УДК 550.837:550.84:553.98

М.Б.ШТОКАЛЕНКО, С.Г.АЛЕКСЕЕВ,
С.А.ВЕШЕВ, Н.А.ВОРОШИЛОВ
ФГУ НПП «Геологоразведка», Санкт-Петербург, Россия
О.Ф.ПУТИКОВ
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет), Россия

РАЗВИТИЕ ГЕОЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ И КОМПЛЕКСНОЕ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИ ПОИСКАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ

Рассматриваются проблемы развития геоэлектрохимических технологий. Предложен упрощенный алгоритм моделирования струйного ореола. Продемонстрированы примеры применения геоэлектрохимических технологий при поисках залежей твердых полезных ископаемых и углеводородов.

The problems of progression of geoelectrochemical technologies are considered. Simplifying algorithm of the flow aureole modeling is described. Examples of the geoelectrochemical technologies application in the search for ore lodes and oil and gas pools are presented.

Геоэлектрохимические методы основаны на извлечении и анализе подвижных и слабозакрепленных форм нахождения химических элементов в почвах и горных породах. Эти методы сочетают в себе глубинность исследований, достигающую нескольких километров, возможность четкой локализации геологических объектов и получения сведений об их вещественном составе с высокой экономической эффективностью и представляют собой одно из наиболее многообещающих направлений развития геолого-поисковых работ как на нефть и газ, так и на твердые полезные ископаемые. Геоэлектрохимические методы применяют на разных стадиях прогнозно-поисковых и поисково-оценочных работ для решения различных геологических задач, как самостоятельно, так и в комплексе с другими геофизическими методами [2, 3]. Геоэлектрохимические съемки проводят, чаще всего, на площадях, где традиционная геохимия неэффективна: на территориях с двух- и трехъярусным строением.

Наиболее широкое распространение в практике геолого-разведочных работ получили следующие методы: метод поисков по металлоорганическим почвенным формам (МПФ), термомагнитный геохимический метод (ТМГМ), метод диффузионного извлечения (МДИ). Каждый метод направлен на селективный анализ в почвах определенных групп форм нахождения химических элементов: МПФ определяет элементы, связанные с гумусом почв, главным образом, с фульво- и гуминовыми кислотами; ТМГМ – элементы, связанные с гидроксидами железа и марганца в почвах; МДИ – элементы, сорбированные глинистыми частицами почвы. Именно такой селективный анализ подвижных и слабозакрепленных форм нахождения элементов-индикаторов позволяет геоэлектрохимическим методам уверенно, на спокойном геохимическом фоне, фиксировать наложенные ореолы от геологических объектов, залегающих на глубине нескольких километров.

Для поисков месторождений углеводородов используется комплекс геоэлектрохимических и атмохимических методов в варианте анализа сорбированных углеводородных газов из образцов, отобранных для проведения геоэлектрохимических исследований из иллювиального горизонта почв и

прошедших в полевых условиях предварительную пробообработку. Для выделения и анализа сорбированных углеводородных газов из образцов разработана методика термовакуумной дегазации с последующим их определением (от метана до бутана и изобутана) на газовом хроматографе с пламенно-ионизационным детектором по стандартным методикам. Чувствительность метода достаточна для количественного определения газов из проб, отобранных в различной ландшафтной обстановке от зон вечной мерзлоты (на Крайнем Севере) до полупустынь и пустынь. Комплексная интерпретация геоэлектрохимических и атмохимических данных позволяет более достоверно проводить интерпретацию результатов комплексных съемок с выделением тектонических особенностей участков работ и площадей, перспективных на нахождение углеводородов. Дальнейшее развитие самих геоэлектрохимических технологий проводится в направлениях совершенствования техники проведения полевых работ с адаптацией полевых работ к зимним условиям. Использование различного легкого бурового оборудования позволяет в настоящее время проводить полевое опробование в любых природных ландшафтах, включая сильно заболоченные площади.

Другие исследования и разработки касаются проведения экстракции отдельных групп легкоподвижных форм нахождения элементов из проб, подготовки получаемых экстрактов к анализу и количественного их элементного анализа. Применение современного химико-аналитического оборудования (приборов для атомно-абсорбционного, спектрального многоэлементного с возбуждением атомов в индуктивно связанной плазме, рентгеноспектрального анализов, устройств для автоматической подачи проб и др.) увеличило качество и производительность лабораторных работ. Специальные приемы (анализ рядовых проб в случайном порядке, периодический анализ контрольных и стандартных образцов) позволяют избежать систематических ошибок анализа.

С целью совершенствования геологической интерпретации получаемых геоэлектрохимических данных проводится дальнейшая разработка теории формирования струйных ореолов. Математическая модель струйного ореола в виде дифференциального уравнения конвективно-диффузионного массопереноса предложена О.Ф.Путиковым [1, 5]. В рамках этой модели пространственно-временное распределение концентрации C подвижного компонента в однородной проницаемой среде при наличии вертикального конвективного переноса описывается следующим балансовым уравнением:

$$D\nabla^2 C - v\frac{\partial C}{\partial z} + W = \frac{\partial C}{\partial t}, \qquad (1)$$

где ∇^2 – оператор Лапласа; v – эффективная скорость конвективного вертикального переноса подвижного компонента; D – коэффициент диффузии рассматриваемого компонента в обводненной проницаемой среде; $W = W(x, y, z, t, C)$ – плотность пространственного распределения источников подвижного компонента; x, y, z – координаты; t – время.

Природа дальней восходящей миграции и ее механизмы представляют собой предмет специального исследования. Здесь рассматривается феноменологическое описание струйного ореола без выяснения физической сущности процессов его формирования.

Строгие решения уравнения (1) получены операционным методом и представляют собой интегралы от специальных функций в бесконечных пределах [2, 5]. Для практического использования этих решений требуется много времени и профессиональные навыки программирования. По этой причине предлагается ряд обоснованных упрощений, позволяющих получить аналитическое решение задачи.

Отрицательные значения величины W описывают поглощение рассматриваемого компонента. Поглощение типа радиоактивного распада или сорбции с постоянным коэффициентом β задается функцией $W = -\beta C$, что приводит уравнение (1) к следующему виду:

$$D\nabla^2 C - v\frac{\partial C}{\partial z} - \beta C = \frac{\partial C}{\partial t}.$$

Функция $W = -\beta C$ описывает поглощение подвижного компонента средой неограниченной сорбционной емкости, что является одним из вынужденных упрощающих допущений при выводе аналитического решения уравнения (1).

Установившийся режим струйной миграции описывается стационарным уравнением

$$D\nabla^2 C - v\frac{\partial C}{\partial z} - \beta C = 0,$$

которое подстановкой $C = \Phi\, e^{-\beta z/v}$ приводится к уравнению для функции Φ, описывающей распределение концентрации без учета поглощения подвижного компонента средой,

$$D\nabla^2\Phi - v\frac{\partial\Phi}{\partial z} = 0. \qquad (2)$$

Если пренебречь вертикальной составляющей диффузии, плоский двухмерный вариант уравнения (2) принимает следующий вид:

$$\frac{\partial^2\Phi}{\partial x^2} - \frac{v}{D}\frac{\partial\Phi}{\partial z} = 0$$

и допускает следующее решение [4, формула (10.4-36)]:

$$\Phi(x,z) = \frac{C_0}{\sqrt{z}} e^{-\frac{v x^2}{4Dz}},$$

где C_0 – постоянный коэффициент, характеризующий интенсивность источника подвижного компонента.

Величина C_0 численно равна концентрации подвижного компонента над источником на единичном расстоянии от него без учета поглощения. Функция $\Phi(x,z)$ описывает стационарный струйный ореол от сосредоточенного линейного источника, помещенного в начале координат. Горизонтальный линейный источник расположен перпендикулярно плоскости $x0z$. Рассматривая плоский ореол над антиклинальной нефтегазовой залежью, мы пренебрегаем кривизной контура залежи – источника ореола.

Обоснованием для исключения из рассмотрения вертикальной составляющей диффузии может служить сам факт образования четко локализованных струйных ореолов над объектами, залегающими на глубине в несколько километров. Этот факт свидетельствует о значительном преобладании конвективной составляющей переноса над диффузионной. При формировании струйных ореолов в пологослоистых осадочных толщах принятое допущение отражает также анизотропию среды – преобладание латеральной составляющей диффузии над вертикальной.

Функция $C(x,z)$, описывающая пространственное распределение концентрации подвижного компонента, представляет собой произведение функции $\Phi(x,z)$ на множитель $e^{-\beta z/v}$, характеризующий поглощение подвижного компонента средой:

$$C(x,z) = \frac{C_0}{\sqrt{z}} e^{-\frac{v x^2}{4Dz} - \frac{\beta z}{v}}. \qquad (3)$$

Отметим, что коэффициент C_0 входит в выражение (3) в виде множителя, определяющего амплитуду аномалии концентрации подвижного компонента. Форма аномалии не зависит от интенсивности источника.

Концентрация q сорбированных почвой вторично закрепленных форм компонента описывается формулой

$$q = q_{\max}\left(1 - e^{-\beta_s \int_0^\tau C dt}\right) = q_{\max}\left(1 - e^{-\beta_s C\tau}\right), \qquad (4)$$

где $q_{\max}$ – возможная наибольшая концентрация вторично закрепленных форм компонента; β_s – коэффициент поглощения подвижного компонента почвой, введение $\beta_s \neq \beta$ соответствует переходу от однородной среды к двухслойной, у которой верхний слой с коэффициентом поглощения β_s бесконечно тонкий; τ – возраст ореола вторично закрепленных форм.

Результаты расчетов по формулам (3) и (4) показаны на рис.1 в виде изолиний концентрации подвижного компонента C в плоскости вертикального разреза и графиков C и концентрации вторично закрепленных форм $q/q_{\max}$ по профилю над источником. В отличие от миграции подвижного компонента, процесс накопления в почве вторично закрепленных форм не имеет стационарного режима. Графики на рис.1 показывают, как аномалия вторично закрепленных форм ($q/q_{\max}$) последовательно расплывается вдоль профиля по мере увеличения возраста ореола (профиль проложен вкрест ореола). Если сначала формы аномалий C и $q/q_{\max}$ качественно не различаются, то далее аномалия $q/q_{\max}$ все в большей и большей степени приобретает черты площадной аномалии, так называемой геохимической ступени.

Выведем выражение для ширины аномалии L на половине ее амплитуды. Из формулы (4) следует, что

$$e^{-\beta_s C_{1/2}\tau} = \frac{1}{2} \quad \text{èëè} \quad \beta_s C_{1/2}\tau = \ln 2,$$

где $C_{1/2} = C(L/2,z) = \left(C_0/\sqrt{z}\right)\exp\left(-\frac{vL^2}{16Dz} - \frac{\beta z}{v}\right)$ – концентрация подвижного компонента в точках, соответствующих половине амплитуды аномалии вторично закрепленных форм компонента.

Из опыта геоэлектрохимических съемок известно, что аномалии содержаний подвижных и вторично закрепленных форм элементов в почвах фиксируются над контурами экранирующих тел – рудных или нефтяных залежей. Объясняя наблюдаемую закономерность обтеканием экранирующих тел восходящим конвективным потоком, следует предположить, что интенсивность источника пропорциональна эффективной скорости восходящего потока и площади тела в плане и обратно пропорциональна его периметру, т.е. пропорциональна среднему радиусу тела r. Предположение подтверждается эмпирической зависимостью, установленной по результатам геоэлектрохимических съемок на известных нефтяных месторождениях: $L \cong 0{,}17r$ при $z \approx 2$ км [2].

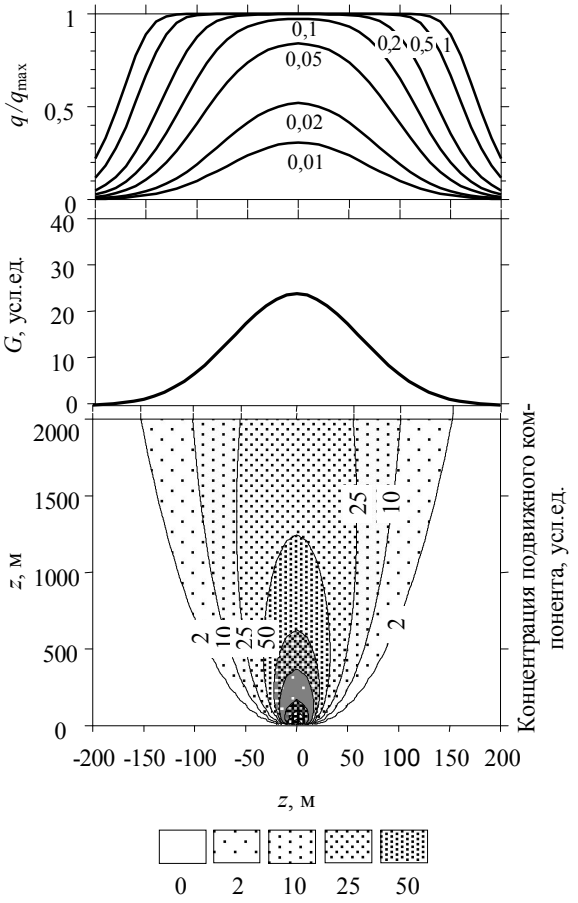


Рис.1. Результаты расчетов по формулам (3) и (4) при следующих значениях параметров: r = 2000 м; z = 2000 м; $v = 10^{-10}$ м/с; $\beta = 10^{-14}$ с$^{-1}$; $\gamma = 10^{-10}$ м$^{-2}$с. Числа около кривых $q/q_{\max}$ – значения величины $\beta_s\tau$

С учетом сделанного предположения получим решение прямой задачи – выражение для ширины аномалии вторично закрепленных форм на уровне половины ее амплитуды:

$$L = 4\sqrt{\frac{Dz}{v}\left(\ln\frac{\beta_s \gamma v r \tau}{\ln 2\sqrt{z}} - \frac{\beta z}{v}\right)},$$

где γ – коэффициент пропорциональности между величиной C_0, характеризующей интенсивность источника подвижных форм, и произведением скорости переноса v на средний радиус залежи r.

При оценке параметров струйной миграции по данным фактических измерений величины L обозначим

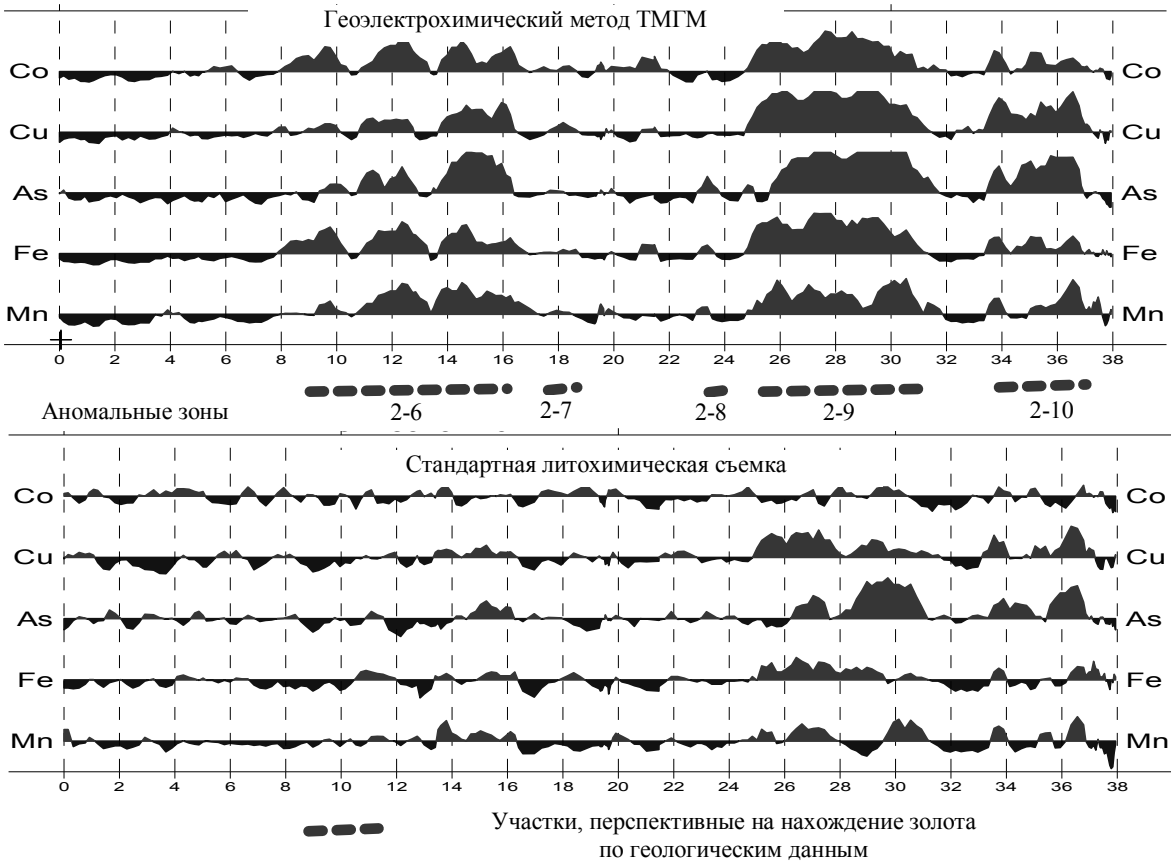


Рис.2. Сравнение результатов наблюдений ТМГМ и стандартной литохимической съемки на одном из участков, перспективных на нахождение золотого оруденения

$$\alpha = \beta_s \gamma \tau, \qquad (5)$$

поскольку нет возможности определить значение каждой из величин, входящих в произведение (5). Следует отметить только, что возраст ореола τ, очевидно, не может превышать возраст отложений.

Формула для расчета ширины аномалии вторично закрепленных форм приобретает следующий окончательный вид:

$$L = 4\sqrt{\frac{Dz}{v}\left(\ln\frac{\alpha v r}{\ln 2\sqrt{z}} - \frac{\beta z}{v}\right)}.$$

Полученное аналитическое решение прямой задачи позволяет оценить ожидаемые размеры геоэлектрохимических аномалий. Решение может быть использовано для определения параметров струйной миграции по данным геоэлектрохимической съемки на известных объектах. Расчеты ширины ожидаемой аномалии позволят оптимизировать сети опробования при проектировании работ и повысить достоверность интерпретации получаемых данных.

Наметилась тенденция увеличения с каждым годом объемов геоэлектрохимического опробования. В последние годы геоэлектрохимические технологии вновь стали применять для поисков не только месторождений углеводородов, но и твердых полезных ископаемых, в частности золота, полиметаллов, хромитов. На ряде площадей показаны преимущества геоэлектрохимических методов по отношению к стандартной литохимической съемке. Так, например, при проведении работ на территории Алтайского края, участки, перспективные на нахождение золотого оруденения, отчетливо выделяются ТМГМ аномальными концентрациями мышьяка, меди, кобальта, в то время как при валовом анализе проб этого обнаружить не удается (рис.2).

Таким образом, активно развивающиеся по различным направлениям геоэлектро-

химические технологии все более широко применяются в практике поисков твердых полезных ископаемых и углеводородов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геоэлектрохимические методы при поисках нефтегазовых и рудных месторождений / О.Ф.Путиков, Е.Г.Маргович, С.А.Вешев и др. // Зап. Горного института. 2005. Т.162. С.50-54.

2. Геоэлектрохимические технологии прогноза и поисков рудных объектов / С.Г.Алексеев, С.А.Вешев, Н.А.Ворошилов и др. // Прикладная геохимия. Вып.3. Прогноз и поиски / Ин-т минерал., геохим. и кристаллохим. редких металлов. М., 2002. С.365-382.

3. Зональность «наложенных» ореолов рассеяния металлов над нефтяными залежами / С.Г.Алексеев, С.А.Вешев, Н.А.Ворошилов и др. // Отечественная геология. 2000. № 1. С.40-43.

4. *Корн Г.* Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г.Корн, Т.Корн. М.: Наука, 1977. 832 с.

5. *Putikov O.F.* Geoelectrochemistry and Stream Dispersion: Chapter 2 / O.F.Putikov, B.Wen // Geochemical Remote Sensing of the Subsurface: Handbook of Exploration Geochemistry edited by M.Hale. Vol.7. Amsterdam, Elsevier, 2000. P.17-79.