

Опробование и технологическое картирование железорудных месторождений геофизическими методами

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

Экономическая эффективность горнодобывающих предприятий определяется полнотой извлечения запасов из недр, совершенствования технических схем рудоподготовки и обогащения минерального сырья.

Критерии оценки эффективности тех или иных технологических и организационных решений, влияющих на качество добытой руды, должны быть интегральные, объективно учитывающие интересы совокупности производств, участвующих в создании конечной продукции или промпродукта. Главными показателями качества руды, подлежащими извлечению при добыче, должны быть не только средние значения содержания железа за отчетные сроки, но и текущие, а также показатели стабильности состава добытой руды.

Методика геофизического опробования основана на изучении минералогических типов руд и зависимости магнитных, плотностных характеристик от содержания железа.

На железорудных месторождениях Тургайского прогиба: Соколовское, Сарбайское, Качарское, Куржункульское (магнетитовые руды), Лисаковское (оолитовые руды) для экспрессного определения общего железа (Fe^0) и железа связанного с магнетитом Fe_e^M используются геофизические исследования взрывных скважинах. По результатам измерений строятся планы качества руд во взрывом блоке горизонта или Соколовского подземного рудника, которые используются для определения среднего содержания железа.

Текущие же показатели качества на Качарском руднике определяют исходя из результатов опробования рудной массы в автосамосвалах с помощью рудоконтрольной станции (РКС). Следует отметить, что первые работы в этом направлении были сделаны на Костамукшском ГОКе (Максимович Л.З.), а затем, на основании их опыта, на Качарском ГОКе (Портнов В.С., 1989 г.). Использование РКС создает условия для формирования рудной массы с определенным качеством для ее отгрузки на обогатительную фабрику. В целях обеспечения эффективного обогащения руд различных типов возникла необходимость их выделения при опробовании геофизическими методами, с целью обеспечения точности, оценки содержания железа, так и в целях стабилизации показателей обогащения. Для этой цели были поведены исследования по выделению технологических типов руд [1].

Внедрение геофизического опробования на магнетитовых месторождениях Тургая, Южного Урала, Азербайджана свидетельствует о том, что качественные показатели руд стабильность и однородность химического состава должны планироваться, начиная со стадии разведки до

отгрузки рудной массы на обогатительную фабрику. Для этих целей нами были использованы метод магнитной восприимчивости (ММВ), для опробования в разведочных и взрывных скважинах, стенок горных выработок и отбитой рудной массы. Селективный гамма-гамма метод (ГГК-с) использовался для определения содержания общего железа в магнетитовых, гематитовых, окисленных и оолитовых рудах, а метод искусственного подмагничивания (МИП) и дипольное электромагнитное профилирование (ДЭМП) для построения планов качества и технологического картирования рудных блоков по рабочим площадкам карьеров.

Метод искусственного подмагничивания (МИП) позволяет оперативно и с высокой точностью оценивать качество, запасы рудных блоков, определять границы сортности магнетитовых руд и проводить технологическое картирование рабочих площадок карьеров [2]. Результаты среднего содержания железа в рудных блоках оказываются ближе к результатам опробования их в транспортных емкостях, что связано с большим осреднением измеряемого параметра. Метод позволяет сократить объём, эксплуатационной разведки при открытой разработке месторождений магнетитовых руд за счет разрежения сети скважин в неперспективных участках.

При проведении работ МИП необходимо обращать внимание на то, что факторами, снижающими точность и достоверность оценки качества магнетитовых руд, являются, во-первых, зоны их окисленных руд и, во-вторых, - наличие типов руд с различной магнитной восприимчивостью и содержанием немагнитного железа [3-5]. Поэтому перед выполнением работ по составлению погоризонтных планов качеств устанавливаются типы руд, изучается зависимость их магнитной восприимчивости от содержания железа, связанного с магнетитом (Fe^M), а так же от содержания железа общего (Fe^O).

Полевые работы по составлению качественных планов рудных горизонтов были начаты нами в 1985г. на Куржункульском, Кентобинском месторождениях. Некоторые варианты качественных планов показаны на рисунке 1. Планы строились с помощью статистических методов, при этом предполагалось, что измеряемая характеристика среды меняется по статистическому закону, а сеть измерений меньше линейного коэффициента вариации изменения этой характеристики.

На магнетитовых месторождениях Тургайского прогиба было установлено, что изолинии концентраций, полученных МИП, совпадают с границами, определенными по измерениям магнитной восприимчивости во взрывных скважинах (ММВ).

Повышение точности определения содержания железа в рудных блоках еще до бурения скважины достигается анализом особенностей и закономерностей изменения зависимости $\alpha(Fe^M)$, $\alpha(Fe^O)$ для руд различных природных типов и последующем выделением их в технологические типы.

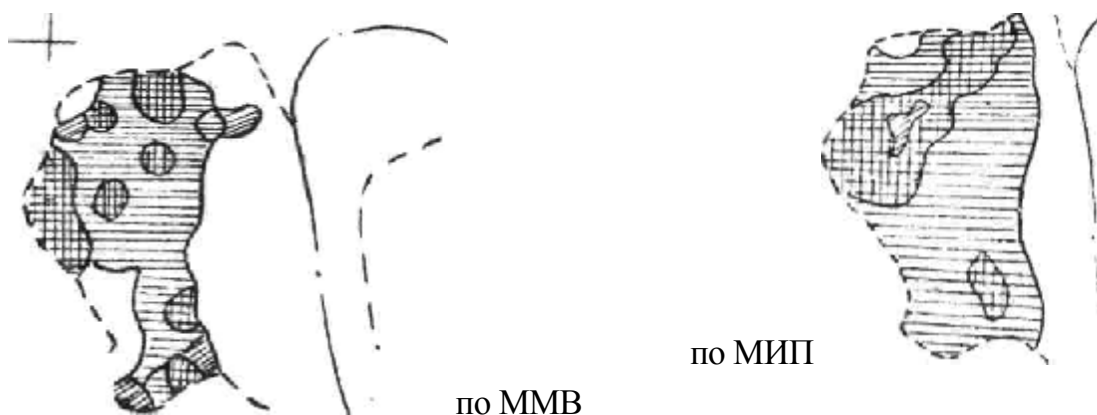


Рисунок 1 - Планы качества руд по данным ММВ и МИП.

Точность определения контуров сортов и технологических типов руд в блоках может быть повышена методикой измерений, или шагом измерений.

Опыт работы на Куржункульском, Качарском, Кентобинском месторождениях показал, что применение МИП дает возможность определить содержание железа с погрешностью ($\pm 1,81\%$) и запасы руды ($\pm 5,7\%$). Аномальное значение вертикальной составляющей магнитного поля, измеренное в центре квадратной рамки, не зависит от (J_n). По результатам измерения МИП по рабочим площадкам горизонтов карьера с шагом 5-10 м строятся планы качества руд с учетом их технологических разновидностей. Удаётся выявить пропущенные детальной разведкой тела (штокверковое Куржункульское месторождение), оценить запасы и границы рудных блоков с учетом технологических свойств руд, уменьшить потери руды в недрах и ее засорение.

Для целей технологического картирования и оценки качественных показателей руд ещё до бурения взрывных и разведочных скважин рудных блоков магнетитовых месторождений, также как и МИП, применяется дипольное электромагнитное профилирование (ДЭМП) и дипольное индуктивное профилирование (ДИП).

Результаты измерений (ДИП) были использованы для расчленения рудной толщи по технологическим свойствам руд и изучения ее морфологии, а в некоторых случаях и для оценки содержания железа. Из теории гармонического магнитного поля, задаваемого генератором, расположенным на поверхности, следует, что напряженность электромагнитного поля зависит от удельной электропроводности, магнитной и диэлектрической проницаемости среды. Использование низкочастотных гармонических полей (0,5 кГц) обеспечивает зависимость вторичного магнитного поля только от индуцированной намагниченности, что позволяет разделять руды по $\mu(\infty)$ и определять Fe^m , Fe^0 . Исследования в НПО «Рудгеофизика», а также проведенные нами работы на Куржункульском, Качарском, Кентобинском месторождениях подтвердили эффективность использования ДИП для этих целей. Однако выполнение работ на рабочих площадках уступов карьеров сдерживается ограниченностью их размеров,

наличием помех от линий электроснабжения, буровых станков, авто- и железных дорог.

Наличие корреляционных связей между содержанием общего железа в магнетитовых, гематитовых рудах и их проводимостями послужило основой использования дипольного электромагнитного профилирования (ДЭМП) на месторождении Кентобе с целью построения планов качества, для магнетитовых и гематитовых разновидностей руд и построения разрезов качества на высоту уступа карьера. При их построении использовалось соотношение сигналов вертикальной (H_z) и горизонтальной (H_R) составляющих. Так, например, при величине разносов 10 м это отношение для пород составляет 2-1,35. (0-20% Fe^0), убогих руд 1,35-1,1 (20-30% Fe^0), бедных - 1,10-0,75 (30-50% Fe^0) и богатых - менее 0,75. Для измерений использовалась аппаратура ДЭМП-С4 при частоте генератора 20-129- кГц и разносы 10 и 20 м. Установлено, что при разноре 10 м средняя квадратическая погрешность определения Fe^0 составляет 5,10% абс, а при разноре 20 м – 5,02% абс. Точность построения границ технологических, сортовых типов определялась по воспроизводимости результатов измерений полученных в разные периоды времени, и составила для разноса 10 и 20 м, соответственно, составила 6,9 и 7,4% отн.

Эффективность обогащения обуславливается подачей руды заданного состава и стабильностью ее качества, что возможно при достоверном и оперативном технологическом картировании геофизическими методами, позволяющими оптимизировать сортность руд, оперативно контролировать их качество по всему технологическому циклу от забоя до обогатительной фабрики. Применение методов геофизики для технологического картирования магнетитовых руд рассмотрим на примере Качарского месторождения [1].

Пироксен-скаполит-магнетитовые руды месторождения имеют наибольшее распространение в карьере и составляют 82,7%. Наибольшим распространением в карьере пользуются тонко - и сплошные мелкозернистые и вкрапленные руды, менее распространены средне-, крупнозернистые руды. Их опробования в буровзрывных скважинах на Fe^0 и Fe_e^M выполняется ММВ с погрешностью $\pm 1,21\%$ абс. Неманитная часть общего железа ($\sim 3,8\%$) в основном связана с силикатными и сульфидными минералами.

Известно, что показатели обогащения руд определяются их минеральным составом, магнитными характеристиками магнетита [5]. Нами установлено, что магнитная восприимчивость промышленных руд колеблется от 1,96 до 7,92 ед.СИ. Наиболее характерные значения факторов Кенигсбергера (Q) находятся в пределах от 0,05 до 0,48 при среднем 0,27. При этом установлена обратная зависимость Q от крупности зерен магнетита в руде, что связано с большей магнитной жесткостью тонкозернистых руд, по сравнению со средне- и крупнозернистыми. Это также характерно для магнетитовых руд Кентобинского, Куржункульского, Соколовского, Сарбайского месторождений. Исследования технологических свойств качарских руд показали, что природными факторами, влияющими на их обогатимость при мокрой

магнитной сепарации, являются: содержание железа в руде, определяющее выход концентрата γ и его извлечение; диаметр зерен магнетита, определяющий содержание железа в концентрате β и хвостах; количество фосфора в прожилково-вкрапленных, средне- и крупнозернистых апатит-магнетитовых рудах, определяющее его содержание в концентрате.

При технологическом картировании на месторождении выделяются руды по содержанию железа и крупности зерен магнетита. Опробование буровзрывных скважин ММВ с использованием зависимости $n(\alpha)=f(Fe^M$ или $Fe^0)$, дает возможность экспрессно с высокой точностью ($\pm 0,52\%$ абс.) оценивать качество руды во взрывном блоке. Определяя фактор Q по образцам на астатическом магнитометре или по измерениям магнитометром МПП-303 напряженности магнитного поля T_u (НМП) над устьем буровзрывной скважины, оценивается выход концентрата с погрешностью $\pm 2,23\%$ абс, содержание в нем железа $0,31\%$ абс. (рисунки 2, 3) [5].

Значение Q по T_u определяется из формулы $Q=T_u(T_0\alpha)^{-1}-1$, где α - магнитная восприимчивость рудной массы, по данным ММВ, пересеченной взрывной скважиной. Фактор Q , как уже отмечалось, не зависит от концентрации ферромагнетика и определяет его состав и крупность зерен (d). Оценки достоверности и погрешности определения γ , β , по установленным зависимостям выполнены по анализам 27 технологических проб из 17 взрывных блоков ($\sim 2,5$ млн. т.). Отмечается увеличение времени измельчения проб для мелкозернистых руд.

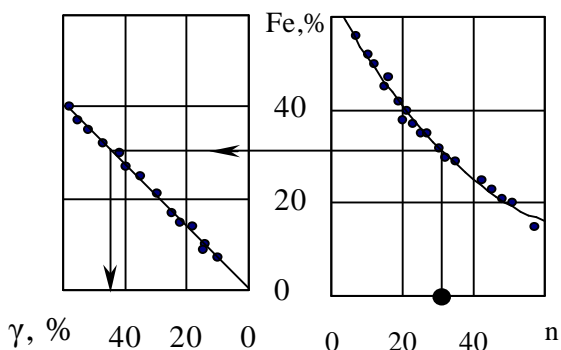


Рисунок 2 – Определение выхода концентрата

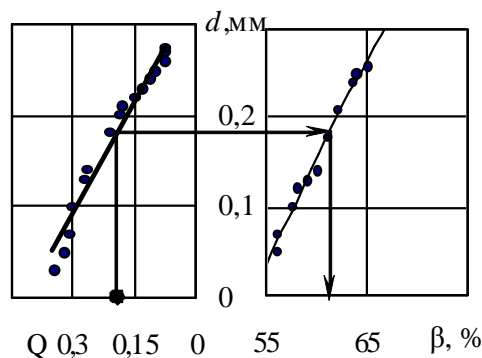


Рисунок 3 – Определение содержания железа в концентрате

Так как измеренное магнитное поле в центре рамки, питающейся низкочастотным током (метод незаземленной петли) зависит от J_i и удельного электрического сопротивления (проводимости), то на планах качества выделялись не только промышленные сорта, но и технологические типы руд, различающиеся по J_n или Q , что важно при планировании показателей извлечения металла.

Достоверность магнитной, геологической моделей месторождения железных руд на этапе разведки определяется: точностью выявления

рудопересечений по скважинам; изученностью их внутреннего строения; определением магнитных свойств руд в естественном залегании и их зависимостью от содержания железа; приема геометризации рудных тел; способами расчета магнитного поля.

По данным ММВ, ГГК-С в скважинах оценивается глубина, мощность пересечения и отдельно качество магнетитовых, окисленных и гаматитовых руд.

Вывод зависимостей содержания железа в рудах от их магнитной восприимчивости, интенсивности рассеянного гамма-излучения осуществляется по интервалам скважин с относительно выдержанными значениями измеряемых величин и выходом керна по рудной зоне более 90 %. Для этих интервалов определяется средне взвешенные значения Fe^0 , Fe^M , d_c . Кроме этого, обращается внимание на сохранение характера кривой ММВ, ГГК-С, в соответствии с содержанием Fe по данным геологического опробования интервалов скважины.

С целью повышения точности определения геофизическими методами содержания железа руды и оруденелые породы разбиваются на структурно-текстурные и минералогические группы, для которых устанавливается отдельные зависимости физических свойств (изменяемых параметров) от содержания Fe^0 , Fe^M . Значимость их различия оценивается по абсолютному систематическому расхождению и условию $t_p < t_T$ где t_p – расчетный, t_T – табличный критерий Стьюдента. При опробовании магнетитовых руд ММВ с датчиками, питаемыми переменным током, важно выделение руд с существенной сульфидной минерализацией, что связывает с влиянием проводимости руд на результаты исследования.

Зависимости $Fe^0(x)$, $Fe^M(x)$ для магнетитовых руд месторождений Казахстана характеризуется высокой степенью тесноты связи (0,93-0,99), со средней квадратической погрешностью определения Fe^M , Fe^0 , находящейся в пределах (1,72-3,27)% абс, при средней 2,18% абс.

Выделение рудных интервалов осуществляется с учетом геологических кондиций: бортовое содержание железа; минимальная мощность рудных интервалов; максимальная мощность пустых пород. В качестве основного критерия, по которому намечаются пробы для построения зависимости ММВ от содержания железа в магнетитовых рудах это выдержанность кривой ММВ в пределах интервала скважины. Минимальная мощность интервала должна соответствовать одиночным рудным или безрудным пропласткам, максимальная - рудным интервалам, выдержанным по амплитуде кривой ММВ. В случае дифференцированной кривой руководствуются следующим: мощность интервала определяется величиной наибольшей максимальной мощности геологической пробы. Для устранения погрешности, обусловленной нелинейностью зависимости x от Fe^0 , установлено, что превышение амплитуды кривой ММВ для пропластков, входящих в одну пробу, должно быть не больше 30%. Возможны перепады между амплитудами и до 40%, но при этом соотношение пропластков, входящих в пробу, по мощности должно

быть не менее 1:3. В этом случае погрешность определения Fe^0 для интервала за счет нелинейности будет меньше 0,5 % абс. Если для интервала не соблюдаются указанные соотношения, то он дробится.

Дальнейший процесс обработки включает определение амплитуды кривой ММВ, введение поправок в измеренные значения за изменение диаметра скважин и градуирование приборов. При выдержанной записи по рудному интервалу амплитуда кривой ММВ определяют как среднее отклонение, а при дифференцированном характере - по площади кривой. При установлении зависимостей используют геологическое описание керна. Увязка глубины контактов по ММВ и бурению скважин осуществляется по причинам, связанным с использованием непромеренных или нестандартных колонковых труб, ошибками в учете рейсов (ходов), сжатия или расширения керна, неправильной его укладкой и прочими ошибками.

После проведения в скважинах ММВ выполняется сопоставление глубин рудных подсечений по ММВ и бурению. За истину принимаются интервалы по ММВ, по которым выполняется разбиение интервалов геологического опробования.

Достоверность геофизического опробования определяется сопоставлением их с геологическим по рудным интервалам с выходом керна более 90% и мощностью сопоставимой с длиной рядовых проб. Во всех классах содержаний Fe определяется систематическое расхождение с геологическим опробованием. В среднем по абсолютной величине погрешность определения в магнетитовых рудах Тургайских месторождений составляет (1,85-2,32)%, Fe^0 и (1,76-2,18)% Fe^M .

Относительное среднее квадратическое расхождение между данными геологического и геофизического опробования по Fe^0 должно удовлетворять требованию:

$$S_{\text{геол-геоф}} \leq \sqrt{2} S_{\text{геол}} \quad (1)$$

Так, для руд Куржункульского месторождения (без их разделения на технологические типы) это соотношение равно $6,14 < 6,25$, а отдельно $3,19 < 7,56$ отн. Отмечено, что в классе руд с содержанием $Fe^0 > 45\%$ абс, это требование не выполнено, что связано с влиянием текстурно-структурных факторов магнетитовых руд и влиянием их проводимости на результаты каротажных работ ММВ. Этот технологический тип выделен в отдельный технологический тип по обогатимости.

Обоснованное разделение руд на текстурно-структурные, минералогические группы по близости закономерности изменения физических характеристик от содержания железа снижает погрешности геофизического опробования, а анализ технологических свойств руд обеспечивает высокую эффективность обогащения.

Для Качарского месторождения зависимости $\alpha(Fe)$ построены для Северного, Южного, Северо-Восточного участков и в целом для месторождения, а также для основных технологических типов руд. В

выборку данных вошли интервалы руд с выходам керна более 90% с выдержанными значениями магнитной восприимчивости пластов мощностью от 3,2 до 78,7м. По ним определялись средневзвешенные значения Fe^0 , Fe^M по рядовому химическому опробованию. Различия между зависимостями для технологических типов руд в пределах участков Качарского месторождения значимы и для них были установлены отдельные зависимости. Наблюдаются различия α руд, при одинаковом содержании в них железа, для Северо-Восточного и Северного, Южного участков. Это различие равносильно изменению содержания Fe^M в 1%. Для Северо-Восточного участка α выше на (6,0-6,5)% отн. во всем диапазоне содержания железа. Это связано с более крупнозернистым магнетитом этого участка.

Установлено, что для Северо-Восточного, Северного, Южного участков, с целью повышения точности опробования ММВ необходимо использовать индивидуальные зависимости, что было подтверждено дальнейшими работами. Использование общей для месторождения зависимости приводит к систематической погрешности 0,95% абс, по Fe^M и 0,45% абс. по Fe^0 , а индивидуальных зависимостей снизило погрешность в два раза (0,20% и 0,19% абс.).

По результатам исследования на Ломоносовском месторождении установлено два технологических типа руд на Северо-Западном и Центральном участках. Среднеквадратическая погрешность определения Fe^0 и Fe^M составляет, соответственно, 2,76% и 2,81% абс, случайные 2,82 и 2,94%.

Руды Ломоносовского месторождения имеют α на (10-20)% выше, чем качарские что обусловлено их большей окисленностью.

Результаты ММВ на месторождениях магнетитовых руд позволяют определить границы рудных тел по изолиниям Fe^0 , выделять зоны окисления руд, тектонические нарушения, и планировать качество и показатели обогащения добываемых руд, использовать эти данные при подсчете запасов руд и для построения магнитных моделей месторождений.

Селективный гамма-гамма-каротаж применяется для выделения рудных интервалов, изучения их строения, определения общего железа. Источником излучения служит Co , используется зонд 2π -геометрии с прижимным устройством. Измеряемой величиной является, относительная к эталону, интенсивность рассеянного средой гамма-излучения (J/J_0).

При выводе зависимости $Fe = f(J/J_0)$ используют аппроксимирующее уравнение $C_{Fe} = aB^{(J/J_0)^2}$.

Сопоставление результатов опробования по ММВ и ГГМ-С дает практически тот же характер распределения случайных и систематических расхождений, что и при сравнении геологического опробования и ГГК-С. Среднеквадратическая погрешность определения Fe^0 на различных месторождениях по ГГМ-С в сравнении с геологическим опробованием колеблется от 1,90 до 2,30% абс, а в сравнении с КМВ от 1,8% до 2,10% абс. Систематические расхождения для всех классов содержания по интервалам

скважин с выходом керна более 70% в обоих случаях не значимы и колеблются от 0,53 до 0,65% абс.

На всех месторождениях железных руд Казахстана требование (1) выполняется для всех классов содержания железа при условии разделения руд на группы, объединенные, по незначимости расхождений определения содержания железа по геофизике. В абсолютных величинах погрешность геофизического опробования составляет не более 2,30% Fe^0 (по ММВ и ГГК-С) и 2,10% - для Fe^M (по ММВ).

Основными мешающими факторами при опробовании руд являются некоррелируемые с содержанием железа изменения плотности, геометрии измерений и присутствие в руде других «тяжелых» элементов.

Для магнетитовых, гематитовых руд изменения плотности в пределах месторождения незначительны. Влияние геометрии измерений снижается, и часто устраняется применением прижимных устройств, двухлучевых зондов 2л - и 4л - геометрии.

Присутствие в железных рудах кальция, содержащегося в гранатах и кальците, заметно снижает точность определения Fe . Опробование этого типа руд необходимо проводить по отдельной зависимости с учетом установленной корреляционной связи между Ca и Fe .

Для устранения влияния изменения влажности (плотности) Лисаковских руд использованы 2л, 4л - двухлучевые накладные и скважинные зонды. Рабочие площадки карьера опробовались с использованием двухлучевого 2л-зонда установленного на салазках с зазором между исследуемой средой и зондом, равным середине зоны инверсии.

По результатам проведенных исследований разработана методика геофизического опробования разведочных скважин методами ММВ и ГГК-С. Достигнутая точность является приемлемой для использования данных при подсчете запасов месторождения.

На Качарском ГОКе внедрена и более 20 лет действует система управления качеством руд на основе геофизического опробования и включающая в себя следующие основные элементы:

- составление погоризонтных планов качества руд ММВ с целью прогнозирования и планирования добычи;
- управление качеством руд в транспортных емкостях с помощью рудоконтрольной станции, с целью стабилизации качества руд на складах ГОКа и контроля качества отгружаемой руды на обогатительную фабрику;

Разработаны и в разные годы внедрены на железорудных месторождениях методики технологического картирования и оценки параметров обогащения магнетитовых руд на основе геофизических исследований методами ММВ, МИП, ДЭМП и НПМ, а также выделения магнитных, слабомагнитных и немагнитных минералогических (технологических) разностей руд методами ММВ, ГГК-С, МИП и ДЭМП.

Список литературы:

1. Портнов В. С., Шwegлер В. А., Есаулков А. В. Оценка показателей обогащения магнетитовых руд геофизическими методами //Известие вузов/ Горный журнал, М., 1990, № 5, С. 137-139.
2. Портнов В. С., Фартучный В. Н., Борисенко Ю. Н. Изучение физических свойств пород и руд месторождения Каражал //Сб. научн. трудов КарПТИ/ Технология разработки месторождений полезных ископаемых, Караганда, 1976, Вып. 4, С. 153-156.
3. Портнов В. С., Пупялис О. В., Тянь Л. Д. Физические характеристики пород и руд Куржункульского месторождения //Сб. научн. трудов КарПТИ/ Повышение эффективности геолого-геофизических исследований месторождений полезных ископаемых, Караганда, 1988, С. 71-73.
4. Портнов В. С., Парафилова Р. У., Загоруйко В. Г. Влияние генетических особенностей железных руд на геофизические параметры опробования //Сб. научн. трудов УНЦ АН СССР/ Петрофизические исследования на Урале, Свердловск, 1987, С. 47-53.
5. Справочник по обогащению руд, М., Недра, 1974, Т. 2, Ч. 2, 450 с.