



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, 21<sup>st</sup> 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  $\tau$  – время.

При нулевом начальном значении

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

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

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

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,  $\beta$  – 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  $\beta$  достаточно удовлетворительно совпадает со сглаженной экспериментальной кривой (рис. 1). В результате подбора параметра удалось оценить естественное значение скорости окисления магнетита в условиях Буруктальского месторождения.

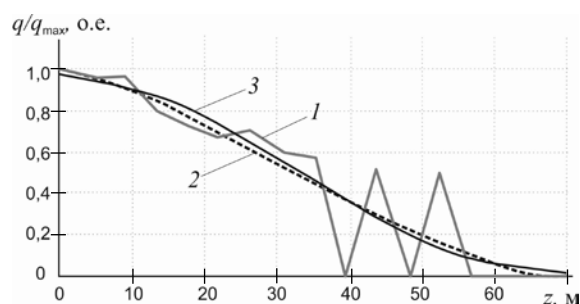


Рис. 1. Экспериментальные (1, 2) и теоретическая (3) зависимости относительной концентрации окисленной формы магнетита от глубины залегания. 1, 2 – исходная и сглаженная кривые соответственно; 3 – рассчитанная по формуле (2) при  $\tau = 3 \cdot 10^5$  лет,  $\beta = 7 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3 / (\text{кг}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

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

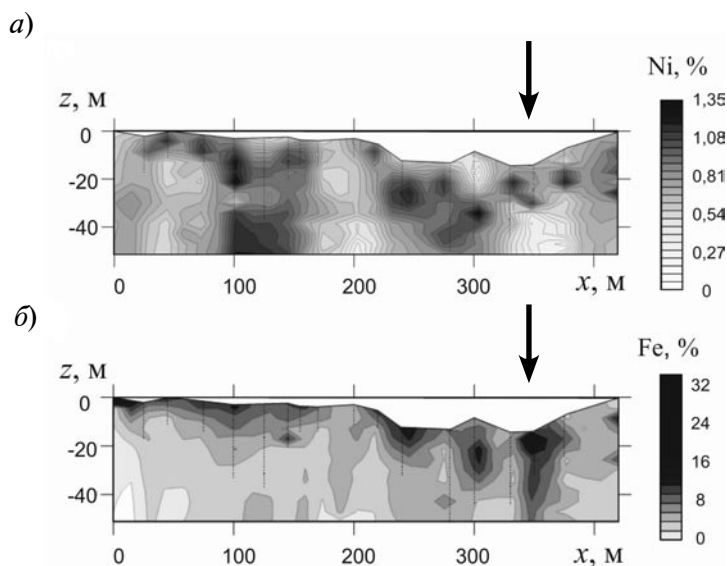


Рис. 2. Распределение концентраций никеля (а) и железа (б) в разрезе участка исследованного месторождения по данным изучения керна скважин; вертикальными линиями показаны промежутки изученного керна скважин



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