

В.С.Портнов<sup>1</sup>, С.А.Выжва<sup>2</sup>, Н.В.Рева<sup>2</sup>, В.М.Юров<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Карагандинский государственный технический университет;  
<sup>2</sup>Киевский национальный университет им. Т.Г.Шевченко, Украина;  
<sup>3</sup>Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова  
 (E-mail: exciton@list.ru)

## Использование геофизических данных для оценки флотационных свойств руд и минералов

В работе рассмотрены вопросы определения флотационных свойств руд и минералов в их естественном залегании. В основе предложенных методов лежит связь между поверхностной энергией минерала и возможностью минерала к его обогащению. Получены формулы, связывающие измеряемые величины различными геофизическими методами с поверхностной энергией (поверхностным натяжением) минерала. Полученные соотношения между поверхностным натяжением минералов и измеряемой величиной в том или ином методе геофизического исследования содержат постоянную, которую нужно определять эмпирическим путем, используя корреляционный анализ. Доказано, что достоверность результатов будет возрастать при близости результатов, полученных различными геофизическими методами. Результаты исследований предназначены для наземных и космических методов разведочной геофизики.

*Ключевые слова:* флотация, обогащение, геофизика, поверхностное натяжение, руда, минерал.

### Введение

Любой процесс обогащения полезных ископаемых имеет определенные возможности, обусловленные его спецификой, достаточной разницей в контрастности свойств, заложенных в основу процесса обогащения. Однако немногие из тысяч минералов значительно различаются по физическим свойствам. Поэтому часто трудно или вообще невозможно отделять их друг от друга с помощью физических методов обогащения. Другим фактором, ограничивающим возможности применяемого метода обогащения, является крупность обогащаемого материала. Материал крупностью менее 30...40 мкм обогащается физическими методами с низкой эффективностью, что приводит к потере при обогащении значительной части полезных ископаемых. Появление флотационных методов обогащения позволило резко повысить полноту извлечения таких тонких зерен; флотации часто подвергаются хвосты гравитационных и магнитных процессов обогащения для доизвлечения зерен минерала крупностью меньше 30...40 мкм.

Флотации посвящено большое количество учебников, монографий и статей, из которых мы отметим лишь работы [1–5].

В настоящей работе впервые описываются методы определения флотационных свойств руд и минералов в их естественном залегании геофизическими методами разведки.

### Поверхностное натяжение минералов

В работе [6] мы подробно рассмотрели методы определения поверхностного натяжения твердых тел. В этой работе для интенсивности рентгенолюминесценции диэлектрического материала получено выражение

$$I = \text{const} \cdot \exp\left(-\frac{2\sigma\vartheta}{rRT}\right) \approx \text{const} \cdot \left(1 - \frac{d_1}{r}\right), \quad (1)$$

где  $d_1$  равно

$$d_1 = 2\sigma\vartheta/RT. \quad (2)$$

Уравнения (1) и (2) использовались для разработки метода определения поверхностного натяжения  $\sigma$  твердых тел [6]. Способ применяли для определения поверхностного натяжения  $\sigma$  диэлектрических кристаллов KCl, с примесью ионов таллия в качестве люминесцирующего зонда. Интенсивность рентгенолюминесценции определялась стандартным фотоэлектрическим методом. Размер зерна диэлектрика определялся с помощью металлографического микроскопа типа МИМ-8. Результаты показаны на рисунке.

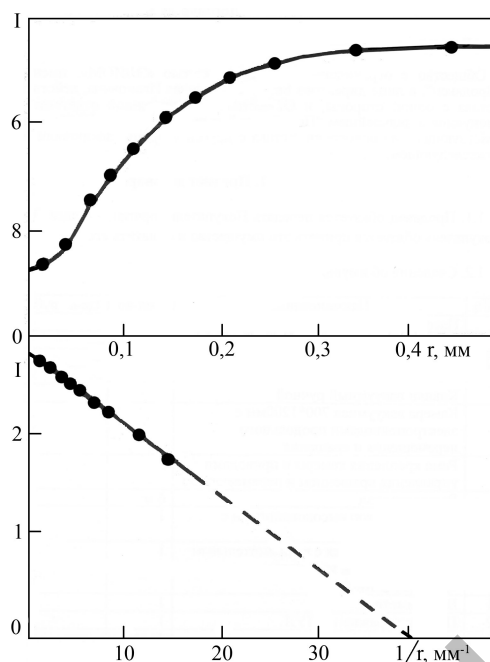


Рисунок. Зависимость интенсивности рентгенолюминесценции КС1–Т1 от размера зерна люминофора

В координатах  $I \sim 1/r$  экспериментальная кривая спрямляется в соответствии с (1), давая значение  $d = 0,02$  мкм. Для КС1  $\vartheta = 37,63$  см<sup>3</sup>/моль и из (2) для поверхностного натяжения получено:  $\sigma = 0,221 \cdot \text{Дж}/\text{м}^2$ .

Этот метод применялся нами для определения поверхностного натяжения минералов. Результаты представлены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

**Поверхностное натяжение некоторых минералов**

Название минерала	Химическая формула	Поверх. натяж. $\sigma$ , Дж/м <sup>2</sup>	$V$ , см <sup>3</sup> /моль	$d$ , нм
Целестин	SrSO <sub>4</sub>	0,178	46,250	6,6
Кварц	SiO <sub>2</sub>	0,406	22,290	7,2
Барит	BaSO <sub>4</sub>	0,172	52,100	7,19
Антимонит	Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	0,416	73,414	24,5
Аурипигмент	As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	0,468	70,520	26,5
Кианит	Al <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> )O	0,323	44,110	11,4
Церруссит	PbCO <sub>3</sub>	0,630	40,600	20,5
Галит	NaCl	0,160	27,018	3,5
Якобсит	MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0,524	46,220	19,4
Альбит	Na(AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	0,354	100,210	28,5
Форстерит	Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	0,359	43,790	12,6
Магнезит	MgCO <sub>3</sub>	0,675	28,020	15,2
Сподумен	LiAl(Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub> )	0,344	58,670	16,2
Пирит	FeS <sub>2</sub>	0,603	23,942	11,5
Флюорит	CaF <sub>2</sub>	0,273	24,540	5,4
Халькопирит	CuFeS <sub>2</sub>	0,690	42,840	23,7
Сфалерит	$\alpha$ -ZnS	0,379	23,834	7,2
Смитсонит	ZnCO <sub>3</sub>	0,643	28,280	14,6
Лейцит	KAlSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	0,336	88,010	23,7
Циркон	ZrSiO <sub>4</sub>	0,426	39,270	13,4

Отличительная черта вещественного состава труднообогатимых руд многих новых и эксплуатируемых месторождений — тонкозернистая структура и сложная текстура, а иногда и субмикроскопи-

ческие формы взаимосвязи слагающих их минералов [7]. Так, например, основной причиной трудной обогатимости руд Жайремского месторождения является весьма тонкая вкрапленность рудных минералов. Доля свинца, представленного зернами галенита размером менее 20 мкм, достигает (15–20) %, иногда доходит до (50–60) %, причем большая часть таких зерен имеет размер 3 мкм, т.е. находится за пределами возможностей флотационного процесса.

В значительном количестве встречаются сферические выделения с чередующимися слоями минералов: например, центральная часть сферы представлена галенитом, следующий слой — сфалеритом, следующий за ним — галенитом и т.д. Толщина каждого монослоя измеряется единицами микрометра. Разделить такие сростки на мономинеральные зерна невозможно даже при сверхтонком помоле. Кроме того, руда характеризуется наличием углисто-глинистого вещества.

Труднообогатимыми являются и другие виды минерального сырья: железистые кварциты, медно-никелевые руды, оловянные продукты и др.

Железистые кварциты характеризуются развитием преимущественно магнетитовых, железно-слюdkово-магнетитовых и магнетито-железно-слюdkовых разновидностей. Основными рудными минералами являются магнетит и железная слюдка (гематит), средний размер магнетита (0,034–0,041) мм, железной слюдки (0,011–0,020) мм, причем наименьший размер рудных зерен соответствует труднообогатимым кварцитам, наибольший — легкообогатимым. Основной породообразующий минерал железистых кварцитов — кварц. В различных минералогических разновидностях наблюдается сложный характер границ зерен магнетита в сростаниях с другими минералами. Преобладание в кварцитах мелких и тонких зерен основного рудного минерала — магнетита — обуславливает необходимость тонкого измельчения кварцитов (до крупности 90–95 % класса — 0,044 мм) для обеспечения высокой степени раскрытия сростков и получения качественных железных концентратов.

Характерной особенностью сульфидных медно-никелевых руд являются тонкая вкрапленность сульфидов, наличие большого количества вторичных минералов и низкая контрастность флотационных свойств пирротина и петландита, что определяет сложность получения концентратов и объясняет потери ценных компонентов с отвальными шлаками, с одновременным повышенным содержанием диоксида серы в отходящих газах. Что касается оловянных руд, следует отметить тесную ассоциацию трудноразделяемых касситерита и арсенопирита, приводящую к сложным технологическим схемам их переработки, включающим необходимые экологические решения по утилизации мышьяксодежащих хвостов обогащения.

Из приведенного анализа и таблицы 1 следует, что минералы, имеющие большое поверхностное натяжение, относятся к классу труднообогатимых.

#### *Магниторазведка*

Основными методами изучения магнитных свойств горных руд магнетитовых месторождений являются магнитометрический и индукционные (см., напр., [8]).

Индукционные методы, к которым относится и метод искусственного подмагничивания (МИП), основаны на измерении отношения величины вторичного поля к первичному, которое зависит от магнитной восприимчивости, глубины залегания пород и их формы. На практике определяется вертикальная составляющая вторичного магнитного поля, создаваемого подмагниченными породами, и устанавливается корреляционная зависимость между содержанием железа в рудах и коэффициентом отображения  $K$ .

В работах [9, 10] для магнитной восприимчивости  $\alpha$  нами получено соотношение

$$\frac{\alpha}{4\pi} = \frac{kT}{C} \frac{\bar{N}}{G^0}, \quad (3)$$

где  $\bar{N}$  — число магнитных диполей, пропорциональное концентрации магнитного компонента в руде;  $C$  — постоянная для данного магнитного метода.

Для тонко вкрапленных минералов, как указывалось выше, основной вклад вносит поверхностная энергия, так что можно положить  $G^0 = \sigma \cdot S$ . Тогда из выражения (3) следует

$$\sigma = C_1 / \alpha. \quad (4)$$

Формула (4) является основой для оценки поверхностного натяжения (а значит, и обогатимости) минералов в естественном залегании магнитными методами разведки. Постоянную  $C_1$  можно определить лабораторным путем.

### Электроразведка

Физическая основа методов электроразведки — зависимость электромагнитного поля от электрических свойств той среды, в которой это поле существует. Таким образом, электромагнитное поле является носителем информации о характере геоэлектрического, а следовательно, и геологического разрезов. В связи с этим любой электроразведочный метод и всю электроразведку в целом можно рассматривать как систему, предназначенную для сбора информации о характере геологического разреза.

Удельное сопротивление горных пород и минералов варьируется, главным образом, за счет изменения проводимости растворов, насыщающих поры, и самого параметра пористости.

Электрические свойства минералов при повышенных температурах определяются их химическим составом и типом кристаллической структуры. Самым большим сопротивлением в широком интервале температур обладают минералы в виде окислов: MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> и CaO.

В работах [10, 11] для удельного сопротивления  $\rho$ , определяемого методами электроразведки, получено соотношение

$$\frac{1}{\rho} = \frac{kT}{C} \frac{e\bar{N}_3}{G^0}, \quad (5)$$

где  $e$  — заряд электрона;  $\bar{N}_3$  — число электрических диполей;  $C$  — постоянная для данного метода электроразведки.

Тогда из выражения (5) следует

$$\sigma = C_2 \cdot \rho. \quad (6)$$

Формула (5) является основой для оценки поверхностного натяжения (а значит, и обогатимости) минералов в естественном залегании электрическими методами разведки. Постоянную  $C_2$  можно определить лабораторным путем.

### Гамма-гамма метод

Гамма-гамма метод изучения состава и плотности пород и руд основан на регистрации рассеянного ими гамма-излучения от внешнего источника. 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 [12].

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

Использование гамма-методов при опробовании железных руд основано 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. Беря в качестве функции отклика  $\Phi$  относительную интенсивность рассеянного гамма-излучения с энергией  $E_\gamma$ , получаем [13]:

$$1 - I / I_0 = -B \frac{C_{\text{Fe}}}{G^0 E_\gamma}, \quad (7)$$

где  $B = (kT)^2 / C$ ,  $C = 2\Delta S / k$  — постоянная для данного элемента и источника гамма-излучения;  $\Delta S$  — изменение энтропии при квантовом переходе из возбужденного состояния в основное, равное  $\Delta S = \bar{N} E_\gamma^2 / 2kT^2$ , где  $\bar{N}$  — среднее число атомов элемента в горной породе или руде.

Тогда из выражения (7) следует

$$\sigma = C_3 / (1 - I / I_0). \quad (8)$$

Формула (8) является основой для оценки поверхностного натяжения (а значит, и обогатимости) минералов в естественном залегании гамма-гамма методом. Постоянную  $C_3$  можно определить лабораторным путем.

### Гравиразведка

Гравитационная разведка является составной частью науки гравиметрии, основанной на изучении поля силы тяжести на поверхности Земли и в околоземном пространстве [14].

В гравиразведке используются относительные измерения силы тяжести. Существует две группы способов относительных измерений силы тяжести: динамические, изучающие движение в поле тяготения, и статические, в которых мерой силы тяжести служит изменение положения равновесия тела, на которое действуют сила тяжести и сила, принятая за эталон.

В настоящее время наиболее широко применяются статические способы, в которых широко используются гравиметры. Из динамических способов наибольшее распространение получил маятниковый способ.

Исходными материалами для выполнения интерпретации гравиразведочных данных являются планы изоаномали — графики  $\Delta g$  по отдельным интерпретационным профилям, геологические разрезы и карты, результаты изучения физических свойств горных пород и др. Процесс интерпретации гравиразведочных данных можно подразделить на три основных этапа: предварительное качественное истолкование, выделение локальных аномалий и количественная интерпретация.

Пусть мы наблюдаем аномалию  $\Delta g$ , обусловленную рудной залежью какого-либо минерала с концентрацией  $C_M$ . В этом случае имеем аналогичное полученным выше соотношение

$$\Delta g = B \frac{\Delta G^0}{C_M}. \quad (9)$$

Тогда из выражения (9) следует

$$\sigma = C_4 \cdot \Delta g. \quad (10)$$

Формула (10) является основой для оценки поверхностного натяжения (а значит, и обогатимости) минералов в естественном залегании методом гравиразведки. Постоянную  $C_4$  можно определить лабораторным путем.

#### Сейморазведка

Сейморазведка основана на изучении распространения в земной коре упругих волн, возбуждаемых искусственным путем [15].

Особенности распространения упругих волн в сложных реальных средах во многом сходны с особенностями и законами распространения волн в абсолютно упругих средах. Процессы возникновения и распространения упругих волн тесно связаны с упругими деформациями горных пород. Скорости распространения продольных  $\vartheta_p$  и поперечных  $\vartheta_s$  волн, в зависимости от упругих свойств и плотности  $\sigma$  среды, определяются соотношениями

$$\vartheta_p = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\sigma(1+\mu)(1-2\mu)}}; \quad (11)$$

$$\vartheta_s = \sqrt{\frac{E}{\sigma} \frac{1}{2(1+\mu)}}, \quad (12)$$

где  $E$  — модуль Юнга;  $\mu$  — коэффициент Пуассона.

Из отношения  $\vartheta_p / \vartheta_s = \sqrt{\frac{2(1-\mu)}{1-2\mu}}$  следует, что продольные волны распространяются быстрее поперечных. Для большинства горных пород  $\mu = 0,2-0,4$ , поэтому  $\vartheta_p / \vartheta_s = 1,6-2,4$ .

Используем аналогию между электрическими и акустическими системами, представленную в таблице 2.

Т а б л и ц а 2

#### Аналогия между электрическими и акустическими переменными и параметрами

Электрическая система		Акустическая система	
Напряжение	$V$	Давление	$P$
Ток	$I$	Скорость частиц	$v$
Заряд	$e$	Смещение	$u$
Индуктивность	$L$	Плотность среды	$\rho$
Емкость	$C$	Акустическая емкость	$C_A=1/\tau$
Сопротивление	$R$	Акустическое сопротивление	$R_A$

Для нас представляет интерес скорость частиц  $v$ , которая и является основой сейсморазведки. Согласно таблице 2 ей соответствует ток  $I$ , который согласно закону Ома пропорционален электропроводности  $\sigma$  и обратно пропорционален удельному сопротивлению.

Тогда получаем

$$\sigma = C_5 \cdot v. \quad (13)$$

Формула (13) является основой для оценки поверхностного натяжения (а значит, и обогатимости) минералов в естественном залегании сейсмическими методами разведки. Постоянную  $C_5$  можно определить лабораторным путем.

#### *Комплексирование геофизических методов*

Комплексирование геофизических методов является одним из ведущих направлений научно-технического прогресса в геологоразведочной отрасли, способствующих повышению эффективности геофизических работ на всех стадиях, при поисках и разведке всех видов полезных ископаемых [16].

Необходимость комплексирования геофизических методов обуславливается двумя основными причинами: неоднозначностью решения обратных задач геофизики по определению природы геофизических аномалий и по оценке количественных параметров искомых объектов; невозможностью с помощью одного геофизического метода получить сведения об основных параметрах изучаемых объектов и вмещающей среды.

Основная цель комплексирования геофизических методов — однозначное решение поставленных геологических задач с освещением основных параметров физико-геологической модели исследуемых объектов и вмещающей среды.

Комплексная интерпретация геолого-геофизических материалов выполняется разными путями: непосредственным сопоставлением независимо полученных результатов различными геофизическими методами; пересчетом параметров одного метода в другой; использованием результатов более точного метода как априорной информации для проверки достоверности структурных построений; установлением корреляционных связей между параметрами различных методов.

Полученные выше связи между поверхностным натяжением минералов и измеряемой величиной в том или ином методе геофизического исследования содержат постоянную, которую нужно определять эмпирическим путем, используя корреляционный анализ. Достоверность полученных результатов будет возрастать при близости полученных результатов различными геофизическими методами.

#### *Заключение*

Определение физических свойств руд и минералов методами скважинной разведки представляет собой дорогостоящее мероприятие из-за большой стоимости бурения скважин. Поэтому в практике геофизических методов поиска и разведки полезных ископаемых все большее распространение получают космические [17] и наземные [18] методы. Полученные в настоящей работе результаты предназначены именно для таких методов разведочной геофизики.

#### *Список литературы*

- 1 Кармазин В.И. Обогащение руд черных металлов. — М.: Недра, 1982. — 215 с.
- 2 Богданов О.С. Теория и технология флотации руд. — М.: Недра, 1990. — 363 с.
- 3 Шубов Л.Я. Флотационные реагенты в процессах обогащения минерального сырья: Справ. — М.: Недра, 1990. Кн. 1 — 400 с; Кн. 2 — 263 с.
- 4 Степанова М.Н. Органические реагенты во флотации. — Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2009. — 53 с.
- 5 Сорокин М.М. Флотационные методы обогащения. Химические основы флотации. — М.: Изд. дом МИСиС, 2010. — 409 с.
- 6 Юров В.М., Портнов В.С., Лауринас В.Ч. и др. Размерные эффекты и физические свойства малых частиц и тонких пленок. — Караганда: Изд-во Казахстано-Российского ун-та, 2013. — 116 с.
- 7 Ростовцев В.И. Научное обоснование и разработка интенсифицирующих энергетических воздействий на твердую и жидкую фазы труднообогатимого минерального сырья: Автореф. д-ра техн. наук. — Чита, 2012. — 36 с.
- 8 Трухин В.И. Введение в магнетизм горных пород. — М.: МГУ, 1973. — 275 с.
- 9 Портнов В.С., Юров В.М. Связь магнитной восприимчивости магнетитовых руд с термодинамическими параметрами и содержанием железа // Изв. вузов. Горный журнал. — 2004. — № 6. — С. 122–126.
- 10 Портнов В.С., Выжва С.А., Рева Н.В., Юров В.М. Использование физических свойств минералов для оценки запасов полезных ископаемых // Вестн. Караганд. ун-та. Сер. Физика. — 2011. — № 4(64). — С. 78–87.

- 11 Юров В.М., Портнов В.С., Пузеева М.П. Движение электрических зарядов в гетерогенных средах // Физико-химические процессы в неорганических материалах: Междунар. конф. 10–12 окт. — Кемерово, 2007. — С. 181–183.
- 12 Пиеничный Г.А., Очкур А.П., Маренков О.С. и др. Гамма-гамма метод в рудничной геологии. — М.: Атомиздат, 1974. — 450 с.
- 13 Портнов В.С., Юров В.М., Пузеева М.П. Гамма-гамма методы в геофизическом опробовании железорудных месторождений Казахстана // Новости науки Казахстана. — 2007. — Вып. 4. — С. 12–18.
- 14 Бровар В.В. Гравиметрия и геодезия. — М.: Науч. мир, 2010. — 560 с.
- 15 Резяпов Г.И. Сейсморазведка. — Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2012. — 309 с.
- 16 Комплексование методов разведочной геофизики: Справочник геофизика / Под ред. В.В.Бродового, А.А.Никитина. — М.: Недра, 1984. — 384 с.
- 17 Эгеланд А., Холтер О., Омхольт А. Космическая геофизика. — М.: Мир, 1976. — 545 с.
- 18 Молчанов А.А. Разведочная геофизика. — СПб., 2013. — 299 с.

В.С.Портнов, С.А.Выжва, Н.В.Рева, В.М.Юров

## Минералдар мен кендердің флотациондық қасиеттерін бағалау үшін геофизикалық деректерді қолдану

Мақалада кен мен минералдардың флотациялық қасиеттері олардың табиғи орналасу түрінде анықталып қарастырылған. Ұсынылған әдістер негізінде минералдың беттік энергиясы мен оның байыту мүмкіндігінің байланысы жатыр. Әр түрлі геофизикалық әдістермен өлшенген шамаларды, минералдың беттік керіліс энергиясымен байланыстыратын формулалар алынды. Нәтижелер бір нақтыға саяды, оны эмпирикалық жолмен, яғни корреляциялық талдау арқылы, анықтауға болады. Ал олардың шынайлығы әр түрлі геофизикалық әдістермен алынған нәтижелермен салыстырмалы түрде көрсетіледі. Өз кезегінде олар барлау геофизиканың ғарыш және жерүсті әдістері үшін ұсынылған.

V.S.Portnov, S.A.Vyzhva, N.V.Reva, V.M.Yurov

## The use of geophysical data to assess the flotation properties of ores and minerals

The paper discusses the issues of determining the flotation properties of ores and minerals in their natural occurrence. At the heart of the proposed methods are based on the relationship between the surface energy of the mineral and the ability of the mineral to its enrichment. Derived formulas relating the measured values of different geophysical methods with the surface energy (surface tension) of the mineral. The resulting relation between the surface tension of minerals and the measured value in a particular method of geophysical survey, contain a constant, which must be determined empirically, using correlation analysis. Reliability of the results will increase with proximity to the results obtained by various geophysical methods. The results obtained are designed specifically for terrestrial and space-based methods of exploration geophysics.

### References

- 1 Karmazin V.I. *Dressing of ferrous*, Moscow: Nedra, 1982, 215 p.
- 2 Bogdanov O.S. *Theory and technology of ore flotation*, Moscow: Nedra, 1990, 363 p.
- 3 Shubov L.Y. *Flotation reagents in the processes of mineral processing*, Directory, Moscow: Nedra, 1990, 1, 400 p.; 2, 263 p.
- 4 Stepanova M.N. *Organic reagents in the flotation*, Perm: Publ. of Perm State Technical University, 2009, 53 p.
- 5 Sorokin M.M. *Flotation beneficiation methods. Chemical basis of flotation*, Moscow: MISA Publ., 2010, 409 p.
- 6 Yurov V.M., Portnov V.S., Laurynas V.Ch. et al. *Size effects and physical properties of small particles and thin films*, Karaganda: Publ. of Kazakh-Russian University, 2013, 116 p.
- 7 Rostovtsev V.I. *Scientific substantiation and development of intensifying energy effects on the solid and liquid phases of the refractory mineral resources*, Abstract of Doctor of Technical Sciences, Chita, 2012, 36 p.
- 8 Truhin V.I. *Introduction to the magnetism of rocks*, Moscow: Moscow State University, 1973, 275 p.
- 9 Portnov V.S., Yurov V.M. *Mining Journal*, 2004, 6, p. 122–126.
- 10 Portnov V.S., Vyzhva S.A., Reva N.V., Yurov V.M. *Bull. of Karaganda Univ., Physics*, 2011, 4(64), p. 78–87.
- 11 Yurov V.M., Portnov V.S., Puzeeva M.P. *Physical and Chemical Processes in Inorganic*, Int. Conf. Proc., 10–12 Oct., Kemerovo, 2007, p. 181–183.
- 12 Pshenichny G.A., Ochkur A.P., Marenkov O.S. et al. *Gamma-gamma method in mine geology*, Moscow: Atomizdat, 1974, 450 p.
- 13 Portnov V.S., Yurov V.M., Puzeeva M.P. *Kazakhstan Science News*, 2007, 4, p. 12–18.

- 14 Brovar V.V. *Gravimetry and geodesy*, Moscow: Nauchnyi mir, 2010, 560 p.
- 15 Rezyapov G.I. *Seismic exploration*, Tomsk: Publ. of the Tomsk Polytechnic University, 2012, 309 p.
- 16 *Integration of methods of exploration geophysics*. Directory of geophysics, Ed. V.V.Brodovoy, A.A.Nikitin, Moscow: Nedra, 1984, 384 p.
- 17 Egeland A., Halter O., Omholt A. *Space Geophysics*, Moscow: Mir, 1976, 545 p.
- 18 Molchanov A.A. *Exploration Geophysics*, St. Petersburg, 2013, 299 p.

Репозиторий КарГУ