



УДК 550.8.4

Н.П. Сенчина

**ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ
ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЕСТЕСТВЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ
(НА ПРИМЕРЕ БУРУКТАЛЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НИКЕЛЯ,
ЮЖНЫЙ УРАЛ)**

N.P. Senchina

National Mineral Resources University,
2, 21st Line V.O., St. Petersburg, 199106, Russia.

**REDISTRIBUTION OF CHEMICAL ELEMENTS UNDER
THE NATURAL ELECTRIC FIELD INFLUENCE
(THE BURUKTALSKY NICKEL DEPOSIT, SOUTH URAL, AS AN EXAMPLE)**

В статье рассмотрены различные виды моделирования естественных электрических полей, образованных вблизи рудных тел магнетита в условиях смены окислительно-восстановительного потенциала подземных вод и влияние таких полей на движение ионов металлов во флюиде в породе.

КОРА ВЫВЕТРИВАНИЯ. ЕСТЕСТВЕННОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ. ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ. НЕЛИНЕЙНОЕ ИНТЕГРАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ.

The different types of natural electric fields modeling have been considered. Those fields are usually formed near ore bodies of magnetite in the conditions of underground waters oxidation-reduction potential change. The electric fields influence on metal ions movement in a fluid in breed was studied.

WEATHERING CRUST. NATURAL ELECTRIC FIELD. OXIDATION-REDUCTION POTENTIAL. NONLINEAR INTEGRAL EQUATION.

Надежно установлен факт существования естественного электрического поля (ЕП) в горных породах. В прошлом веке природа таких полей была изучена и описана ученым-геофизиком А.С. Семеновым. Метод естественного электрического поля (ЕП) широко применяется в разведочной геофизике. При этом было высказано предположение о возможности массопереноса под действием электрического поля. Однако кажущаяся незначительность вклада электрических явлений на большинстве месторождений, по сравнению с механическим переносом, гравитационным перераспределением и другими механизмами изменения состава горных пород привлекала внимание исследователей — геофизиков и геохимиков — в недостаточной степени.

В данной работе рассматриваются процессы перераспределения элементов геологической среды под действием естественного электрического поля на примере Буруктальского никелевого месторождения (Южный Урал) с помощью различных инструментов моделирования.

**Физико-геологическое описание
объекта исследования**

Особенностью Буруктальского месторождения является наличие протяженных по глубине субвертикальных зон, обогащенных магнетитом (до 45 – 50 вес.%). Они приурочены к нижней части окисно-железной зоны месторождений («черный» горизонт) и слагают пластообразные залежи мощностью 1 – 10 м со сложной морфоло-

гией подошвы: с карманами, уходящими на глубины до 100 – 150 м [1], при мощности зоны окисления 30 – 40 м. Такие зоны представляют собой электронно-проводящие тела, пересекающие зону окисления, что приводит к формированию естественного электрического поля величиной в первые сотни милливольт (согласно материалам автора работы [2]). Окружающие породы представлены охрами в верхней части профиля и серпентинитами в нижней (сокращенный профиль коры выветривания), при этом наблюдается незначительное обогащение редкими металлами и более значительное – никелем, руды которого и разрабатываются на данном месторождении [1].

Математическое моделирование

Величина электродного потенциала магнетитовых рудных тел в данных условиях определяется содержанием кислорода в окружающих подземных водах [3]. Рассмотрим случай распространения растворенного газообразного кислорода путем диффузии от дневной поверхности вниз вдоль оси z при наличии реакции окисления пород второго порядка, скорость которой выражается пропорционально квадрату концентрации кислорода (реагента) [4]. Обозначим концентрацию растворенного кислорода $C(z, \tau)$, где τ – время.

При нулевом начальном значении

$$C \Big|_{\tau=0} = 0$$

распределение концентрации этого элемента подчиняется нелинейному интегральному уравнению [5]:

$$C = C_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{z}{2\sqrt{D\tau}} \right) \right] - \frac{\beta q_{\max}}{2\sqrt{\pi D}} \times \left[\int_0^\tau \frac{\exp \left(\frac{-(z-z')^2}{4D(\tau-\xi)} \right)}{\sqrt{\tau-\xi}} - \frac{\exp \left(\frac{-(z+z')^2}{4D(\tau-\xi)} \right)}{\sqrt{\tau-\xi}} \right] \times \left. \int_0^\xi C(z', \eta) \exp \left(-\beta \int_0^\xi C(z', \eta) d\eta \right) dz' \right\} dz', \quad (1)$$

где

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\xi^2} d\xi$$

– интеграл вероятности, C_0 – концентрация растворенного кислорода у дневной поверхности (при $z = 0$), q_{\max} – максимально возможная концентрация окисленной формы твердой фазы, β – постоянная кинетики гетерогенной реакции окисления магнетита, D – коэффициент диффузии растворенного кислорода в пористых горных породах.

Концентрацию q окисленной формы окисляемой части твердой фазы (например, гематита при окислении магнетита) можно затем найти из соотношения [5]:

$$q = q_{\max} \left(1 - \exp \left[-\beta \int_0^\tau C(z, \eta) d\eta \right] \right). \quad (2)$$

Решение нелинейного интегрального уравнения (1) получено нами методом последовательных приближений (формулы не приведены ввиду их громоздкости); при этом найдена относительная концентрация окисленной части магнетита, представленной гетитом и гематитом. Полученная теоретическая зависимость при специально подобранном значении параметра β достаточно удовлетворительно совпадает со сглаженной экспериментальной кривой (рис. 1). В результате подбора параметра удалось оценить естественное значение скорости окисления магнетита в условиях Буруктальского месторождения.

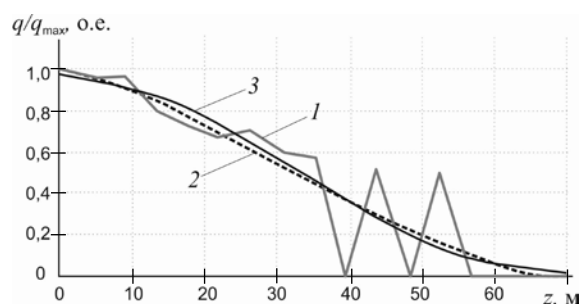


Рис. 1. Экспериментальные (1, 2) и теоретическая (3) зависимости относительной концентрации окисленной формы магнетита от глубины залегания. 1, 2 – исходная и сглаженная кривые соответственно; 3 – рассчитанная по формуле (2) при $\tau = 3 \cdot 10^5$ лет, $\beta = 7 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3 / (\text{кг} \cdot \text{с})$

Полученные результаты говорят о том, что при наличии близвертикально падающих магнетитовых тел, протяженных до глубин, превышающих 30 – 40 м, вполне возможно формирование естественного электрического поля (ЕП) значительной интенсивности. Такое ЕП может вызывать соответствующие геоэлектрохимические процессы [6].

Лабораторное физико-химическое моделирование

Для проверки возможности перехода в раствор ионов металлов под действием электрического поля, был предпринят специальный эксперимент. Использовалась лабораторная установка, состоящая из источника питания в режиме стабилизации тока, а также емкости с дистиллированной водой, подкисленной азотной кислотой ($pH \approx 4$). Емкость была разделена на семь ячеек полупроницаемыми пергаментными мембранами. Образец дробленой (для сокращения длительности эксперимента) рудоносной породы весом 0,2 кг был помещен в центральную ячейку. Через указанную емкость в течение двух недель мы пропускали постоянный ток силой 0,1 А. Регулярно изымались пробы и проводились анализы растворов в ячейках, приближенных к аноду и катоду (использовался высокочувствительный ИСП-анализ). Заявленный лабораторией порог чувствительности для платиноидов не превышал 0,001 мг/л, что составляет 0,2 % от общего измеренно-

го содержания платины, 0,007 % – от такового для изотопа Pd-108; для остальных представленных элементов эта величина еще ниже.

Результаты, полученные из эксперимента, представлены в таблице. Их анализ позволяет заключить, что переход элементов горных пород и руд в подвижную форму под действием электрического поля не только возможен, но и процентная доля элементов, переходящих в подвижную форму, весьма высока.

Из этих же данных можно сделать вывод, что металлы, в том числе благородные, перемещаются в составе комплексных соединений, имеющих как положительные, так и отрицательные заряды.

По итогам проведенного опыта и расчетов доли элементов, выведенных в раствор, эти элементы можно разделить на две группы, различающиеся своим поведением в электрическом поле. К первой группе относятся изотоп Pd-108, Cr и Fe (в меньшей степени), ко второй – Pt, Co, Ag, Ni. В связи с высокой чувствительностью анализа разделение по величинам в доли процента является достоверным. Элементы первой группы образуют преимущественно анионную форму, а для элементов второй характерно двойственное поведение с преобладанием мобильных свойств катиона. Такой результат несколько противоречит известной сидерофильности платины, однако его можно объяснить свойствами минеральных ассоциаций.

Результаты лабораторного опыта по электролизу раздробленной горной породы в слабокислом водном растворе

Элемент	Доля элементов, перешедших в раствор, %		
	Вблизи анода	Вблизи катода	Суммарная
Cr	1,25	1,53	2,78
Fe	0,30	0,38	0,68
Co	10,87	10,50	21,37
Ni	3,40	3,26	6,66
Pd-108	4,84	13,92	18,76
Ag	18,92	18,18	37,10
Pt	13,41	10,21	23,62

Примечание. Водородный показатель раствора азотной кислоты $pH = 4$.

Результаты лабораторного эксперимента по использованию дробленой рудоносной породы можно перенести на массивы горных пород в естественном залегании. Это полностью справедливо в изучаемой на Буруктальском месторождении довольно рыхлой коре выветривания, а в случае плотных монокристаллических пород необходимо учитывать замедление электрохимических процессов, вызванное малым флюидонасыщением, т. е. сокращением количества путей миграции химических элементов.

Особенности распределения элементов на Буруктальском месторождении

Из работ И.В. Таловиной с соавторами [7] известны группировки элементов, отражающие единство их свойств при передвижении и накоплении на месторождении. Например, в рудах серпентинитовой зоны месторождения значимые положительные корреляционные связи выявлены у группы, состоящей из элементов Pt, Au, Ni, Co, которая отрицательно коррелирует с Pd. Также наблюдается отрицательная корреляция элементов Fe и Ni, которая говорит о том, что к накоплению никеля приводят не только процессы латеритного

выветривания (что типично для железа), но и более сложные (рис. 2). Стрелками на разрезах обозначена область, соответствующая предлагаемой модели. Видна картина перераспределения никеля в зоне влияния естественного электрического поля, сформированного глубинным магнетитсодержащим телом. Полученные данные в целом позволяют заключить, что корреляция элементов между собой в зоне месторождения, подверженной влиянию электрического поля, аналогична их корреляционному поведению в проведенном лабораторном эксперименте. Это косвенно свидетельствует о причинно-следственной связи между процессами электрической природы и результатами накопления химических элементов в указанных условиях. Однако объемы платиноидов, скапливающихся таким способом, невелики; их добыча рациональна только при попутной добыче с основным рудным элементом месторождения – никелем [8].

Итак, известно, что при выветривании горных пород металлы выносятся либо, наоборот, концентрируются в породах, образуя тем самым и месторождения. Причинами различного поведения элементов в этих

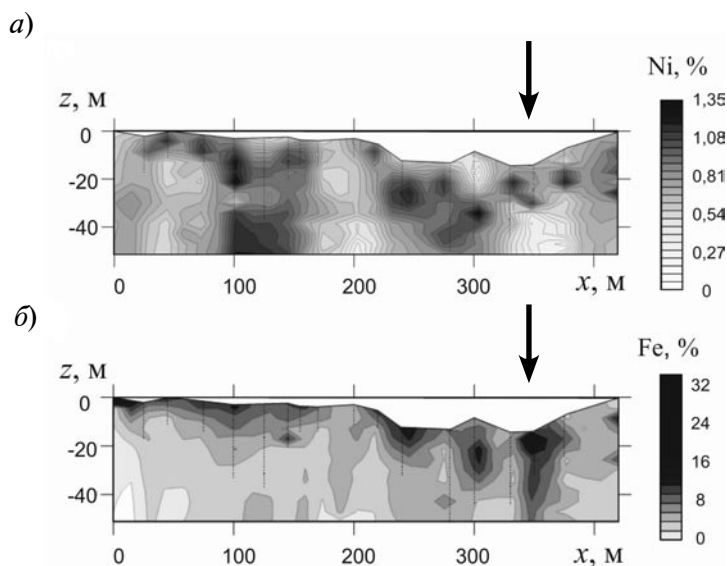


Рис. 2. Распределение концентраций никеля (а) и железа (б) в разрезе участка исследованного месторождения по данным изучения керна скважин; вертикальными линиями показаны промежутки изученного керна скважин



процессах являются множество факторов: влияние электрических полей, различия в содержаниях других элементов, разница в температуре и кислотности и другие.

Выяснено, что длительное наличие естественных электрических полей создает предпосылки для накопления одних элементов (например, Pd) вблизи анодной зоны рудных электронно-проводящих тел, других – вблизи катодной, и у многих элементов проявляется двойственность.

В данном случае естественное электрическое поле может служить немаловажным фактором дифференциации наряду с явлениями механического, гравитационного, химического и прочих видов разделения вещества в верхней части земной коры. При формировании неоднородного поля, без четко выраженных полюсов, аналогичные процессы приведут к рассеиванию элементов, а не к их концентрации, либо к концентрации, недостаточной для рудообразования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рыжкова, С.О.** Никеленосные оксиды железа Буруктальского месторождения, Южный Урал [Текст] / С.О. Рыжкова, И.В. Таловина, В.Г. Лазаренков [и др.] // Записки Горного института. – 2009. – Т. 183. – С. 101–111.

2. **Электроразведка.** Справочник геофизика [Текст]: В 2 кн. Кн. 1./Под ред. В.К. Хмелевского, В.М. Бондаренко; 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1989. – 438 с.

3. **Свешников, Г.Б.** Электрохимические процессы на сульфидных месторождениях [Текст] / Г.Б. Свешников. – Л.: Недра, 1967. – 158 с.

4. **Голубев, В.С.** Гетерогенные процессы геохимической миграции [Текст] / В.С. Голубев, А.А. Гарибянц. – М.: Недра, 1968. – 192 с.

5. **Путиков, О.Ф.** Основы теории нелиней-

ных геоэлектрохимических методов поисков и разведки [Текст] / О.Ф. Путиков. – СПб.: Изд-во СПГГИ(ТУ), 2009. – 534 с.

6. **Комаров, В.А.** Геоэлектрохимия [Текст] / В.А. Комаров. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 1994. – 136 с.

7. **Таловина, И.В.** Платиноиды и золото в оксидно-силикатных никелевых рудах Буруктальского и Уфалейского месторождений, Урал [Текст] / И.В. Таловина, В.Г. Лазаренков, Н.И. Воронцова // Литология и полезные ископаемые. – 2003. – № 5. – С. 474–487.

8. **Михайлов, Б.И.** Проблемы Fe-Co-Ni месторождения Буруктал, Южный Урал [Текст] / Б.И. Михайлов, Л.А. Иванов // Руды и металлы. – 2003. – Т. 1. – С. 5–12.

СЕНЧИНА Наталия Петровна – студентка *Национального минерально-сырьевого университета «Горный».*

199106, г. Санкт-Петербург, В.О., 21-я линия, 2
archie3@mail.ru