УДК 550.8.4

О.Ф.ПУТИКОВ, *д-р геол.-минерал. наук*, *профессор*, *oput@OP4130.spb.edu*
В.Г.ЛАЗАРЕНКОВ, *д-р геол.-минерал. наук*, *профессор*, *lazarenkov@mail.ru*
И.В.ТАЛОВИНА, *канд. геол.-минерал. наук*, *доцент*, *ital@mail.ru*
Н.П.СЕНЧИНА, *студентка*, *archie3@mail.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», *Санкт-Петербург*

O.F.PUTIKOV, *Dr. in geol. & min. sc.*, *professor*, *oput@OP4130.spb.edu*
V.G.LAZARENKOV, *Dr. in geol. & min. sc.*, *professor*, *lazarenkov@mail.ru*
I.V.TALOVINA, *PhD in geol. & min. sc.*, *associate professor*, *ital@mail.ru*
N.P.SENCHINA, *student*, *archie3@mail.ru*
National Mineral Resources University (*Mining University*), *Saint Petersburg*

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ СИЛИКАТНОГО НИКЕЛЯ КОР ВЫВЕТРИВАНИЯ

Обоснована возможность формирования естественного электрического поля в условиях латеритной коры выветривания ультраосновных пород при наличии протяженных по глубине магнетитсодержащих тел. Получены теоретические кривые распределения по глубине концентрации растворенного в подземных водах кислорода и окисленных форм магнетита. Показано удовлетворительное совпадение теоретической и экспериментальной кривых распределения концентрации окисленных форм магнетита.

***Ключевые слова*:** кора выветривания, естественное электрическое поле, концентрация растворенного кислорода, нелинейное интегральное уравнение.

CONDITIONS OF THE NATURAL ELECTRIC FIELD FORMATION AT THE SILICATE NICKEL DEPOSITS OF WEATHERING CRUST

Possibility of the natural electric field formation in conditions of the lateritic weathering crust of the ultra basic rocks in presence of extended in depth magnetite bearing bodies is proved. Theoretical curves of concentration of the dissolved oxygen and oxidized forms of magnetite are obtained. It is enough satisfied coincidence with the experimental data.

***Key words*:** weathering crust, natural electric fields, concentration of the dissolved oxygen, nonlinear integral equation.

Изучение коры выветривания ультраосновных пород Буруктальского (Южный Урал) месторождения силикатных кобальт-никелевых руд [2] привело к выявлению редкометалльного платиноидного оруденения. Кора выветривания неоднократно описана, ее мощность колеблется в широких пределах: от первых метров до 150 м, история образования носит длительный полихронный и полигенный характер. Рассмотрим условия развития геоэлектрохимических процессов, которые могут способствовать формированию скоплений редких металлов.

Рядом исследователей установлено наличие аномалий естественного электрического поля (ЕП) над месторождениями магнетитовых железных руд. Интенсивность подобных аномалий может достигать первых сотен милливольт [5]. Электродный

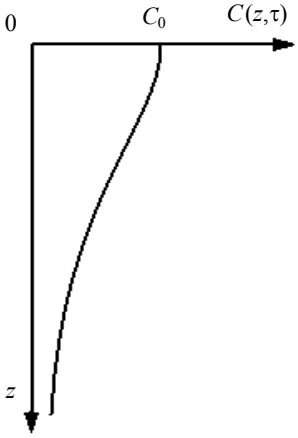


Рис.1. Вид графика изменения концентрации растворенного кислорода $C(z, \tau)$ с глубиной z

потенциал магнетитовых тел, представляемых в качестве инертных электродов, определяется содержанием кислорода в подземных водах [1]. Исследователями установлена корреляционная зависимость между окислительно-восстановительным потенциалом природных вод и концентрацией растворенного кислорода в них – эта связь линейная [4]. Таким образом, существует прямая зависимость изменения по глубине скачка потенциала на границе электронопроводящего тела и ионопроводящей среды от изменения концентрации растворенного кислорода в подземных водах [1]. Скачок потенциала на границе рудного тела есть составная часть естественного электрического поля: в верхней части рудного тела формируется катодная зона поля ЕП, а в нижней – анодная [1].

На месторождениях силикатного никеля кор выветривания электронопроводящие минералы представлены магнетитом. Таким образом, для определения ЕП электронопроводящих (магнетитовых) рудных тел необходимо рассчитать изменение концентрации растворенного в подземных водах кислорода по глубине.

При распространении растворенного газообразного кислорода путем диффузии от дневной поверхности вниз вдоль оси z (рис.1) и наличии реакции окисления пород второго порядка концентрация растворенного кислорода $C(z,\tau)$, где τ – время, при нулевом начальном значении концентрации

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

подчиняется нелинейному интегральному уравнению [3]

$$C = C_0\left[1-\operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{D\tau}}\right)\right] - \frac{\beta q_{\max}}{2\sqrt{\pi D}}\times$$

$$\times\int_0^{\infty}\left\{\left[\int_0^{\tau}\frac{\exp\left(\frac{-(z-z')^2}{4D(\tau-\xi)}\right)}{\sqrt{\tau-\xi}} - \frac{\exp\left(\frac{-(z+z')^2}{4D(\tau-\xi)}\right)}{\sqrt{\tau-\xi}}\right]\times\right.$$

$$\left.\times C(z',\xi)\exp\left(-\beta\int_0^{\xi}C(z',\eta)\mathrm{d}\eta\right)\mathrm{d}\xi\right\}\mathrm{d}z', \quad (1)$$

где C_0 – концентрация растворенного кислорода у дневной поверхности (при $z = 0$); $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^x \mathrm{e}^{-\xi^2}d\xi$ – интеграл вероятности; D – коэффициент диффузии растворенного кислорода в пористых горных породах; β – постоянная кинетики гетерогенной реакции окисления магнетита; $q_{\max}$ – максимально возможная концентрация окисленной формы твердой фазы.

Концентрацию окисленной формы q окисляемой части твердой фазы (например, гематита при окислении магнетита) можно затем найти из соотношения [3]

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

Будем решать нелинейное интегральное уравнение (1) методом последовательных приближений. Положим, что нулевое приближение концентрации $C^{(0)}$ соответствует начальной (нулевой) концентрации:

$$C^{(0)} = 0. \quad (3)$$

Подставляя выражение (3) в правую часть уравнения (1), найдем первое приближение концентрации растворенного кислорода $C^{(1)}$:

$$C^{(1)} = C_0\left[1-\operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{D\tau}}\right)\right]. \quad (4)$$

Формула (4) соответствует распределению концентрации кислорода в горных породах при отсутствии реакции окисления (наиболее быстрое продвижение фронта кислорода вглубь пород).

Второе приближение концентрации $C^{(2)}$ получим, подставляя $C^{(1)}$ в правую часть формулы (1). Однако первое приближение концентрации кислорода $C^{(1)}$ просто и достаточно точно (с выполнением граничных условий) можно описать не формулой (4), а ступенчатой функцией, т.е. положить приближенно

$$C^{(1)} = C_0\left[1-\operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{D\tau}}\right)\right]\approx$$

$$\approx\begin{cases} C_0, & 0\le\dfrac{z}{2\sqrt{D\tau}}\le 1; \\ 0, & 1<\dfrac{z}{2\sqrt{D\tau}}<\infty. \end{cases} \qquad (5)$$

Меняя порядок интегрирования в правой части формулы (1) и подставляя туда выражение (5), получим

$$C^{(2)} \approx C_0\left[1-\operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{D\tau}}\right)\right]-\frac{\beta q_{\max}C_0}{2\sqrt{\pi D}}\times$$

$$\times\int_0^{\tau}\left\{\left[\int_0^{2\sqrt{D\xi}}\frac{\exp\left(-\dfrac{(z-z')^2}{4D(\tau-\xi)}\right)}{\sqrt{\tau-\xi}}-\frac{\exp\left(-\dfrac{(z+z')^2}{4D(\tau-\xi)}\right)}{\sqrt{\tau-\xi}}\right]\times\right.$$

$$\left.\times\exp\left(-\beta C_0\left(\xi-\frac{z'^2}{4D}\right)\eta^*\left(\xi-\frac{z'^2}{4D}\right)\right)dz'\right\}d\xi, \quad (6)$$

где $\eta^*(x)=\begin{cases}1, & x\ge 0,\\ 0, & x<0;\end{cases}$ – единичная функция.

Учитывая, что в выражении (6) $z'\le 2\sqrt{D\xi}$, формулу можно переписать в виде

$$C^{(2)}/C_0 \approx \left[1-\operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{D\tau}}\right)\right]-\frac{\beta q_{\max}}{2\sqrt{\pi D}}\int_0^{\tau}\frac{e^{-\beta C_0\xi}}{\sqrt{\tau-\xi}}\times$$

$$\times\left\{\int_0^{2\sqrt{D\xi}}\exp\left(\frac{\beta C_0 z'^2}{4D}\right)\left[\exp\left(-\frac{(z-z')^2}{4D(\tau-\xi)}\right)-\right.\right.$$

$$\left.\left.-\exp\left(-\frac{(z+z')^2}{4D(\tau-\xi)}\right)\right]dz'\right\}d\xi\,. \qquad (7)$$

По формуле (7) в программном обеспечении Matlab 6.5 рассчитано распределение относительной концентрации растворенного кислорода как функции глубины z для различных значений времени τ (рис.2, сплошная линия). Для сравнения для тех же значений τ рассчитано $C^{(1)}/C_0$ по формуле (4) – распределение концентрации кислорода без учета процесса окисления (рис.2, штриховая линия).

Подставляя в формулу (2) второе приближение концентрации растворенного кислорода, определяемое формулой (7), находим относительную концентрацию окисленной части магнетита, представленной гетитом и гематитом (рис.3, кривая 1). Теоретическая кривая 1 при специально подобранном значении параметра β достаточно удовлетворительно совпадает с экспериментальной кривой 3.

Как видно из рис.2 и 3, при наличии близвертикально падающих магнетитовых тел до глубин более 30 м вполне возможно формирование естественного электрического поля (ЕП) значительной интенсивности на месторождениях силикатного никеля кор выветривания, которое может вызывать соответствующие геоэлектрохимические процессы.

Выводы

1. Обоснован механизм формирования ЕП в условиях латеритной коры выветривания ультраосновных пород с протяженными по глубине магнетитсодержащими телами.

2. Методом последовательных приближений получена численная оценка решения нелинейного интегрального уравнения распределения концентрации кислорода по глубине с учетом диффузии и необратимой реакции окисления второго порядка.

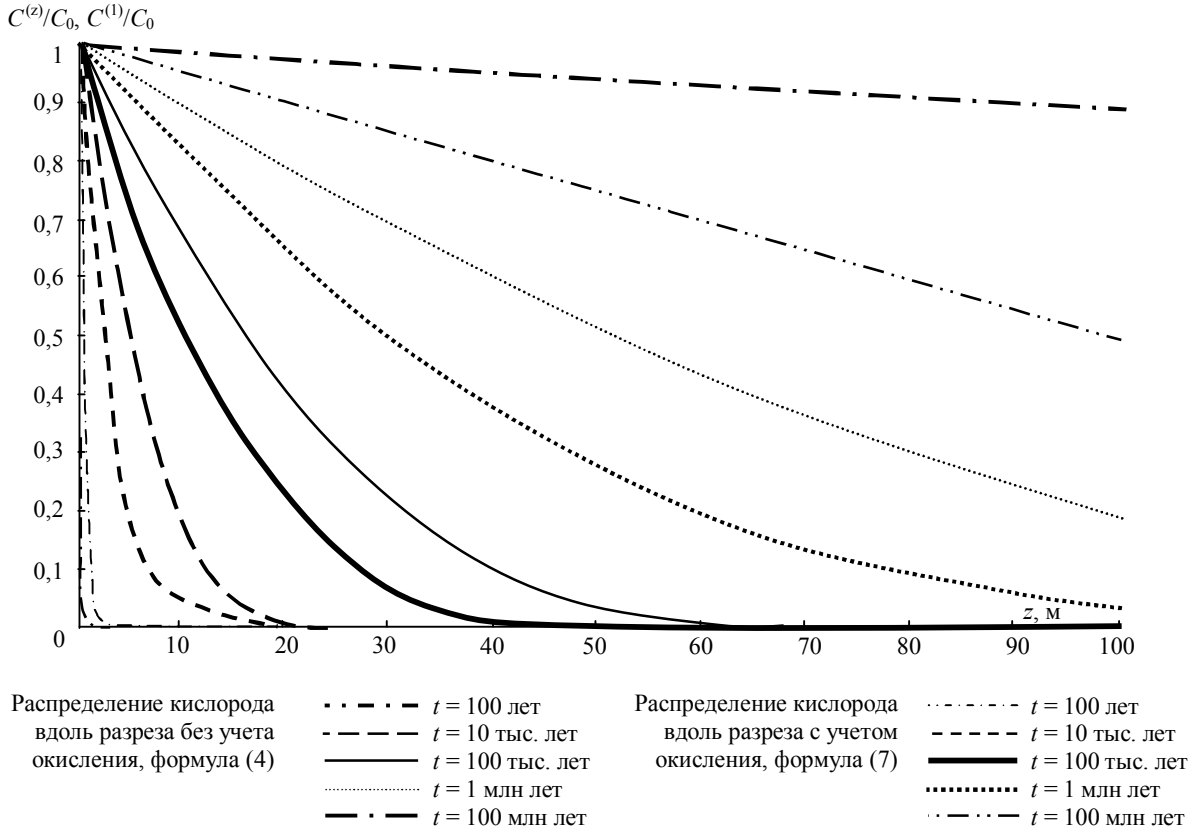


Рис.2 Графики зависимостей (4), (7) при значениях параметров
$C_0 = 2 \cdot 10^{-3}$ кг/м^3; $q_{max} = 36$ кг/м^3; $D = 1 \cdot 10^{-10}$ м^2/с; $\beta = 2 \cdot 10^{-10}$ м^3/(кг·с).

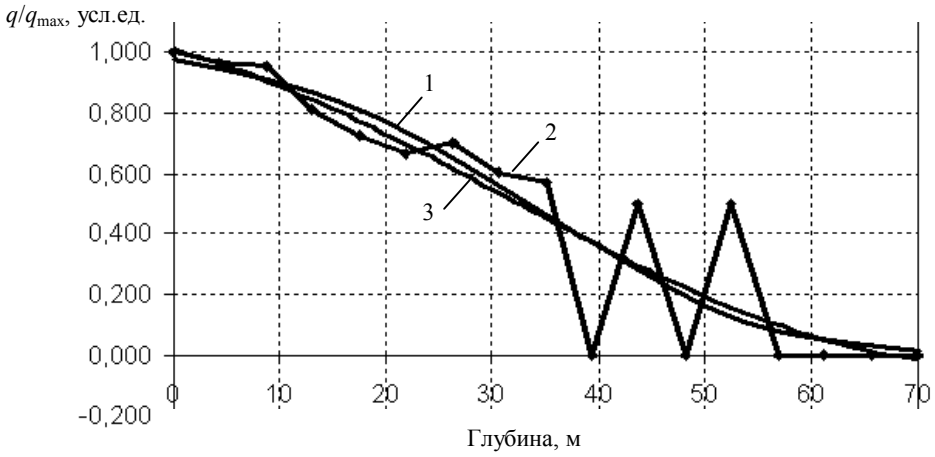


Рис.3. Зависимости относительной концентрации окисленной фазы магнетита от глубины
Кривые: 1 – теоретическая формула (2) при $\tau = 3 \cdot 10^5$ лет, $\beta = 7 \cdot 10^{-10}$м^3/(кг·с); 2, 3 – экспериментальные (2 – несглаженная, 3 – сглаженная)

3. Показано удовлетворительное совпадение теоретической и экспериментальной кривых распределения окисленных форм магнетита по глубине при значении постоянной кинетики реакции окисления магнетита $\beta = 7 \cdot 10^{-10}$м^3/(кг·с).

Работа выполнена при поддержке гранта Минобрнауки П-737 от 20.05.2009 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Комаров В.А*. Геоэлектрохимия. СПб: Изд-во СПбГУ, 1994. 136 с.

2. Никеленосные оксиды железа Буруктальского месторождения, Южный Урал / С.О.Рыжкова, И.В.Таловина, В.Г.Лазаренков, В.Л.Уголков, Н.И.Воронцова // Записки Горного института. 2009. Т.183. С.101-111.

3. *Путиков О.Ф*. Основы теории нелинейных геоэлектрохимических методов поисков и разведки / Санкт-Петербургский горный институт. СПб, 2009. 534 с.

4. *Свешников Г.Б.* Электрохимические процессы на сульфидных месторождениях. Л.: Недра, 1967. 158 с.

5. Электроразведка: Справочник геофизика. М.: Недра, 1979. 518 с.

REFERENCES

1. *Komarov V.A*. Geoelectrochemistry. Saint Petersburg: St.Petersburg State University Publishing House, 1994. 136 p.

2. *Ryzhkova S.O*., *Talovina I.V.*, *Lazarenkov V.G*., *Ugolkov V.L*., Vorontsova N.I. Nikel-containing Iron oxides of the Buruktal deposit, South Urals // Proceedings of the Mining Institute. 2009. V.183. P.101-111.

3. *Putikov O.F*. Basis theory of the nonlinear geoelectrochemical methods of prospecting and exploration / St.Petersburg State Mining Institute. Saint Petersburg, 2009. 534 p.

4. *Sveshnikov G.B*. Electrochemical processes at the sulphide deposits. Leningrad: Nedra, 1967. 158 p.

5. The electric exploration: Handbook of geophysist. Moscow: Nedra, 1979. 518 p.