

РОЛЬ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ БАРЬЕРОВ В ЛОКАЛИЗАЦИИ ОРУДЕНЕНИЯ И ИХ ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ ПОИСКОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ (НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПРИАМУРЬЯ)

М.И. Копылов

Федеральное государственное унитарное предприятие “Дальгеофизика”, г. Хабаровск
Поступила в редакцию 24 апреля 2008 г.

Приведены основные положения физико-химических условий природы электрических полей и электрохимических барьеров Приамурья. Дана характеристика фильтрационного и диффузионно-адсорбционного электрохимических барьеров, влияющих на процесс перераспределения рудных компонентов. Изучение естественных электрохимических барьерных явлений позволяет повысить качество геофизических методов поисков рудных месторождений.

Ключевые слова: электрические поля, электрохимические барьеры рудоотложения, месторождения, олово, золото, рудные районы, Приамурье.

ВВЕДЕНИЕ

Барьерные явления имеют весьма важную роль в процессах, происходящих в геосферах Земли как на макро-, так и на микроуровнях. Наибольший интерес представляют барьеры рудоотложения – сочетание геологических условий, определяющих процесс рудоотложения. Существует множество различного рода барьеров: геохимические, структурные, геодинамические и другие. Вместе с тем остаются неизученными электрохимические барьеры рудоотложения. В данной статье рассмотрены теоретические основы электрохимических барьерных явлений и показана их роль в процессах концентрирования и перераспределения рудных элементов на примере золотых и оловянных месторождений Приамурья.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В основу статьи положены данные опытных исследовательских и производственных работ методами ЧИМ, МДИ, МДГ и лабораторных исследований электрохимической активности, поляризуемости, электрических сопротивлений и пьезоактивности пород и руд. Краткая методика их приводится ниже.

Метод частичного извлечения металла (ЧИМ) выполнялся по отдельным профилям в Хинганском оловорудном, Кировском золоторудном районах и на россыпных месторождениях золота в Амурской области с целью поисков рудных тел и изучения электрохимических процессов. Как известно, метод частич-

ного извлечения металла (ЧИМ) основан на растворении ряда минералов горных пород и руд под воздействием электрического тока, переноса их и отложения на угольных электродах [7]. Растворение минералов с металлической связью атомов происходит в результате электрохимических реакций в области электродов. После этого происходит смешение твердой и жидкой фаз при переносе током в поровое пространство ионов, образующих с компонентами твердой фазы легкорастворимые соединения. Исследования проводились с помощью станции ЧИМ-10, источником тока служил дизель-электрический агрегат ЭСД-10-Т/230 М. Шаг измерений по профилю – 10 м. Время извлечения олова, золота в каждом цикле – 24 ч. В качестве элементоприемников использованы полиэтиленовые стаканчики диаметром 59 мм, площадь мембраны – 3 см², концентрация кислоты – 0.75–0.8 Н, объем – 150 мл, средние токи – 100–200 мА. При вычислении расчетного тока использовалась палетка.

Метод диффузионного извлечения (МДИ) проводился в Хинганском, Кировском рудных районах и на россыпных месторождениях золота с целью поисков скрытых оловорудных, золоторудных тел и изучения диффузионно-адсорбционных барьеров. Для извлечения элементов из вмещающей среды применялась сосисочная оболочка, в которую заливался раствор соляной кислоты концентрации 1Н (электролит). Через 24 часа оболочки извлекались, содержи-

мое их прямо на пункте наблюдения переливалось в стеклянные пузырьки с плотно завинчивающейся пробкой. В лабораторных условиях проводился анализ на группу элементов: Sn, Cu, Au, Fe, Ni, Zn, Pb, Ag, W, Sb, Mn.

Динамическая геофизика (МДГ) проводилась в Комсомольском оловорудном районе на зонах Соболиной, Майской, Лучистой, Ветвистой с целью определения возможностей выявления рудных зон и изучения динамики электромагнитных и электрических полей. В основу применения МДГ положены два главных принципа: 1) многократные измерения в течение суток на одних и тех же пикетах наблюдения; 2) одновременность измерений во всех сравниваемых точках [2]. Изменение суточной динамики обосновано, во-первых, тем, что многие из внешних природных воздействий, приводящих к динамике геоэлектрических и геомагнитных параметров, имеют интенсивную суточную составляющую: температура границы раздела земля-воздух, атмосферное давление, магнитотеллурические колебания, приливы и отливы и др. Общая длительность времени опроса T (опр.) не превосходила 5–10 мин на фоне суточной динамики ($T = 24$ ч) геоэлектрических и геомагнитных параметров. Длина измерительной косы (стоянка опроса) выбиралась, исходя из условий для T (опр.), и при L (опр.) = 5–10 м составляла обычно 400 м. В комплекс методов МДГ входили: метод естественно-вызванного поля (Е-ВП), метод естественно-вызванного магнитного поля (Е-ВМП) и газортутной съемки. Кроме того, проводилось измерение температуры почвы, атмосферного давления и магнитных вариаций для введения поправок за их влияние на величину электрического и электромагнитного поля.

Измерение электрических, электрохимических и пьезоактивных свойств пород и руд проводилось на образцах с помощью установок, сконструированных по типу разработанных во Всесоюзном институте разведочной геофизики (ВИРГ) [8]. Измерение удельных сопротивлений вызванной поляризации проводилось на четырехэлектродных установках с расположением электродов на одной поверхности и на торцах образцов. Величина пьезоактивности изучалась динамическим методом, основанном на использовании ультразвуковой аппаратуры (сейсмоскоп ИПА, дефектоскоп ультразвуковой импульсный (ДУК)) и пьезоэлемента – сегнетовой соли. В естественных условиях залегания пород и руд электрические и электрохимические свойства изучались при каротажных исследованиях в скважинах трехэлектродными (А10М10N) и штольнях (А2.5М2.5N) установками.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ БАРЬЕРОВ

Большое значение для образования электрических полей имеют электрические свойства пород и руд, в первую очередь, удельное электрическое сопротивление (ρ) и поляризуемость (η). Сведения об электрических свойствах пород и руд нами получены в результате многотысячных измерений ρ и η на образцах и в естественном залегании (в скважинах и штольнях) в оловорудных, золоторудных, железорудных, меднорудных районах Приамурья. В осадочном (глинистые сланцы, алевролиты, песчаники, конгломераты), эффузивном (туфы риолитов, порфиритов, туфобрекчий, туфоконгломератов) комплексах неизмененные породы характеризуются низкими значениями ρ (150–1100 Ом·м). Среднее значение поляризуемости различных образований, не имеющих в своем составе электронных проводников, колеблется от 1.0 до 3.0 %. Из метаморфизованных пород наиболее низкими значениями электрических сопротивлений (20–80 Ом·м) характеризуются графитизированные и углефицированные породы, у которых поляризуемость достигает 20–30 %. Резкое понижение электрических сопротивлений (10–100 Ом·м) наблюдается у всех разновидностей пород при наличии в них сульфидной минерализации и, соответственно, повышении поляризуемости (5–35 %). Величина этих параметров имеет прямую зависимость от количества сульфидной минерализации. Значение этих параметров для вмещающих пород и руд также зависит от их обводненности, трещиноватости и степени минерализации вод. При изучении особенностей электрического поля привлекались данные о пьезоактивности горных пород и минералов в Приамурье, полученные на образцах (около 3000). Вмещающие породы слабо дифференцированы по пьезоэлектрическим свойствам. Для песчаников и алевролитов пьезомодуль колеблется в пределах $(0.5-5) \cdot 10^{-10}$ ед. СИ, для андезитов и порфиритов $(2.5-15) \cdot 10^{-10}$ ед. СИ. Породы интрузивного комплекса также характеризуются низкой пьезоактивностью $(2-4) \cdot 10^{-10}$ ед. СИ). Средней $(10 \cdot 10^{-10}$ ед. СИ) и высокой $(40 \cdot 10^{-10}$ ед. СИ) пьезоактивностью обладают прокварцованные породы, кварциты и кварцевые жилы.

Процесс переноса рудных элементов в естественных и электромагнитных полях был исследован в Комсомольском оловорудном районе (зоны Соболиная, Майская, Лучистая, Ветвистая) при постановке динамической геофизики $\delta U_{e-вп}$, $\delta T_{e-вмп}$ и газортутной съемки с аппаратурой АГП-01. Результаты работ по зоне Соболиной наглядно иллюстрируются на примере профиля П+40 (рис. 1). Над вертикальной про-

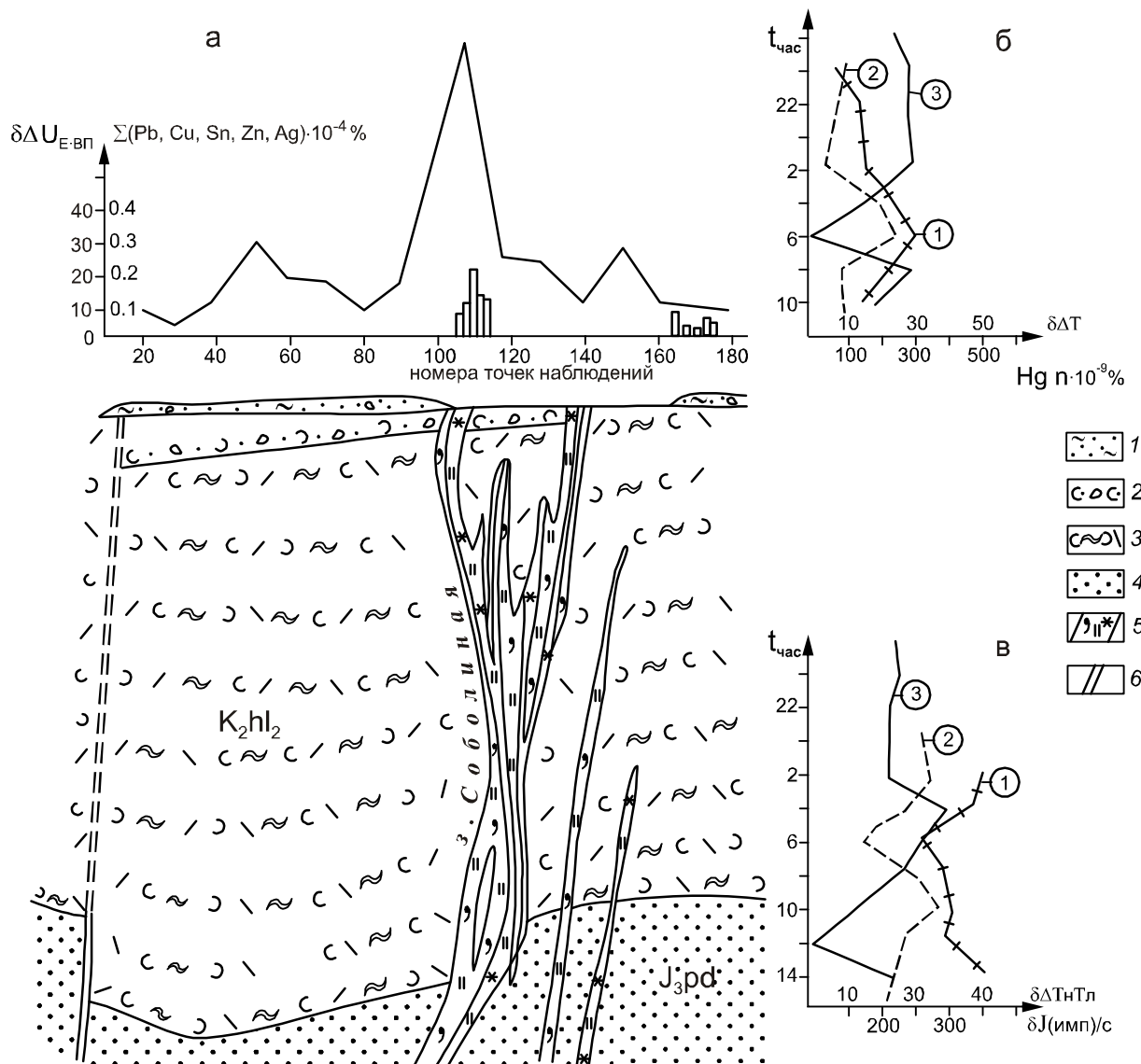


Рис. 1. Результаты работ методом динамической геофизики (МДГ) на оловорудном месторождении Соболиное (профиль П+40) Комсомольского района.

а – графики $\delta\Delta U_{E-ВП}$ и гистограммы суммарных δC (Pb, Cu, Sn, Zn, Ag) по данным химанализов, б – графики изменений концентраций паров Hg в почве (1), в воздухе (2) на фоне динамики $\delta\Delta T$ (3), в – графики изменений концентрации Sn по данным химанализов (1) и рентгенорадиометрического анализа (РРА) (2), на фоне динамики $\delta\Delta T$ (3). 1 – делювиальные отложения, 2 – туфоконгломераты, 3 – туфы риолитов холдоминской свиты (K₂hI₂), 4 – песчаники, алевролиты падалинской свиты (J₃pd), 5 – оловорудная зона кварц-серицитового и кварц-турмалинового состава, 6 – тектоническая зона.

екцией зоны на дневную поверхность наблюдаются локальные аномалии $\delta U_{e-ВП}$ и $\delta T_{e-ВМП}$ и δHg , пространственно совмещенные с аномалиями суточной динамики содержаний химических элементов (Sn, Cu, Pb, Zn, Ag) в литохимических пробах. Как видно из рис. 1, кривая изменения интенсивности ΔU носит хорошо выраженный характер и фиксирует оловорудные тела зоны Соболиной на поверхности и на глубине. Ход кривых изменения интенсивности в $\delta U_{e-ВП}$ во

времени коррелируется с кривой $\delta T_{e-ВМП}$, что свидетельствует о взаимосвязи $\delta\Delta U_{e-ВП}$ с содержанием олова. Еще более четко выражена зависимость содержания паров ртути в почвенном воздухе от тока в энергоактивном канале, характеристикой которого является естественно-вызванное магнитное поле ($\delta T_{e-ВМП}$). Оценка состава рудной зоны проводилась по данным динамической геохимии (рис. 1). Из рисунка по гистограммам следует, что наибольших значений дос-

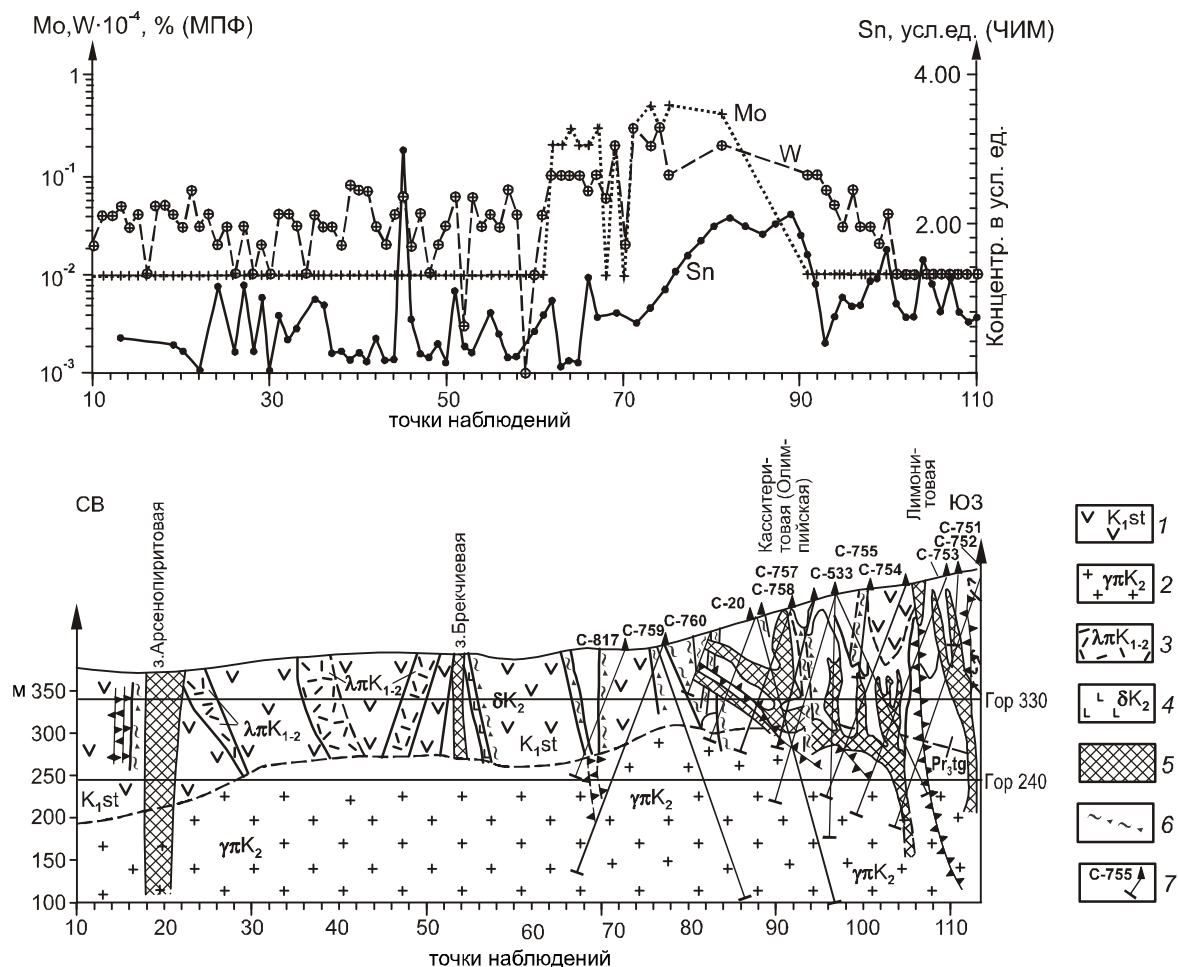


Рис. 2. Результаты работ методом ЧИМ и геохимическим методом МПФ над оловорудными зонами месторождения Каменистое.

1 – андезиты станолірської свити (K_1st), 2 – граніт-порфіри ($\gamma\pi K_2$), 3 – дайки ріолітів ($\lambda\pi K_{1-2}$), 4 – дайки діабазів (δK_2), 5 – оловоносні зони метасоматитів, 6 – зони дроблення, 7 – скважина і її номер.

тигают содержания таких химических элементов, как Sn, Cu, Zn, Ag, Pb, которые по результатам опробования также имеют повышенную концентрацию в рудной зоне. Зоны Майская, Лучистая, Ветвистая уверенно выделяются как в пространстве по статическим, так и во времени по динамическим характеристикам МДГ. Вертикальная проекция рудных зон на поверхность фиксируется четким максимумом $\delta U_{e-вп}$ и $\delta T_{e-вмп}$. Незначительное смещение максимумов относительно друг друга обусловлено влиянием рельефа. В аномальных точках профиля были исследованы динамические параметры геохимических полей. Из построенных разрезов и графиков динамических параметров видна четкая зависимость изменений содержаний паров ртути и концентрации химических элементов от токов, действующих в канале высокой проводимости, характеристикой которого является интенсивность динамики E-ВМП.

Для проверки этой зависимости было проведено математическое моделирование процесса переноса химического вещества под действием электрохимического процесса [2]. Исходя из амплитуды динамики E-ВМП (в нашем случае – 89 нТл), может быть рассчитан ток, действующий в канале высокой проводимости: $I = 2 \text{ В} / \mu_0 n$, или, переходя к плотности тока, учитывая, что радиус винтообразного канала в среднем 0.05 м [2], $I (T) = 1 (T) / \pi R^2 = 0.6 \text{ mA/cm}^2$. Согласно закону Фарадея, такой ток за время t может перенести массу вещества $\Delta M = K_{\text{э}} i \cdot s \cdot t$, где $K_{\text{э}} = 2 \text{ г/Ач}$, $t = 2 \text{ ч}$, $s = \pi R^2 = 3.14 \cdot 10^{-4}$ – площадь пробоотборника. Для нашего случая – $i = 0.6 \text{ mA/cm}^2$, масса перенесенного вещества – $8 \cdot 10^{-3} \text{ г}$, в пересчете на массу пробы 20 г это составит 0.04 %.

Рассчитанная величина удовлетворительно совпадает с результатами натурального эксперимента, что подтверждает теоретически предсказанную зависи-

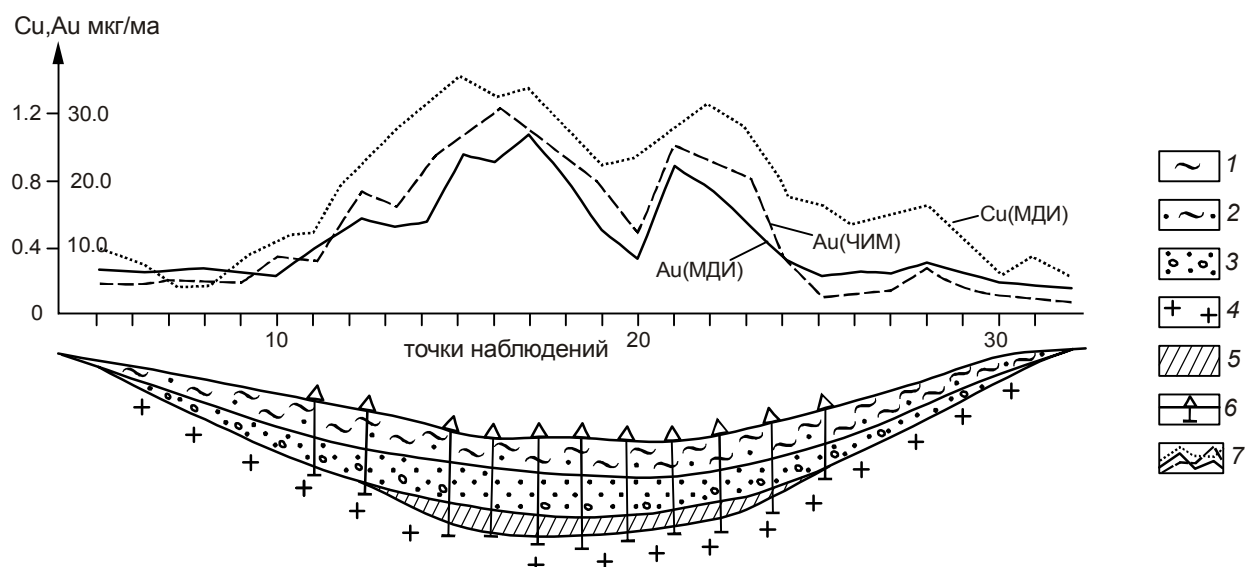


Рис. 3. Результаты работ методами ЧИМ и МДИ по извлечению меди и золота из промышленной аллювиальной россыпи Черемушный. Кировский золоторудный район.

1–4 состав аллювиальных отложений: 1 – глина, 2 – суглинки, 3 – пески, галечники, 4 – лейкократовые биотитовые граниты; 5 – пласт с промышленным содержанием россыпного золота; 6 – буровые скважины; 7 – графики содержания Au (МДИ и ЧИМ) и Cu (МДИ).

мость миграции химических элементов в верхней части земной коры от токов, действующих в каналах высокой проводимости.

Метод ЧИМ применялся на Каменистом, Березовском оловорудных месторождениях в Хинганском районе (рис. 2). На угольных электродах наиболее высокие концентрации олова, вольфрама, молибдена отлагались над зоной Олимпийской, характеризующейся промышленными содержаниями олова. Зоны Арсенипиритовая и Брекчиевая, имеющие низкие содержания олова и других элементов, слабо фиксируются методом ЧИМ. По данным геохимического метода металлоорганических подвижных форм (МПФ) эти зоны также картируются не уверенно. На месторождении Березовом ЧИМ и МПФ проведены на 1 буровом профиле. По данным ЧИМ зона “Малютка” выделяется аномалией олова интенсивностью 0.66 и 0.57 усл.ед. при фоне 0.1 усл.ед. Метод МДИ был поставлен на участке Обмани с целью определения его эффективности при поисках скрытого оловянного оруденения в составе комплекса геофизических и геохимических методов. Анализ полученных данных позволил выявить особенности поведения элементов в электрохимических процессах. Установлено, что почти во всех пробах отмечаются аномальные (до нескольких порядков относительно фона) содержания таких элементов, как марганец, железо,

барий, медь, при фоновых (кларковых) содержаниях большинства литофильных и рассеянных элементов. Это может свидетельствовать, что выше-названные элементы имеют, по-видимому, аномально высокую миграционную способность в той форме, которая извлекается методом МДИ.

По результатам проведенных опытных работ методом МДИ в Хинганском оловорудном и Кировском (Ясная поляна, Черемушный) золоторудном районах было изучено электрохимическое извлечение элементов Sn, Fe, Mn, Cu, Mg, Pb, Zn, Au из различных типов пород. Электрическим параметром, определяющим электрохимическое извлечение рудных элементов, является напряженность поля вокруг элементоприемников. В поле электрического тока поток электронов разделяется на два сопряженных во времени и пространстве потока – катодный и анодный. Продукты электрохимических реакций в катионной форме перемещаются в область катодного полюса, в анионной форме – в область анодного полюса электрического поля, где и происходит накопление рудных элементов. Степень обогащения их в растворе возрастает на несколько порядков. Аналогично происходят электрохимические процессы в районе рудных месторождений с сульфидной минерализацией. Полученные материалы позволяют использовать данные об их физической сущности при изучении

вопроса электрохимических барьерных явлений в естественных процессах, происходящих при преобразовании месторождений. К таким барьерам прежде всего относятся фильтрационные и диффузионно-адсорбционные барьеры.

ПРИРОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ БАРЬЕРОВ ПРИАМУРЬЯ (ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ)

По результатам проведенных электроразведочных работ в золоторудных, оловорудных, меднорудных районах установлено изменение интенсивности полей и плотности тока, которое влечет за собой возникновение фильтрационных барьеров. Примером существования таких фильтрационных барьеров могут служить зоны Еловая, Красивая меднорудной минерализации в Комсомольском оловорудном районе и многочисленные проявления урана, ванадия, фосфора, марганца в пределах Малого Хингана.

Фильтрационные барьеры ЕП обусловлены движением природных вод в пористых образованиях, известных в физической химии под названием потенциалов течения или “потенциалов протекания”. На границе капилляра с жидкостью, вследствие взаимодействия жидкой и твердой сред, образуется двойной электрический слой. Условиями, благоприятствующими образованию интенсивных полей, являются: большой перепад давления, высокое сопротивление вод и покрывающих, подстилающих горизонтов пород. Направление фильтрационного электрического поля определенным образом связано с направлением течения природных вод. В горизонте, по которому движутся подземные воды, наблюдается возрастание потенциала в направлении их фильтрации. Это обусловлено тем, что в увлекаемом пограничном слое воды содержится избыток положительно заряженных ионов.

Диффузионно-адсорбционные барьеры ЕП возникают под действием диффузионных потенциалов, обусловленных различной скоростью движения ионов солей из среды с большой концентрацией в среду, где концентрация соответствующих ионов меньше (рис. 2, 3). В процессе диффузии в пограничной области происходит некоторое перераспределение зарядов, в результате которого с разных сторон границы раздела накапливаются заряды разного знака. Диффузионно-адсорбционные барьеры широко представлены на железорудных месторождениях Кимканском, Сутарском, Костеньгинском и марганцевых Поперечном, Серпуховском, Столбухинском Малого Хингана и Вандана. Особенно четко это проявлено на рудном теле №1 Костеньгинского железорудного место-

рождения, где подошва рудоносного горизонта представлена железо-марганцевыми бедными рудами, центральная часть – гематит-магнетитовыми, боковые – массивными магнетитовыми рудами. Эта закономерность обусловлена в первом случае окислительной обстановкой. На диффузионно-адсорбционном барьере ЕП происходит выпадение в осадок железа и марганца, затем среда изменяется на щелочную и происходит отложение железа. В этих условиях наблюдается очищение вод от тяжелых металлов (Cu, Zn, Pb, Cd, Fe, Ag), реагирующих с H_2S и выпадающих в осадок в виде новообразований-сульфидов. В связи с этим при проведении опробования химанализами железорудных интервалов отмечаются весьма низкие содержания этих элементов.

Формирование рассматриваемых барьеров происходит за счет электродвижущих сил (ЭДС) электрохимической природы. Эти силы образуются в средах, обладающих ионной проводимостью, в пределах которых имеются минералы с электронной проводимостью (пирит, халькопирит, борнит, арсенопирит, магнетит и др.). Эта область представляет собой естественный гальванический элемент. Интенсивность естественных электрических полей будет зависеть от электрохимической активности пород и количества минералов с электронной проводимостью. Согласно предложенному способу оценки П.А. Удодовым [15] и С.Т. Бадаловым [1], нами определена электрохимическая активность осадочных пород юры, триаса, перми, девона Приамурья по отношению к ионам водорода в кислоте ($AK_{3,0}$) и в дистиллированной воде ($AB_{6,2}$): она составляет $AK_{3,0} = 3.1-3.4$ и $AB_{6,2} = 6.5-7.0$. По величине коэффициентов комплексы пород относятся к классу повышенной активности, что позволяет предполагать их активную роль в формировании ЭДС. О наиболее интенсивной активности окислительно-восстановительных процессов графитизированных горных пород Приамурья, равно как и сульфидных руд, свидетельствуют наблюдаемые над ними потенциальные поля интенсивностью 100–500 мВ. В то же время, вулканические образования (андезиты, риолиты и их туфы, игнимбриты и др.) с параметрами $AK_3 < 3.0$ и $AB_{6,2} < 6.2$ относятся к типу антиактивных, экранирующих эти электрические поля и, соответственно, так или иначе структурирующих электрохимические процессы.

Необходимым условием возникновения ЭДС и появления электрического поля во внешней среде является различие величины или знака скачка потенциала двойного электрического слоя на разных участках поляризованной поверхности. При изучении

причин, влияющих на величину ЭДС, чаще всего рассматриваются [13, 14, 17]: (1) концентрация кислорода и других газов в подземных водах; (2) окислительно-восстановительный потенциал вод, рудоносных растворов, обусловленный наличием ионов серы и железа различной валентности, а также перекиси водорода; (3) концентрация тяжелых металлов в водах рудоносных растворов; (4) концентрация сероводородных ионов в водах рудоносных растворов; (5) значения pH подземных и поверхностных вод; (6) химический состав минералов, слагающих исследуемый регион. Еще одним значимым фактором является концентрация ионов Na_2S в растворе от $n \cdot 10^{-5}$ до нормальной, что вызывает уменьшение потенциала пирита на 0.708 в, такую же величину обуславливает и изменение содержаний ионов HS в природных водах [13].

В природных условиях Приамурья, по данным геофизических, гидрохимических и экологических наблюдений, потенциал двойного электрического слоя сульфидов определяется, наряду с составом минералов, главным образом, величиной pH циркулирующих на разных глубинах вод и концентрацией сульфидных ионов в этих водах. В частности, катодные электрохимические процессы способствуют образованию зоны вторичного обогащения в виде зон вторичных сульфидов [7,12]. В анодной части сульфидных тел, расположенных в зоне первичных руд, происходят процессы растворения с выделением ионов металлов, входящих в состав сульфидов, и серы. При наличии кислорода, который в условиях высокой проницаемости в зонах минерализации Комсомольского, Кавалеровского, Баджаловского оловорудных, Кировского, Березитового, Покровского золоторудных районов может проникать на глубину до 100 м и более, в результате анодных реакций возникают окисленные минералы. По специально проведенным полевым наблюдениям в Комсомольском, Хинганском и Баджаловском оловорудных районах с привлечением скважинных, штольневых и геологических наблюдений были построены диаграммы зависимости интенсивности $\Delta U_{\text{ЭП}}$ от степени развития зон вторичного обогащения (рис. 4). Как видно из представленной диаграммы, для Комсомольского района проявлена прямая контрастная зависимость интенсивности $\Delta U_{\text{ЭП}}$ от зон сульфидного обогащения для большинства рудных зон, залегающих в осадочных (80 %) и вулканических (20 %) породах. Для Хинганского и Баджаловского районов такая зависимость выражена довольно слабо [9, 10]. Это указывает на то, что в этих оловорудных районах зоны вторичного обогащения развиты слабо.

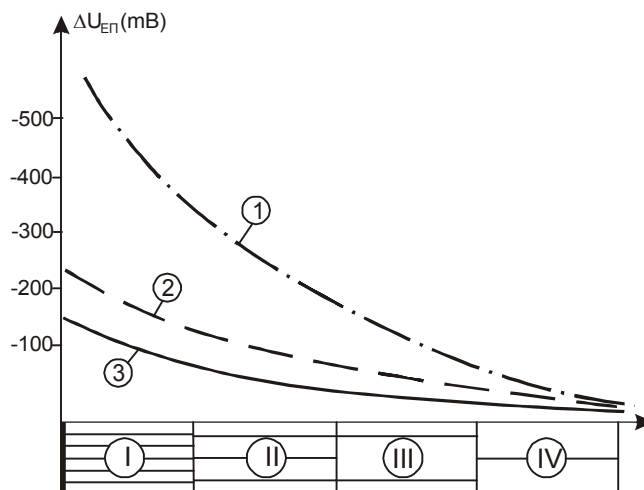


Рис. 4. Диаграмма зависимости интенсивности $\Delta U_{\text{ЭП}}$ от степени развития зон вторичного обогащения в пределах Комсомольского (1), Баджаловского (2) и Хинганского (3) оловорудных районов.

Зоны вторичного обогащения развиты: I – интенсивно, II – умеренно, III – слабо, IV – очень слабо.

При опытных работах методами частичного извлечения металлов (ЧИМ) и диффузионного извлечения (МДИ) нами наблюдалось электрохимическое растворение оловянно-сульфидных руд в рудных зонах (Лучистая, Красивая, Галенитовая, Геофизическая) Комсомольского рудного района и на Каменистом и Олонойском оловорудных месторождениях Хинганского района. Растворение характерно для тех металлов, сульфиды которых являются анодом. Так, при совместном нахождении пирита, халькопирита, галенита и сфалерита в пределах этих зон раствор обогащался свинцом и цинком (пирит и халькопирит являются катодом, а галенит и сфалерит – анодом). Согласно данным А.И. Перельмана [11], даже в дистиллированной воде происходит обогащение свинцом при наличии в ней пар минералов: галенит–сфалерит, галенит–халькопирит, галенит–пирит. Электрохимическое растворение сульфидных руд может развиваться и в бескислородной среде и протекать не только при кислых, но и при нейтральных и щелочных pH, т.е. ореолы Pb и Zn могут возникать и при отсутствии зоны окисления. Наиболее интенсивно окисляется минерал, имеющий отрицательный потенциал. Так, в паре галенит–пирит первый окисляется более интенсивно, чем в мономинеральных рудах [15].

На построенных графиках по данным извлечения МДИ и ЧИМ содержания элементов Au, Cu, Zn, Pb над современной россыпью руч. Черемушный четко выделяют тело россыпи (рис. 3). Глубина рос-

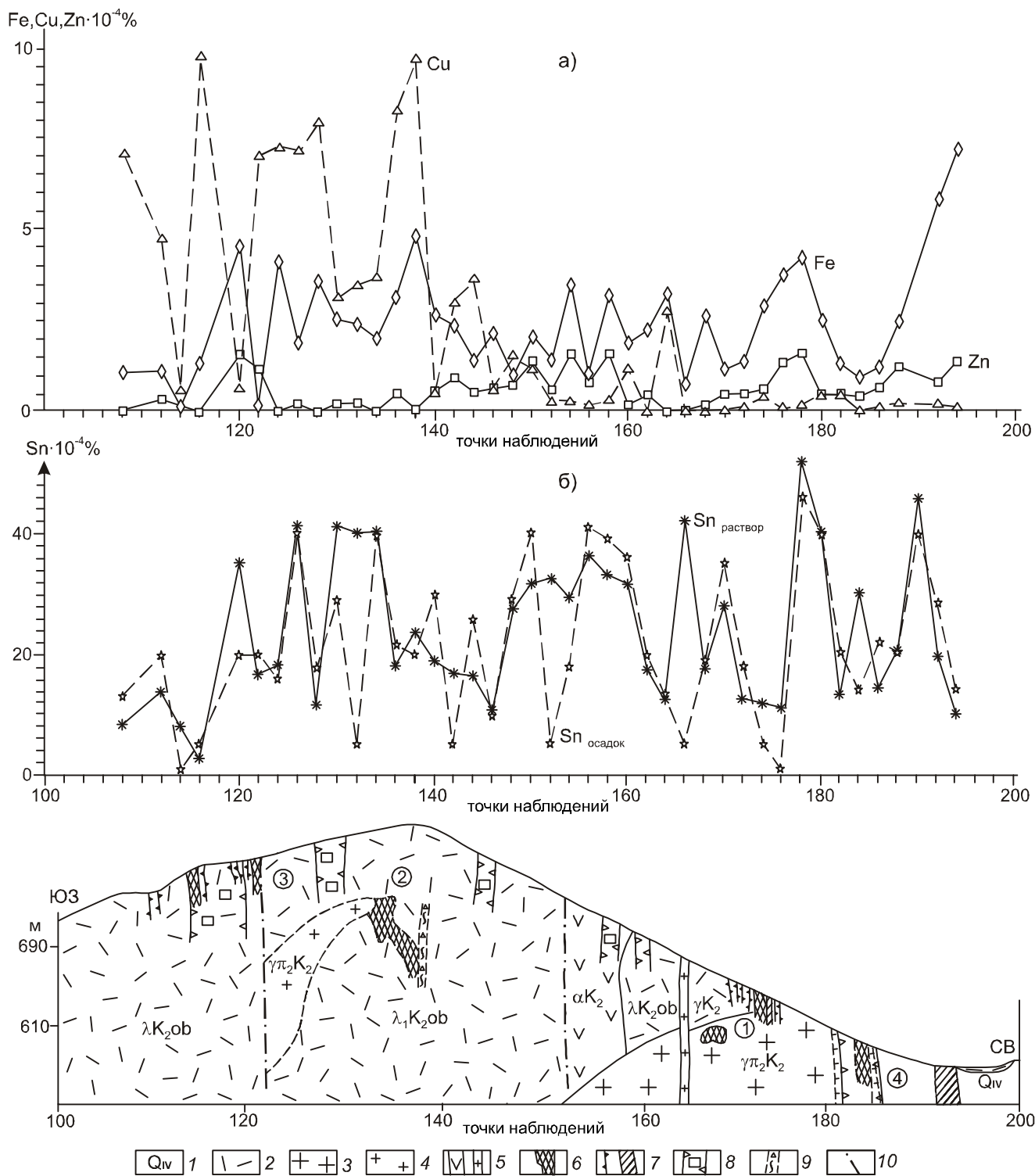


Рис. 5. Результаты работы методом МДИ по извлечению рудных элементов Fe, Cu, Zn и Sn на Олонойском оловорудном месторождении (профиль 45). Хинганский район. Содержание Fe, Cu, Zn – в растворе (а), Sn – в твердом осадке и растворе капсул (б).

1 – четвертичные аллювиальные отложения; 2 – риолиты обманьской свиты ($\lambda_1 K_2 ob$); 3 – обманьские гранит-порфиры ($\gamma \pi_2 K_2$); 4 – олонойские гранит-порфиры ($\gamma \pi_2 K_2$); 5 – дайки порфиров (αK_2) и микрогранитов (γK_2); 6 – оловорудные тела с промышленным содержанием олова: 1 – Центральное, 2 – Главное, 3 – Третье, 4 – Первое; 7 – зоны мусковит-кварцевого состава; 8 – зоны сульфидной минерализации; 9 – зоны дробления; 10 – тектонические нарушения.

сыпи колеблется от 5 до 15 м при мощности продуктивного горизонта 2–5 м. На Олонойском месторождении олова проведено МДИ по профилю 20, пересекающему все известные оловорудные зоны: Олимпийскую, Главную, Первую, Третью. На графиках концентраций Fe, Cu, Zn, полученных по химанализам из раствора капсул, четко выделяются все рудные зоны, в том числе и зона Главная, не выходящая на дневную поверхность (рис. 5). Содержание олова определено из раствора капсул и твердого осадка, в целом характеризуется более высоким фоном, на котором выделяются все известные рудные зоны.

По данным некоторых исследователей о масштабах электрохимических процессов [7], перераспределение элементов (в течение геологических периодов) приводит к накоплению их в пределах полюсов поля (барьеров) в количестве многих тонн металла. Изучение характера электрохимических барьеров проводилось на основе метода диффузионного потенциала, сущность которого заключается в том, что на границе двух сред возникает диффузионный потенциал (ДП) за счет разницы коэффициентов диффузии. В природных условиях ДП образуется на контактах кислых и щелочных сред, содержащих свободные ионы натрия, кальция, магния в сочетании с анионами хлора, сульфат- и нитрат-ионами, концентрации которых по разные стороны раздела отличаются на порядок и более. Соотношение коэффициентов диффузии этих катионов и анионов составляло 0.7–1.0, что обеспечивало отрицательный заряд той среды, где концентрация ионов меньше. Полученные результаты модельных исследований были использованы для решения вопросов, затрагивающих закономерность диффузионного переноса ионов. Эффект движения ионов против градиента их концентраций может привести к образованию участков с повышенной концентрацией металлов в зависимости от знака ДП. Обогащенные участки могут возникать на контактах различных по составу горных пород или природных вод, т.е. эти процессы можно рассматривать как образование электрохимических барьеров. В связи с этим полученные закономерности диффузионного переноса ионов (рудных элементов) и отложений их вблизи границы раздела легли в основу описания диффузионных барьеров. На границе раздела двух сред (пород) величина диффузионного потенциала варьирует от первых единиц до десятков и в ряде случаев до первых сотен милливольт. В переносе ионов вклад ДП зависит от его величины, а также от геометрии пространства, в котором он возникает. Процессы масса-переноса вещества моделировались в лабо-

ратории НПО “Рудгеофизики” [7]. Состав и концентрация растворов подбирались таким образом, чтобы в модельной системе создавались значения ДП, соответствующие природным. ДП, возникающий в системе, приводил к ускорению потока катионов в раствор азотной кислоты относительно потока ионов. Диффузионный слой нами определялся как область, имеющая размеры, определяемые скоростью рекомбинации и диффузией частиц, в пределах которой во время электродного процесса концентрация носителей отлична от равновесной, но вещество можно считать квазинейтральным.

К настоящему времени в геофизической литературе нашли отражение ряд теорий и гипотез, описываемых и объясняющих электрохимическую активность горных пород на основе рассмотрения диффузионных и мембранных потенциалов, деформации двойного электрического слоя, поверхностной поляризации глинистых частиц. В зарубежной литературе принято объяснять поляризуемость ионопроводящих пород “мембранными потенциалами”, суть которых состоит в выносе из активных зон (мембранно-диффузная часть двойного электрического слоя) ионов и скопление их у мембран. Влияние электроосмоса на электрохимическую активность пород впервые отмечено А.С. Поляковым, который указывал на возможность появления свободных зарядов в области резкого изменения скорости электроосмотического течения жидкости. Деформация двойного электрического слоя заключается в сносе с поверхности зерен диэлектрика из диффузионной части двойного электрического слоя катионов и скоплении электрических зарядов за зерном.

Для исследования электрохимических барьеров нами была применена теория явления вызванной поляризации [3–5], теория диффузионных потенциалов [13] и электрохимических процессов [7]. Описание физико-химических процессов в горной породе базируется на принципах, разработанных в коллоидной химии, электрохимии и физике твердого тела. Многолетний опыт теоретических исследований вызванной поляризации (ВП) определил трехуровневую структуру моделирования явления, обусловленную различием в скорости распространения (становления) электромагнитного поля. Особую роль в поляризации играет формирующийся вблизи границы раздела фаз двойной электрический слой (ДЭС). В геофизической литературе есть ряд работ [4], в которых рассматривается его строение. Так как вызванная поляризация связана с перераспределением зарядов в пределах токопроводящих каналов, а последними в горных породах служат главным образом ка-

пилляры, заполненные водным раствором электролита, то наибольший интерес представляет строение ДЭС на границе: твердая/жидкая фазы. В связи с этим, при взаимодействии многих минералов с жидкой фазой на их поверхности появляются заряды. Количество их меняется с изменением внешних условий, как рН раствора, вплоть до смены знака суммарного заряда твердой фазы. Кроме того, на поверхности большинства минералов-диэлектриков существуют заряды, вызванные разрывом связей при разрушении кристаллической решетки или гетеровалентным изоморфизмом ионов кристаллической решетки. Накопление элементов может происходить в пределах локальных областей – полюсов, а также на всех барьерах рудоотложения, усиливая его за счет энергии электрического поля [7, 9, 10]. Другими словами, в условиях влияния естественных полей действует геоэлектрохимический процесс, где полюса его являются естественными электрохимическими барьерами. Среди локальных электрических полей (ЕП) автором выделяются гальванические, фильтрационные, диффузионно-адсорбционные барьеры [9, 10]. Гальванические электрические поля образуются на границе раздела электронных проводников с жидкой фазой [13, 14, 17]. Различие в величине скачка электродного потенциала в различных частях электронного проводника приводит к возникновению градиента потенциала. В качестве электронных проводников в земной коре могут быть: графитизированные и углистые породы, магнетитовые, пиритовые, пирротиновые и другие сульфидные образования. Результаты этих работ показали, что подобные процессы переноса и отложение рудных элементов на барьерах могут происходить в естественных условиях при метаморфизме пород, особенно в черносланцевых толщах. Процессы трансформации и регенерации сингенетичных золото-сульфидных руд в черносланцевых комплексах, связанные с наложенными гидротермально-метасоматическими процессами, были проанализированы на ряде типовых объектов черносланцевых месторождений Узбекистана (Мурунтау, Даугызтау, Бакырчик), Сухого Лога и Неждановского, Наталкинского с целью возможного выявления на них электрохимических барьеров. Области генерации рудных элементов в пределах черносланцевых толщ могут рассматриваться первично углеродистые осадки внутриконтинентальных бассейнов, обладающих высоким геохимическим потенциалом золотой и другой минерализации вследствие высокой сорбционной способности углеродистых пелитовых образований и железистых минералов [6]. Отложение

золота и элементов группы платины (ЭПГ) в осадках могло, по-видимому, происходить и из морской воды, при ее взаимодействии с зоной сероводородного заражения [16].

В твердой среде диффузия осуществляется посредством периодического перескакивания атомов из одного положения кристаллической структуры в другое. Препятствием для скачка атомов являются энергетические барьеры. При повышении температуры возникает энергия, позволяющая преодолеть атому энергетический барьер. При значительном повышении температуры колебания атомов становятся настолько значительными, что они могут перемещаться из своих нормальных положений. В общем случае такие скачки атомов носят беспорядочный характер, но при наличии градиента химического потенциала, обусловленного в свою очередь градиентами температуры и давления или концентрации, здесь происходит направленное перемещение атомов в направлении уменьшения градиента. Так, по данным изучения естественных полей $\Delta U_{\text{ЕП}}$ на ряде сульфидно-оловяных месторождений Кавалеровского, Ямалинского, золото-сульфидных месторождений Березитового, Нижнеамурского и других районов юга Дальнего Востока, величина естественного поля достигает $-100 \div -500$ мВ, а на юге Комсомольского района – -850 мВ.

Как известно, в пределах литосферы широкое развитие имеют региональные и локальные электрические и электромагнитные поля, которые, несомненно, влияют на процесс рудоотложения, создавая электрохимические барьеры, концентрирующие богатые руды. В пределах Комсомольского, Кавалеровского, Ям-Алинского оловорудных, Кировского, Березитового, Курун-Уряхского, Дурминского золоторудных районов Приамурья, кроме локальных аномалий естественного поля ($\Delta U_{\text{ЕП}}$), связанных с рудными зонами, выделяются площадные (десятки кв. км) слабо интенсивные отрицательные аномалии. Расчетная глубина центров площадных аномальных объектов варьирует от 500 м до 5 км и более. Пространственно площадные аномалии $\Delta U_{\text{ЕП}}$ нередко совпадают с отрицательными аномалиями гравитационного и низкими сопротивлениями электрического поля по данным вертикального электрического зондирования (ВЭЗ), дипольного осевого зондирования (ДОЗ), магнитотеллурического зондирования (МТЗ), что подтверждает природу их глубинного происхождения. Подобные региональные аномалии отмечаются на Кавказе, Рудном Алтае [12]. Аномальные источники регио-

нальных $\Delta U_{\text{ЕП}}$ Ю.С. Рысс [12] отождествляет с электропроводящими зонами, уходящими корнями на большие глубины, в область преобразования вещества под действием флюидов. Это указывает на образование в пределах таких участков электрохимических процессов, подобных ЧИМ, и перераспределение в них рудных элементов. Критерием определения рудоносности выявленной аномалии $\Delta U_{\text{ЕП}}$ является ее знак (отрицательный) и величина значений (-100÷-300 мВ). Более интенсивные аномалии от -350 до -800 мВ чаще всего связаны с графитизированными и углефицированными комплексами пород. В ряде случаев при горизонтальном залегании пород, как, например, углефицированный горизонт в вулканических образованиях холдоминской свиты (Комсомольский район), восточная часть его выделяется отрицательной интенсивной аномалией -350÷-450 мВ, а западная – положительной до +250 мВ в связи с дипольной природой аномалии $\Delta U_{\text{ЕП}}$. Слабо интенсивные отрицательные аномалии $\Delta U_{\text{ЕП}}$ (-50÷-100 мВ) чаще всего связаны с бедной вкрапленной минерализацией, реже – фильтрационными барьерами, обусловленными движением подземных вод. Кроме того, интенсивными положительными аномалиями $\Delta U_{\text{ЕП}}$ (+150÷+250 мВ) выделяются подземные термальные воды. При поисках рудных зон с помощью наведенных электрических полей применяются методы вызванной поляризации (ВП), электрического профилирования (ЭП) и другие, где измеряется величина вторичного поля, усиленная за счет пропускаемого постоянного или переменного тока. Критериями по выделению рудных зон, тел по данным методов ЭП являются поля сопротивлений с пониженными значениями кажущегося электрического сопротивления (ρ_k) относительно вмещающей среды, величина которого зависит от количества сульфидной минерализации, вещественного состава среды, трещиноватости пород, обводненности и других причин. Аномалии поляризуемости являются более надежным признаком для выделения рудных зон, тел. Величина аномалии η_k над рудными телами варьирует в широком диапазоне от 3 до 25 % и имеет прямую зависимость от количества сульфидной минерализации в рудных зонах. Поскольку естественные электрические поля имеют дипольную природу (в верхней части они имеют отрицательный, а в нижней – положительный знаки), при постановке метода ЕП в скважинном варианте возможно качественное определение величины эрозийного среза рудных тел.

Высокопроводящие электрические среды являются своеобразными фидерами энергонесущих зон, в пределах которых возникают ЭДС за счет измененной интенсивности электромагнитных и электрических полей. В связи с этим, рудные концентрации могут образовываться и при наличии незначительных повышенных содержаний элементов в подземной водной среде, с обязательным наличием электрохимических барьеров одного или нескольких типов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В образовании рудных месторождений заметную роль играли электрохимические барьеры, усиливая значение геохимических и других факторов рудоотложения. Присутствие в верхней части коры значительных объемов вадозных вод в условиях существования электрических полей привело к широкому участию электрохимических процессов в перераспределении рудных элементов с явлениями переотложения и вторичного обогащения руд. Это позволяет уверенно использовать электрические методы естественных (ЕП) и наведенных (ВП, ЭП) полей и электрохимические (МДИ, ЧИМ) методы при поисках рудных месторождений. Для выделения рудных районов, узлов служат региональные отрицательные естественные аномалии $\Delta U_{\text{ЕП}}$, поля низких сопротивлений и вызванной поляризации, которые и являются одними из геофизических критериев для определения их контуров. Наиболее эффективное применение методов ЧИМ и МДИ в пределах Приамурья отмечено при поисках аллювиальных россыпей золота в современных и погребенных долинах.

Таким образом, концентрацию элементов до уровня рудопроявлений и месторождений в экзогенных и эндогенных условиях следует рассматривать и как проявление электрохимических барьерных явлений, что позволяет уверенно применять охарактеризованный комплекс методов при поисках и оценке рудных месторождений в условиях Дальнего Востока.

Автор выражает искреннюю благодарность члену-корреспонденту РАН Н.А. Горячеву, чьи конструктивные критические замечания способствовали завершению этой работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бадалов С.Т. Геолого-геохимические причины возникновения парагенезисов химических элементов в условиях образования концентраций // Актуальные проблемы геологии и геофизики. Ташкент: Изд-во ФАН, 2007. Т. 2. С. 9–12.
2. Баласанян С.Ю. Динамическая геофизика. М.: Недра, 1989. С. 10–50.

3. Геннадиник Б.И. К вопросу о нахождении ж-потенциала в тонкокапиллярных системах // Изв. вузов. Геология и разведка. 1974. № 8. С. 138–142.
4. Геннадиник Б.И., Мельников В.П., Геннадиник Г.В. Теория вызванной электрохимической активности горных пород. Якутск, 1976. С. 31–75.
5. Геннадиник Б.И. Теория явления вызванной поляризации. Новосибирск: Наука, 1985. С. 62–72.
6. Германов А.И. О возможности подземных вод в гидротермальном рудообразовании // М.: Изд-во АН СССР. Сер. геологическая. 1953. № 6. С.12.
7. Гольдберг И.С. Электрические процессы при формировании геохимических барьеров // Исследование и применение физико-химических и геоэлектрических процессов при поисках и разведке полезных ископаемых // НПО “Рудгеофизика”. 1988. С. 27–35.
8. Дортман Н.Б. Справочник. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых. М.: Наука, 1984. С. 10–135.
9. Копылов М.И. Барьеры и их роль в процессе рудоотложения // Геология и геофизика Приамурья. Хабаровск, 1997. С. 137–143.
10. Копылов М.И. Эндогенные барьеры как катализатор локализации рудных месторождений // Проблемы геологии, минеральных ресурсов и геоэкологии Западного Забайкалья. Улан-Удэ, 2007. С. 45–47.
11. Перельман А.И. Геохимия эпигенетических процессов. М.: Недра, 1968. С. 231–251.
12. Рысс Ю.С., Воронин Д.В., Гольдберг И.С. Вторичное минералообразование под действием естественного электрического поля на сульфидных месторождениях // Вести ЛГУ. № 18. 1965. С. 34–39. (Сер. геология и геофизика. Вып. 3).
13. Свешников Г.Б. Электрохимические процессы на сульфидных месторождениях. Л.: ЛГУ, 1967. С. 21–56.
14. Семенов А.С. Электроразведка методом электрического поля. Л.: Недра, 1974. С. 14–31.
15. Удодов П.А. и др. Опыт гидрохимических исследований в Сибири. М.: Изд-во “Высшая школа”, 1962. С. 17–30.
16. Холодов В.В. О роли сероводородных бассейнов в осадочном рудообразовании // Литология и полез. ископаемые. 2002. № 5. С. 451–473.
17. Якубовский Ю.В., Ляхов Л.Л. Электроразведка. М.: Недра, 1988. С. 257–262.

Рекомендована к печати Н.А. Горячевым

M.I. Kopylov

The role of electrochemical barriers in localization of mineralization, and their implications for mineral deposit prospecting (as exemplified by Priamurye deposits)

The physical-and-chemical features of the nature of electric fields and electrochemical barriers of Priamurye are described. The filtration and diffusive- adsorption electrochemical barriers are characterized, which influence the process of redistribution of ore components. The study of natural electrochemical barrier phenomena makes it possible to improve the geophysical methods of ore deposit prospecting.

Key words: electric fields, electrochemical barriers of ore deposition, deposits, Komsomolsk, Khingan, tin ore and gold ore districts.