

НОВЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

УДК 622.7

МЕТОД ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СЕПАРАЦИИ МАЛЫХ ПРОВОДЯЩИХ ЧАСТИЦ

**В. И. Дядин, В. Ю. Кожевников, А. В. Козырев,
В. Г. Подковыров, Н. С. Сочугов**

*Институт сильноточной электроники СО РАН,
пр. Академический 2/3, 634055, г. Томск, Россия*

Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность сепарации малых проводящих немагнитных частиц в сепараторе с импульсным бегущим магнитным полем. Обоснована возможность построения технологии сепарации мелкого и тонкого золота из россыпных и техногенных месторождений на базе предложенного метода.

Обогащение, импульсное магнитное поле, вихревые токи, россыпные месторождения

ВВЕДЕНИЕ

Основные потери россыпного золота происходят на операциях первичного обогащения, в которых теряется главным образом тонкое, пластинчатое и пылевидное золото с размером частиц от миллиметра до нескольких микрон. Из россыпных месторождений сегодня в России добывается чуть менее 45 % золота [1]. Длительная эксплуатация и интенсивная добыча при почти полном отсутствии геолого-разведочных работ привели к тому, что в россыпях значительно снизилась доля крупного легко улавливаемого золота. В ближайшие годы все наиболее крупные, богатые и легкодоступные россыпные месторождения будут отработаны полностью. Останутся труднообогатимые месторождения с мелким и тонким золотом, бедные и техногенные россыпи. Однако качественное обогащение таких россыпей возможно только с помощью новой технологии [2], которая должна быть экологически чистой, простой, не очень разветвленной. По оценкам специалистов применение такой технологии может быть выгодным, если даже из бедных руд и песков будет извлекаться всего 75 % свободного металла [3].

Россыпные месторождения являются естественными смесями минералов, в которых частицы свободного металла отличаются от вмещающих пород высокой электропроводностью. Если на такую смесь подействовать переменным магнитным полем, то во всех частицах минералов будут индуцироваться вихревые токи Фуко. В металлических частицах, благодаря высокой проводимости, вихревые токи станут значительно сильнее токов во вмещающих породах, чаще всего являющихся достаточно хорошими изоляторами. Токи Фуко взаимодействуют с внешним магнитным полем так, что проводящее тело выталкивается из области усиленного поля. В

результате такого взаимодействия металлическая частица приобретает некоторый импульс, который позволяет отделить проводящие частицы от непроводящих. Подобрав форму, амплитуду, скорость изменения, частоту и топологию магнитного поля, можно получить пространственное разделение частиц металла и вмещающих пород [4, 5]. Именно данная идея лежит в основе электродинамического способа разделения минералов. Этот метод успешно работает для сравнительно больших предметов: электродинамической штамповки изделий или магнитомеханических сепараторов проводящих частиц с вращающимися постоянными магнитами.

Если размер частиц очень мал (десятые и сотые доли миллиметра), то существующие устройства становятся неэффективными, так как градиенты магнитного давления сообщают мелким частицам недостаточные для сепарации импульсы. Поэтому разработанные к настоящему времени аппараты электродинамического обогащения чаще всего используются для сортировки крупной стружки и лома цветных металлов [4]. Метод используется и для магнитной сепарации сыпучих минералов, но создаваемое движущимися постоянными магнитами или электромагнитами поле позволяет извлекать только сравнительно крупные частицы [5]. Проблема заключается в том, что сила, действующая на проводящую частицу, помещенную в градиентное магнитное поле, зависит от отношения размера частицы R к толщине скин-слоя λ . Если размер частицы меньше толщины скин-слоя, то механический импульс, приобретаемый частицей, оказывается очень малым, а конечная скорость частицы стремительно падает при уменьшении отношения R/λ . Для золота толщина скин-слоя 1 мм будет достигаться при частоте поля около 20 кГц, а для уменьшения скин-слоя в 2 раза необходимо увеличение частоты поля в 4 раза. Создание же магнитных полей высокой напряженности — сложная техническая задача и требует большого расхода энергии, поэтому минимальный размер частиц, которые могут быть выделены указанными методами, составляет около 0.5 мм.

Обойти многие трудности, непреодолимые как для обычных, так и сверхпроводящих электромагнитов, позволяет техника импульсных магнитных полей. Импульсные магнитные системы потребляют электроэнергию значительно меньше, поэтому их проще охлаждать. Обмотки импульсных индукторов можно изготовить из тонкого проводника и получать в их рабочей зоне поля с характеристиками, недостижимыми для постоянных магнитов, обычных и сверхпроводящих электромагнитов.

Цель настоящей работы — теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение возможности электродинамической сепарации проводящих частиц с размерами порядка 0.1 мм по импульсу за счет воздействия на них внешнего неоднородного магнитного поля, возбуждаемого импульсными токами в катушках.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА

Известно, что во внешнем переменном магнитном поле $\mathbf{B}(t)$ проводящая частица за счет генерации в ней индукционных токов Фуко приобретает магнитный момент $\boldsymbol{\mu} \sim -\partial\mathbf{B}/\partial t$, на который во внешнем слабонеоднородном магнитном поле действует сила $\mathbf{F}(t)$ [6]:

$$\mathbf{F}(t) = (\boldsymbol{\mu}(t) \cdot \nabla) \mathbf{B}(t). \quad (1)$$

Интегрируя силу, можно найти импульс, который приобретет проводящая частица за время действия переменного поля.

Оценим скорость, которую получит в нестационарном и неоднородном магнитном поле проводящая частица цилиндрической формы с радиусом R и высотой H , ось симметрии которой ориентирована вдоль вектора магнитной индукции (примем далее это направление за ось Ox). Поскольку частица предполагается малой по сравнению с толщиной скин-слоя, магнитным полем токов Фуко можно пренебречь и магнитный момент частицы, будет

$$\mu = \int_0^R \pi r^2 \cdot dI(r) = \int_0^R \pi r^2 \cdot \frac{1}{2} \sigma r \left(-\frac{\partial B}{\partial t} \right) H dr = -\frac{1}{8} \pi \sigma R^4 H \frac{\partial B}{\partial t}, \quad (2)$$

где σ — удельная проводимость металла. Подставляя (2) в (1), запишем одномерное уравнение движения частицы

$$(\rho \cdot \pi R^2 H) \frac{dv}{dt} = -\frac{1}{8} \pi \sigma R^4 H \left(\frac{\partial B}{\partial t} \cdot \frac{\partial B}{\partial x} \right), \quad (3)$$

где ρ — плотность металла. Интегрируя (3) в предположении столь короткого времени импульсного магнитного поля, что частица за время этого импульса не успевает заметно переместиться в пространстве вдоль оси Ox , получим

$$v(t) = v(0) - \frac{\sigma R^2}{16\rho} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (B(t))^2 - \left(\frac{\partial B}{\partial x} \right)^2_{t=0} \right\}. \quad (4)$$

Характерный масштаб скорости частицы из (4) можно оценить на уровне

$$v_{\max} \cong \frac{\sigma}{16\rho L} (B_{\max} R)^2, \quad (5)$$

где символом L обозначен характерный масштаб неоднородности магнитного поля, который на практике может быть реализован в миллиметровом диапазоне. Возьмем для примера параметры медной частицы $\sigma \cong 6 \cdot 10^7$ (Ом·м)⁻¹, $\rho \cong 9 \cdot 10^3$ кг/м³, а максимальную магнитную индукцию, которую можно технически реализовать в импульсном режиме, оценим на уровне $B_{\max} \sim 5$ Тл. Тогда при $L \sim 2$ мм получим для частиц с размерами $R \cong 0.1$ мм максимальную скорость на уровне $v_{\max} \cong 5$ см/с. Эта величина вполне способна обеспечить надежную селекцию проводящих частиц по скоростям относительно не проводящих.

Но, к сожалению, формула (5) демонстрирует не конечную, а максимальную скорость движения частицы при приложении импульса $B(t)$. Если рассматривать движение частицы в поле одной катушки, по которой протекает импульс тока, имеющий форму одного периода синусоиды ($J = J_0 \sin \omega t$), то для представленных параметров частицы окажется, что зависимость скорости от времени в течение импульса будет иметь вид, представленный на рис. 1, откуда видно, что за время действия импульса (один период синусоиды тока катушки) частица успевает дважды набрать и потерять направленную скорость порядка 5 см/с. При спаде магнитной индукции к концу импульса до нуля скорость частицы также упадет практически до нуля, поскольку со сменой знака производной в (2) направление магнитного момента частицы также меняет знак и ускоренная при нарастании поля частица будет заторможена при его падении. В результате у частицы останется очень небольшая скорость, обусловленная конечным смещением частицы в течение импульса тока в катушке. Поэтому сообщить значительный импульс малой частице с помощью единственной индукционной катушки не удастся. Увеличение амплитуды тока в рассмотренной конфигурации магнитного поля также не приведет к желаемому результату, так как частица фактически теряет всю набранную за четверть периода скорость. Одно из решений — увеличение длительности импульса тока настолько, чтобы за время ускоряющей части его частица существенно изменила свое положение, но тогда значительно повысятся потери энергии в обмотке катушки и подводящих проводниках. Задание несимметричных импульсов в реальности ограничено затухающими гармоническими сигналами вида $\sin(\tau) \exp(-\alpha\tau)$, которые знакопеременны и одновременно приводят к уменьшению полезной амплитуды скорости

за счет снижения магнитного поля со временем. Таким образом, система с одной магнитной катушкой не позволяет эффективно воздействовать на субмиллиметровые проводящие частицы, так как их конечной скорости (порядка десятых долей миллиметра в секунду) просто недостаточно для сепарации.

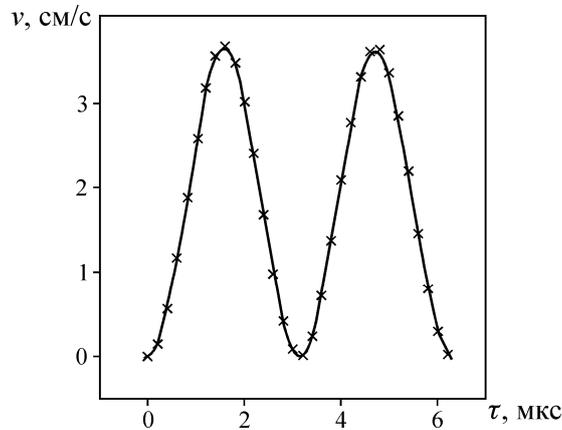


Рис.1. Результаты расчетов изменения скорости частицы радиусом 0.1 мм от времени в магнитном поле одной катушки за один период синусоидального тока

Ситуация может быть существенно изменена, если формировать импульсное магнитное поле с помощью двух соосно расположенных катушек, в которых импульсы тока сдвинуты по времени так, чтобы в месте нахождения частицы формировалось “бегущее магнитное поле”. Предлагаемый подход показан на рис. 2. В катушках K_1 и K_2 протекают импульсы тока $I_1(t)$ и $I_2(t)$, причем импульс тока в катушке K_2 задержан относительно импульса тока в катушке K_1 . При определенном временном сдвиге между импульсами смена знака производной магнитной индукции в (2) будет одновременно сопровождаться сменой знака градиента индукции в (1). Сила (1), действующая на частицу, не будет менять знак, пока не закончатся оба импульса тока. У частицы к этому моменту сохранится довольно высокая скорость движения, оценка которой по порядку величины определяется выражением (5).

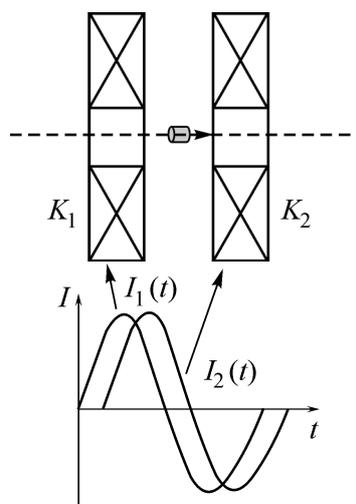


Рис. 2. Схема электродинамического метода ускорения проводящей частицы в системе с импульсным бегущим магнитным полем, сформированным токами двух плоских катушек

Авторами проведено интегрирование уравнения движения (3) для медной частицы с теми же параметрами, но в нестационарном поле двух катушек. Через две одинаковые плоские катушки, состоящие из 20 витков (радиус внутреннего витка 2.5 мм и внешнего 11 мм) и отстоящие друг от друга на 6 мм, протекают импульсы тока в форме одного периода синусоиды продолжительностью $T = 250$ мкс и амплитудой $I = 1.5$ кА. При данных параметрах индукция магнитного поля в месте нахождения частицы достигает 5 Тл.

На рис. 3 приведен результат этого расчета, из которого видно, как меняется во времени скорость частицы. К концу второго импульса максимальная скорость частицы $v_{\max} \cong 3$ см/с. Если сдвиг между импульсами тока T_0 варьировать, то v_{\max} будет меняться, и оптимальный режим наблюдается при сдвиге между импульсами $T_0 \approx T/3$.

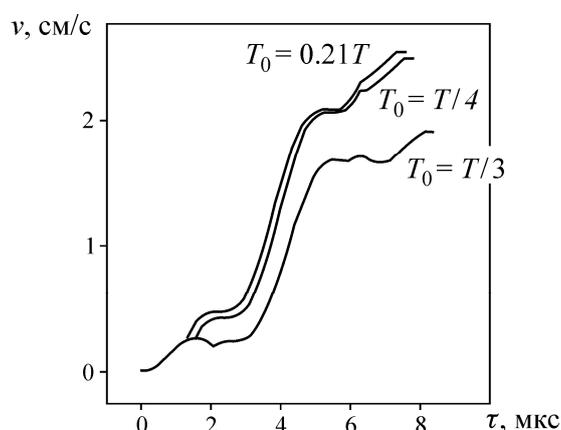


Рис. 3 Временные зависимости скорости частицы в импульсном бегущем магнитном поле двух катушек для различных времен задержек между токами в первой и второй катушках

Таким образом, расчеты показывают техническую возможность создания устройства для непрерывной электродинамической сепарации проводящих частиц в импульсно-периодическом магнитном поле. При частоте следования килоамперных импульсов тока на уровне $f = 100$ Гц средняя мощность генератора тока должна составлять несколько киловатт, что, безусловно, реализуемо на современном уровне развития силовой электроники.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МЕТОДА

Проверка теоретических предположений осуществлена на установке, блок-схема которой приведена на рис. 4. Катушки K_1 и K_2 имеют по 24 витка и сделаны из медной шины толщиной 0.2 мм и шириной 5 мм. Межвитковая изоляция выполнена из полиамидной пленки толщиной 50 мкм. Внутренний диаметр катушек 5 мм, внешний — 24 мм, их индуктивность составляет 12 мкГн. Катушки жестко закреплены на расстоянии 6 мм друг от друга. Импульсы тока в них, близкие по форме к одному периоду синусоиды, формируются с помощью LC-цепи, включающей накопительную емкость C_1 (C_2) номиналом 80 мкФ, защитную индуктивность L_1 (L_2) номиналом 7 мкГн, и катушку K_1 (K_2). Коммутация цепи осуществляется быстрыми импульсными тиристорами T_1 (T_2) марки ТБИ243-500. Через тиристоры протекает первый полупериод импульса тока, при смене направления тока во втором полупериоде открываются

диоды D_1 (D_2) марки ДЧ143-500, и вторая половина импульса протекает через них. Зарядка накопительных емкостей осуществлялась зарядными устройствами ЗУ1 и ЗУ2 до напряжений от 500 до 2000 В, что обеспечивало получение импульсов тока в катушках амплитудой до 2 кА. Импеданс цепи разряда составлял 1 Ом, поэтому амплитуда тока импульса численно равнялась зарядному напряжению. Система могла генерировать как одиночные импульсы, так и с частотой повторения до 100 Гц, но в описываемых экспериментах использовались только одиночные импульсы.

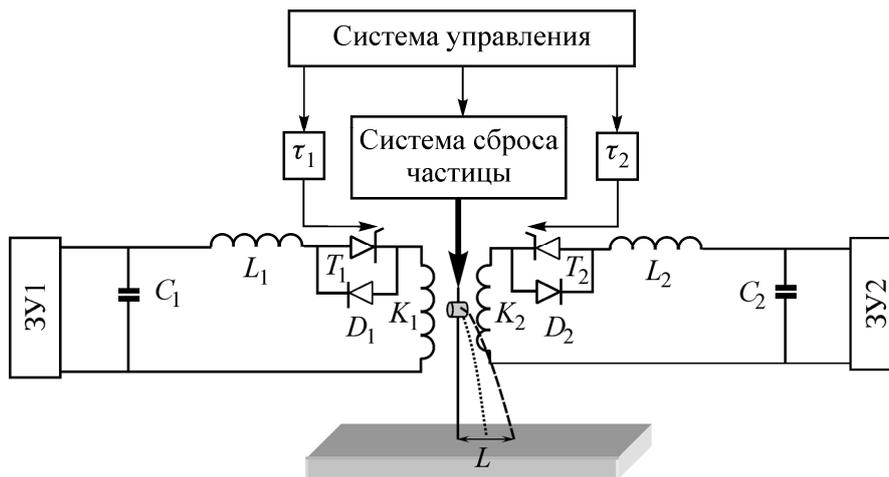


Рис. 4. Блок-схема экспериментальной установки

В качестве модельных частиц использовались кусочки медного провода диаметром от 0.05 до 0.4 мм. Длина частиц примерно равнялась их диаметру. Частица подавалась в пространство между катушками из системы сброса путем открытия электромагнитного затвора выходного отверстия. Через время задержки τ_1 , равное пролету частицы от выходного отверстия системы сброса до центра катушек и составляющее около 40 мкс, запускался тиристор T_1 и формировался импульс тока в первой катушке. Через время задержки τ_2 относительно момента запуска первого тиристора запускался тиристор T_2 и формировался импульс тока во второй катушке. Время задержки τ_2 могло изменяться от 0 до 100 мкс и было одним из параметров эксперимента. Генерация двух смещенных импульсов тока в катушках приводила к формированию импульсного бегущего магнитного поля между катушками, направленного от первой ко второй. Падающие частицы попадали на приемную плоскость, расположенную ниже на 25 см от центра катушек и представляющую собой покрытую слоем масла поверхность с миллиметровой сеткой. Слой масла предотвращал отскок падающих частиц, позволяя фиксировать истинное место падения частицы. Измерением расстояния L от точки вертикального падения частиц в отсутствии поля до точки падения частиц в присутствии поля определялась горизонтальная скорость, приобретенная частицей в сепараторе, в приближении ее постоянства во время падения, которое также бралось постоянным в приближении равноускоренного движения частицы в поле тяготения и равным 0.22 с.

Следует отметить, что частицы имели сложную форму и попадали в зону воздействия импульса. Кроме того, момент достижения частицей точки между центрами катушек мог варьироваться в пределах нескольких миллисекунд из-за разброса момента их выпадения из выход-

ного отверстия системы сброса. Указанные особенности приводили к тому, что частица подвергалась воздействию импульса бегущего магнитного поля не обязательно точно в точке между центрами катушек, а в некоторой окрестности около этой точки. Как следствие, частица приобретала различные скорости, и на приемной плоскости формировалось распределение частиц, следствием которого был их разброс по рассчитанным приобретенным скоростям.

На рис. 5 представлены зависимости экспериментально измеренной и теоретически вычисленной скорости, приобретенной частицей от ее диаметра, для двух значений зарядного напряжения. Можно видеть, что в пределах изменения экспериментальных параметров не зафиксировано отклонение только частиц диаметром 0.05 мм, т. е. их отклонение оказалось меньше достоверно измеряемой величины. Уже частицы диаметром 0.1 мм приобретают скорость 1–2 см/с, что позволяет говорить о возможности сепарации таких частиц в импульсном бегущем магнитном поле, формируемом сдвинутыми по фазе токами двух катушек. В области диаметров менее 0.2 мм наблюдается приемлемое согласие экспериментальных данных с расчетными величинами, полученными для тех же условий. Заниженные экспериментальные значения скоростей, полученные при диаметрах частиц более 0.2 мм, связаны с особенностями конструкции сепаратора: смещение на расстояние $L \approx 2$ см предельное, поскольку при больших углах отклонения частицы от вертикали она способна задевать элементы конструкции сепаратора и изменять направление движения. Это проявляется в увеличении разброса частиц на приемной поверхности и занижении среднего отклонения.

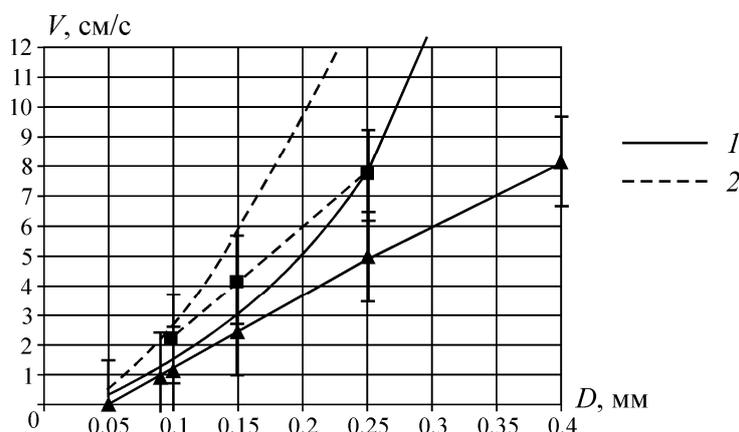


Рис. 5. Зависимость экспериментально измеренной и теоретически вычисленной скорости, приобретенной частицей, от ее диаметра для двух значений зарядного напряжения: 1 — 1500 В; 2 — 2000 В. Экспериментальные данные представлены графиками с маркерами

На рис. 6 показана экспериментальная зависимость скорости частицы от задержки импульса второй катушки относительно импульса первой. Виден эффект бегущего поля: при одновременном включении катушек скорость частиц близка к нулю, максимальная скорость достигается при задержке включения второй катушки около 50 мкс, что соответствует примерно 0.2 от периода колебаний, как это и было предсказано теоретическими расчетами (см. рис. 3).

Как следует из уравнения (5), скорость, приобретенная частицей, обратно пропорциональна квадрату ее размера, но прямо пропорциональна квадрату поля (т. е. квадрату тока в катушках и квадрату зарядного напряжения). Следовательно, для сохранения постоянной скорости частицы, при уменьшении ее размера, необходимо пропорционально увеличивать ток в катушках.

Важно отметить, что параметры, использованные в эксперименте, не являются предельными для современных силовых полупроводниковых приборов, возможно кратное увеличение рабочих напряжений и токов. Таким образом, в импульсном бегущем магнитном поле, формируемом сдвинутыми по фазе токами двух катушек, вполне возможно ускорить частицы с размерами 50 мкм и менее до скоростей около 1–2 см/с.

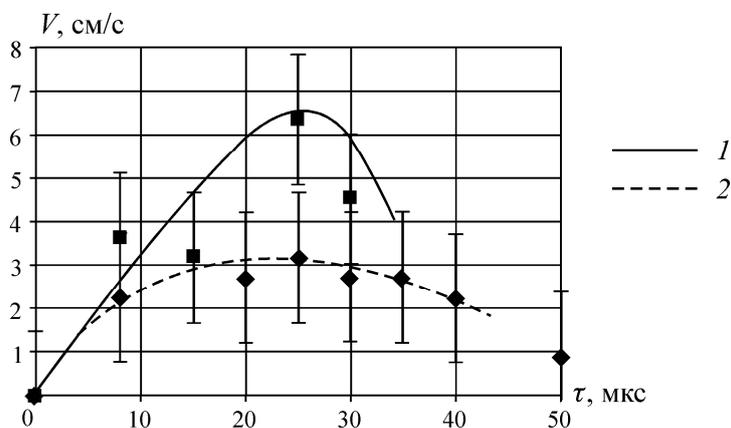


Рис. 6. Экспериментальная зависимость скорости частицы от задержки импульса второй катушки относительно импульса первой. Зарядное напряжение 1500 В; 1 — диаметр частиц 0.4 мм, 2 — 0.25 мм

ВЫВОДЫ

Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность сепарации малых частиц (порядка 0.1 мм) в импульсном бегущем магнитном поле, формируемом сдвинутыми по фазе токами двух катушек.

Предложенный метод может быть использован для создания технологий извлечения мелко-го и тонкого золота из россыпных и техногенных месторождений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Брайко В. Н., Иванов В. Н.** Проблемы развития золотодобычи в России // Горный журнал. — 2006. — № 10.
2. **Макаров А. Б.** Техногенные месторождения минерального сырья // Соросовский образовательный журнал. — 2000. — Т. 6. — № 8.
3. **Кармазин В. В., Кармазин В. И.** Магнитные электрические и специальные методы обогащения полезных ископаемых. — М.: Изд-во МГГУ, 2005.
4. **Бочкарев Г. Р., Ростовцев В. И., Воблый П. Д. и др.** Высокоградиентный магнитный сепаратор для обогащения слабомагнитных руд // ФТПРПИ. — 2004. — № 2.
5. **Физика и техника мощных импульсных систем** // Сб. статей под ред. Е. П. Велихова. — М.: Энергоатомиздат, 1987.
6. **Тамм И. Е.** Основы теории электричества. — М.; Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1946.

Поступила в редакцию 16/X 2007