет целью определение распространения в окоскважинном пространстве магнетитсодержащих пород и руд, с которыми генетически связаны залежи бокситов.

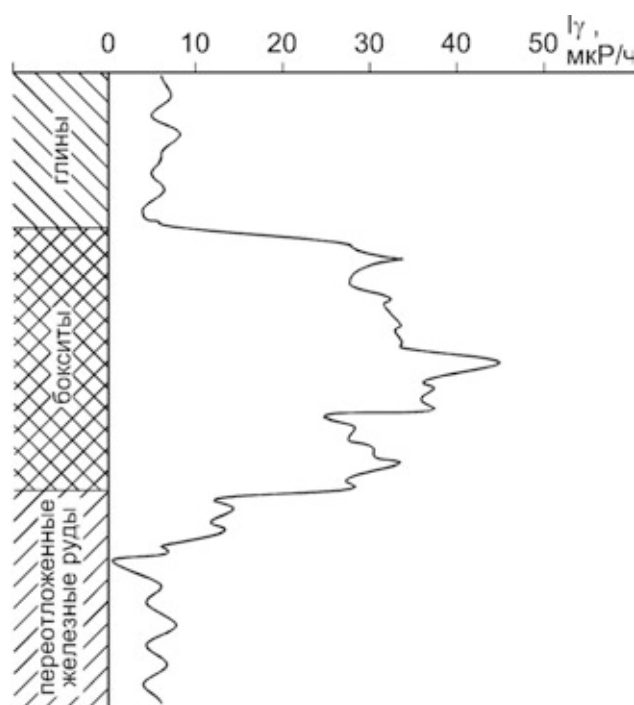


Рис. 2. Выделение бокситов по данным ГК на одном из участков Белгородского рудного района КМА (В.Н. Бойдаченко и др., 1970)

## Фосфаты

В пределах Воронежской антеклизы месторождения фосфатов представлены двумя основными типами – фосфоритами и магнетит-апатитовыми рудами.

### Фосфориты

На территории Воронежской антеклизы открыто значительное количество разномасштабных месторождений, в основном желваковых фосфоритов [8]. Среди наиболее крупных следует упомянуть, расположенные в Брянской области, Полпинское и Унечское месторождения (первое из которых разрабатывается уже многие десятилетия), а также, находящуюся в Курской области и весьма значительную по запасам Щигровскую группу месторождений.

Для фосфоритов большинства известных месторождений характерны повышенные значения естественной радиоактивности, связанные с высоким содержанием в них урана. Радиоактивность фосфоритов достигает 16–25 мкР/ч и более на фоне относительно слаборадиоактивных вмещающих осадочных пород. При этом на ряде месторождений установлена линейная связь между содержанием  $P_2O_5$  и гамма-активностью руд с коэффициентом корреляции 0,8 и более, что обеспечивает определение концентраций двуокси фосфора с помощью радиометрии с точностью 5–8 %.

В целом для фосфоритов характерны повышенные содержания U(Ra), нижекларковые концентрации Th и аномальные ( $>1$ ) отношения U/Th. Преимущественно урановая природа гамма-активности фосфоритов, на фоне ее ториевой и калиевой природы у вмещающих глинистых образований, обуславливает высокую информативность гамма-спектрометрии.

Присутствие глинистого материала в фосфатоносных породах повышает их естественную радиоактивность вне зависимости от содержания  $P_2O_5$ . Высокоточный картаж магнитной восприимчивости (ВКМВ) может использоваться в качестве метода глинистости, поэтому совместная интерпретация данных ГК и ВКМВ позволяет разделить влияние глин и фосфатов на естественную радиоактивность продуктивных отложений и повысить точность определения содержания  $P_2O_5$  у фосфоритов с глинистым цементом по материалам ГК.

Достаточно четкая корреляционная связь между  $P_2O_5$  и  $F_2$  (на некоторых месторождениях коэффициент корреляции достигает 0,98) позволяет для определения содержания фосфора в рудах реализовать НАК по реакции  $^{19}F(n,\alpha)^{16}N$ .

Для желваковых фосфоритов характерны повышенные, относительно вмещающих пород, плотность и удельное электрическое сопротивление.

Для литологического расчленения и корреляции фосфатоносных разрезов обычно применяются стандартный комплекс методов – КС, ПС и ГК. При опробовании фосфоритов ведущая роль принадлежит ГК-С и НАК.

### Апатит

На Дубравинском участке КМА открыты магнетит-апатитовые руды карбонатитового типа [4]. Для месторождений такого типа характерны высокие и резко изменяющиеся значения магнитной восприимчивости, которые, при интенсивной магнетитовой минерализации, достигают 0,3–0,4 ед. СИ, повышенная гамма-активность руд, преимущественно уран-ториевой природы, пониженные, до первых сотен ом-метров, особенно на фоне высокоомных карбонатитов, удельные электрические сопротивления апатит-магнетитовых руд.

Дифференциация физических свойств магнетит-апатитовых руд и вмещающих их пород позволяет использовать для литологического расчленения разрезов, данные КС, ПС, ГК и КМВ, а для опробования околоскважинного пространства применять скважинную магниторазведку и МЭК.

При опробовании руд ведущую роль играют ГК-С и НАК на фтор.

## Заключение

Представленные материалы позволяют утверждать, что геофизические исследования в скважинах обладают высокой геологической информативностью при поисках и разведке месторождений рудных полезных ископаемых, характерных для территории Воронежской антеклизы. При опробовании большинства видов полезных ископаемых, наибольшую потенциальную эффективность имеют спектрометрические методы ядерной геофизики.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аузин А. А. Комплексирование методов геофизических исследований в скважинах (на примере Воронежской антеклизы) / А. А. Аузин. – Воронеж : Научная книга, 2010. – 260 с.
2. Аузин А. А. О геологической результативности геофизических исследований в скважинах при поисках и разведке месторождений никеля на Воронежском кристаллическом массиве (часть первая – методы каротажа) / А. А. Аузин // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Серия: Геология. – 2008. – № 1. – С. 127–133.
3. Аузин А. А. О геологической результативности геофизических исследований в скважинах при поисках



и разведке месторождений никеля на Воронежском кристаллическом массиве (часть 2 – методы скважинной геофизики) / А. А. Аузин // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Серия : Геология. – 2008. – № 2. – С. 143–156.

4. Бочаров В. Л. Апатитоносные карбонатиты КМА / В. Л. Бочаров, С. М. Фролов. – Воронеж : Изд-во Воронеж. ун-та, 1994. – 123 с.

5. Инструкция по проведению геофизических исследований рудных скважин / под ред. Е. П. Лемана, А. П. Савицкого. – СПб. : ВИРГ-Рудгеофизика, 2000. – 414 с.

6. Мейер В. А. Геофизические исследования скважин / В. А. Мейер. – Л. : Изд-во ЛГУ, 1981. – 463 с.

7. Савко А. Д. Титан-циркониевые россыпи Центрально-Черноземного района / А. Д. Савко [и др.]. – Воронеж : Изд-во Воронеж. ун-та, 1995. – 148 с.

8. Савко А. Д. Фосфориты Центрально-Черноземного района / А. Д. Савко, В. И. Беляев, С. В. Мануковский. – Воронеж : Изд-во Воронеж. ун-та, 1994. – 184 с.

9. Скважинная и шахтная рудная геофизика : справочник геофизика : в 2 кн. / под ред. В. В. Бродового. – М. : Недра, 1988. Кн. 1. – 320 с. ; Кн. 2. – 440 с.

10. Скважинная ядерная геофизика : справочник геофизика / под ред. В. М. Запорожца. – М. : Недра, 1978. – 247 с.

*Воронежский государственный университет*

*А. А. Аузин, кандидат технических наук, доцент  
кафедры геофизики геологического факультета  
Тел. 8 (473) 220-83-85*

*AAuzin@yandex.ru*

*Voronezh State University*

*A. A. Auzin, the Candidate of Technical Science, docent  
of the Geophysical department of Geological faculty  
Tel. 8(473)-220-83-85*

*AAuzin@yandex.ru*