УДК 550.379

АНАЛИЗ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СВЯЗЕЙ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И СОДЕРЖАНИЙ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ (НА ПРИМЕРЕ ОБЪЕКТОВ СРЕДНЕГО УРАЛА)

Н.П.СЕНЧИНА, *аспирантка, n_senchina@inbox.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

Проанализирована взаимосвязь электрохимических процессов коры выветривания и геохимических полей. Цель работы – оценить влияние естественных электрических полей на движение ионов металлов в горных породах. Полученные данные полевых измерений и лабораторных анализов могут помочь в оценке массопереноса под действием электрического поля и вклада электрических явлений в перераспределение химических элементов в горных породах. Наблюдаемые зависимости позволяют ответить утвердительно на вопрос о влиянии естественного электрического поля на дифференциацию элементов в породах.

***Ключевые слова*:** геоэлектрохимия, метод естественного электрического поля, геохимия.

Введение. Электрохимические процессы в горных породах относятся к числу важных факторов, контролирующих формирование и изменение минеральных фаз. Особо важную роль электрохимические процессы играют в зоне гипергенеза, где благодаря гальваническому эффекту образуются квазистационарные естественные электрические поля. В таких ситуациях возможно накопление большого количества продуктов природного электролиза [2]. При этом заряженные соединения элементов перемещаются в растворах в открытых порах и поляризуют закрытые поры в близком соответствии с законами электростатики. Предложенный материал представляет собой результат анализа небольшого объема полевых наблюдений, направленных на оценку влияния естественных электрических полей на вторичное перераспределение химических элементов в горных породах в условиях коры выветривания. Данные наблюдения необходимы для подтверждения выкладок, представленных в теоретической модели, описанной в работах [4, 5] при участии автора и кратко изложенной ниже. Некоторые важные выводы сделаны на основе анализа корреляционных связей результатов измерения потенциала естественного электрического поля и содержаний химических элементов вдоль профилей, проложенных в пределах дунитового и пироксенитового массивов на Среднем Урале.

Описание метода и результатов. В работе проанализированы результаты измерений потенциала естественного электрического поля (ЕП) и результаты химического анализа проб по двум профилям (рис.1). Профиль 1 расположен на рудном поле имени Н.К.Высоцкого в пределах платиноносного Светлоборского дунитового массива, профиль 2 пересекает массивное жильное тело титаномагнетита на массиве Качканар, сложенном пироксенитами, габбро, перидотитами. Данные получены автором в течение полевых работ 2013 г. Число точек наблюдения и отбора проб принято минимально необходимым и достаточным для достижения поставленной цели в условиях ограниченных материальных ресурсов.

Работы включают опробование рыхлых отложений верхней части коры выветривания и изучение распределения потенциала естественного электрического поля с помощью неполяризующихся электродов. Результат оценки линейной корреляции электрохимических процессов зоны гипергенеза (потенциала ЕП) с геохимическим образом указанных рудных объектов представлен в таблице.

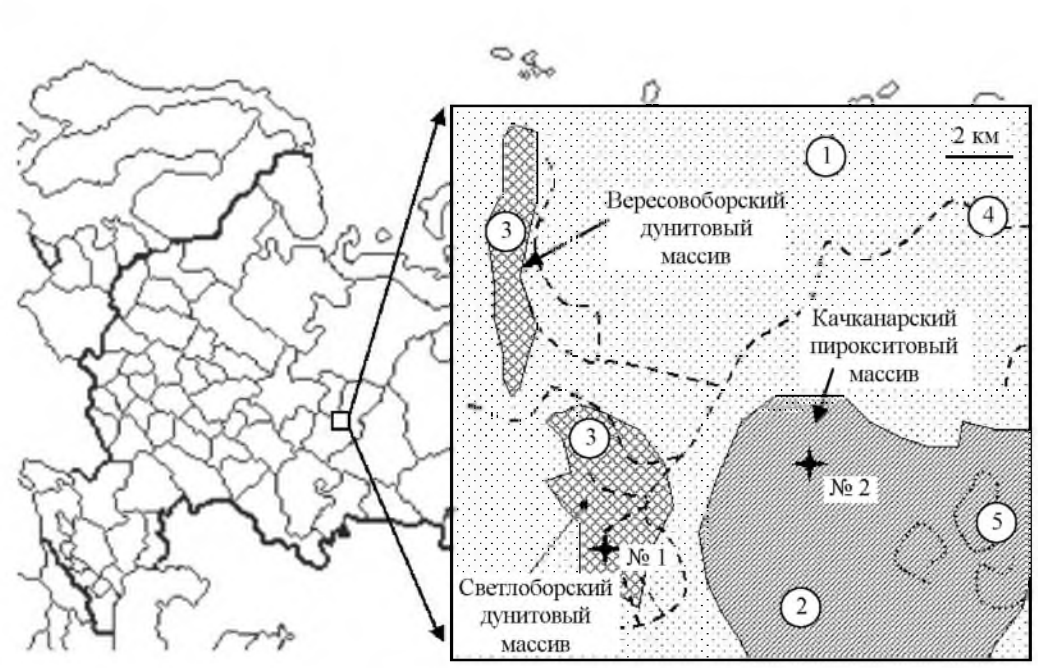


Рис.1. Положение участков работ № 1 и № 2

1 – вулканиты (ордовик); 2 – пироксениты и магнетитовые пироксениты, габбро, перидотиты; 3 – дуниты с оторочкой из габбро и пироксенитов; 4 – русла, содержащие россыпи платины; 5 – контуры карьеров Качканарского горно-обогатительного комбината

Характеристика групп элементов по коэффициенту корреляции с ЕП на профиле 2

Химический элемент	Коэффициент корреляции потенциала ЕП и содержания соответствующего элемента	Характеристика групп элементов по коэффициенту корреляции с потенциалом ЕП (границы определены с помощью критических значения коэффициента корреляции при различных уровнях значимости)
Sr	–0,63	Элементы, передвигающиеся под действием естественного электрического поля в соответствии с предлагаемой моделью
Zn	–0,47	
Cr	–0,46	
Ni	–0,37	Элементы, частично передвигающиеся под действием естественного электрического поля
Ba	–0,22	
Cu	–0,12	
Br	–0,10	Индифферентные по отношению к ЕП элементы, с незначительным коэффициентом корреляции с естественным электрическим полем
Co	–0,06	
Y	–0,03	
Fe	0,66	Элементы, распределение которых участвует в формировании естественного электрического поля (не исключено, что также зависит от ЕП, но распределение подчиняется другим закономерностям)
Ti	0,70	
Mn	0,42	

Анализируя данные ЕП, следует указать, что значения электрического потенциала в случае профиля 1 находятся в пределах от –10 до 35 мВ. Для профиля 2 значения ЕП находятся в более широких пределах, и картина измерений электрического поля соответствует зоне окисления электронного проводника – магнетита со значимым минимумом (порядка 100 мВ) над центром этого тела. Шаг измерений и отбора проб составляет 2 м при числе точек измерений 30 – на профиле 1 и 15 – на профиле 2.

Результаты анализа проб показали, что в случае профиля 1 значимой корреляционной связи измеренных содержаний элементов и потенциала ЕП не наблюдается. Однако в случае измерений на участке с более мощным полем – по профилю 2 – заметны сильные корреляционные связи между ЕП и содержаниями железа (коэффициент корреляции с ЕП ра-

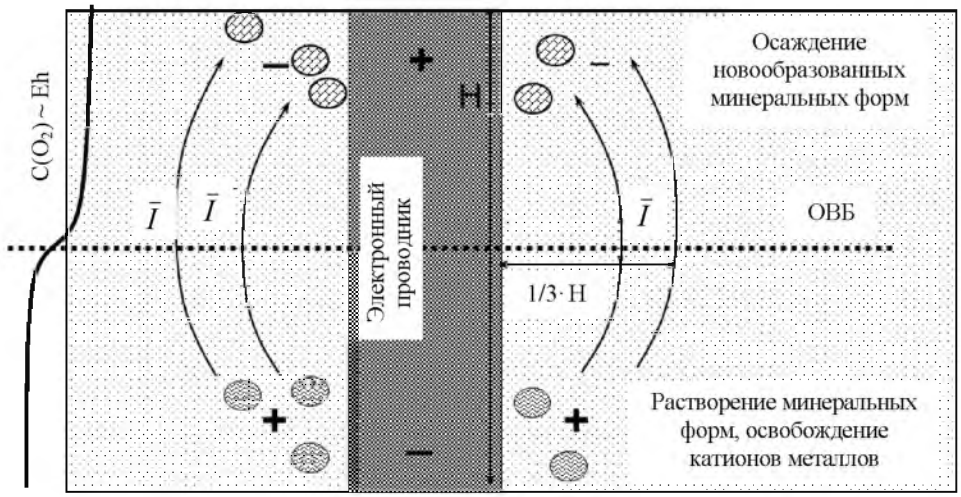


Рис.2. Схема протекания процесса и геометризованная модель, используемая в расчете (в объеме – цилиндрически симметричная относительно центральной оси рудного тела)

вен 0,66) и титана (0,70). Следует отметить, что аномалии по железу и титану нельзя считать ореолом рассеяния жильного тела, так как они имеют отрицательный знак – минимум концентрации наблюдается над телом титаномагнетита.

Важно отметить, что для других элементов коэффициенты корреляции ЕП и содержания элемента тоже достаточно высоки по модулю, но в большинстве случаев отрицательны (за исключением Mn). Таким образом, можно сделать предварительный вывод о том, что в случае слабых полей их влияние на перераспределение элементов не ощутимо. Однако заметить связь ЕП и концентраций элементов можно при перепаде значений естественного электрического поля порядка 100 мВ и более.

При этом распределение железа и титана (вероятно, и марганца) наверняка следует считать «производящим» электрическое поле, а другие элементы из отмеченных в таблице высокими коэффициентами корреляции – можно считать мигрировавшими под действием ЕП.

Это можно объяснить следующим образом: отрицательный знак коэффициента корреляции содержания элемента и потенциала ЕП говорит о том, что данный элемент мигрировал под действием электрического поля в соответствии с силами кулоновского взаимодействия, т.е. ионы металлов (имеющие положительный заряд) передвигаются к отрицательному полюсу в ионном проводнике, где и накапливаются, что проиллюстрировано рис.2.

На рис.2 изображена схема протекания процесса, возникающего в ионном проводнике (выделено точками) при наличии в его среде электронного проводника, расположенного в условиях смены потенциала, вызванной изменением концентрации кислорода с глубиной. В таком случае формируется окислительно-восстановительный барьер (ОВБ) и электронный проводник получает вертикальную электрическую поляризацию с положительным полюсом у поверхности, тогда как на окружающие породы – ионные проводники – наводится противоположный заряд [1, 3], приводящий в движение ионы, содержащиеся в поровых растворах, в соответствии с линиями тока. В связи с этим возникает закономерный вопрос, какова доля элементов и соединений, которая способна растворяться, перемещаться и накапливаться под действием квазистационарных электрических полей природного происхождения, от чего она зависит и как может быть определена теоретически.

Расчет доли перемещаемых под действием ЕП элементов. Чтобы выполнить простую количественную оценку указанных процессов, геометризуя формы и упрощая зависимости, в первую очередь прибегнем к законам Фарадея: 1) масса вещества, осажденного на электроде при электролизе, прямо пропорциональна количеству электричества, пере-

данного на этот электрод; 2) для данного электрического заряда масса химического элемента, осажденного на электроде, прямо пропорциональна эквивалентной массе элемента.

Законы Фарадея можно записать в виде следующей формулы:

$$m = (Q/F)(M/z), \quad (1)$$

где: m – масса осажденного на электроде вещества в граммах, Q – полный электрический заряд, прошедший через вещество; $F = 96485{,}338$ Кл·моль$^{-1}$ – постоянная Фарадея; M/z – эквивалентная масса осажденного вещества; M – молярная масса вещества, z – валентное число ионов вещества (число электронов на один ион).

В случае постоянного тока получим формулу

$$m = (It/F)(M/z), \quad (2)$$

где I – сила электрического тока; t – время.

Для тока в линейном проводнике

$$I = U/R = US/\rho l, \quad (3)$$

где U – разность потенциалов; R – сопротивление; S – площадь сечения проводника; ρ – удельное электрическое сопротивление проводника; l –длина проводника.

Не будем переходить к плотности тока, так как сейчас нас интересуют интегральные характеристики. С учетом средних параметров объекта моделирования и данных литературных источников, возьмем следующие их значения для упрощенной модели: разность потенциалов на концах рудного столба 100 мВ; высота рудного столба $H = 50$ м; ширина рудного столба 10 м; среднее сопротивление пород 100 Ом·м; средняя эквивалентная масса 25 г/моль; примерное время протекания процесса $3 \cdot 10^7$ лет.

Область влияния ЕП – область протекания токов в ионопроводящей среде определим из предположения, известного в теории вертикального электрического зондирования, о том, что большая часть токов протекает в области, соответствующей 1/3 величины разноса электродов, – в нашем случае для рудного столба 50:3 = 16,7 м. Объем породы, на который влияет ЕП, по формуле объема цилиндра $V = \pi \cdot 50(16{,}7)^2 = 43611$ м^3. Площадь сечения ионного проводника равна 872 м. Ток, полученный по формуле (3) при подстановке указанных параметров, равен 17,4 мА. По формуле (1) масса переносимого вещества равна 4300 т.

От общей массы того объема, в котором предполагается влияние ЕП, это значение составляет 3,6 %. Поскольку в перемещении преимущественно участвуют простые и комплексные ионы металлов, будем считать, что их доля в породах коры выветривания (за исключением «железной шляпы» и рудных тел) составляет около 5 %. Тогда доля переносимых за это время металлов равна 70 %. Соответственно, изменение времени процесса сказывается на доле переносимых металлов и итоговое содержание мигрировавших компонентов может достигать иных значений. Необходимо отметить, что данный расчет не претендует на точность, однако позволяет приблизительно оценить массу и скорость накопления перенесенных под действием электрических полей элементов. Поставленный вопрос ранее не рассматривался, в связи с чем возможности более надежного определения параметров и экспериментальный проверки результатов пока нет, но они могут появиться со временем при условии развития данного направления исследований.

Заключение. Полученные данные полевых измерений и лабораторных анализов могут помочь в оценке массопереноса под действием электрического поля и вклада электрических явлений в перераспределение химических элементов в горных породах. Доля металлов, перенесенных в ионной форме под действием длительно существующего электрического поля, в условиях высокого перепада потенциала ЕП, оценивается приблизительно как 70 %. В целом, наблюдаемые зависимости позволяют ответить утвердительно на вопрос о возможности влияния естественного электрического поля на вторичную дифференциацию элементов в породах коры выветривания ультраосновных массивов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Комаров В.А.* Геоэлектрохимия: Учеб. пособие. СПб: Изд-во Санкт-Петербург. гос. ун-та, 1994. 136 с.
2. *Нюссик Я.М.* Электрохимия в геологии / Я.М.Нюссик, И.Л.Комов. Л.: Наука, 1981. 240 с.
3. *Рысс Ю.С.* Геоэлектрохимические методы разведки (Введение в геоэлектрохимию). Л.: Недра, 1983. 255 с.
4. *Сенчина Н.П.* Перераспределение химических элементов под действием естественного электрического поля (на примере Буруктальского месторождения никеля, Южный Урал) // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия «Наука и образование». 2013. № 2. С. 57-61.
5. *Путиков О.Ф.* Условия формирования естественного электрического поля (ЕП) на месторождениях силикатного никеля кор выветривания / О.Ф.Путиков, В.Г.Лазаренков, И.В.Таловина, Н.П.Сенчина // Записки Горного института. 2013. Т.200. С.81-86.

REFERENCES

1. *Komarov V.A.* Geoelektrokhimiya (*Geoelektrochemistry*): Uchebnoe Posobie. St Petersburg: Izd-vo St Petersburg gos. un-ta, 1994. p.136.
2. *Nyussik J.M., Komov I.L.* Elektrokhimiya v geologii (*Elektrochemistry in the geology*). Leningrad: Nauka, 1981. p.240.
3. *Ryss Y.S.* Geoelektrokhimicheskie metody razvedki (Vvedenie v geoelektrokhimiyu) (*Geoelectrochemical exploration methods* (*Introduction to geoelectrochemistry*). Leningrad: Nedra.1983, p.255.
4. *Senchina N.P.* Pereraspredelenie khimicheskikh elementov pod deistviem estestvennogo elektricheskogo polya (na primere Buruktal'skogo mestorozhdeniya nikelya, Yuzhnyi Ural) (*Redistribution of chemical elements under the influence of natural electric field* (*on the example of Buruktalsky nickel deposit, Southern Urals*). Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Seriya «Nauka i obrazovanie». 2013. N 2, p.57-61.
5. *Putikov O.F., Lazarenkov V.G., Talovina I.V., Senchina N.P.* Usloviya formirovaniya estestvennogo elektricheskogo polya (EP) na mestorozhdeniyakh silikatnogo nikelya kor vyvetrivaniya (*Conditions of natural electric field* (*EF*) *formation in deposits of nickel silicate weathering crusts*). Zapiski Gornogo instituta. 2013, Vol.200, p.81-86.

THE ANALYSIS OF CORRELATION RELATIONSHIPS BETWEEN RESULTS OF NATURAL ELECTRIC FIELD AND CHEMICAL ELEMENTS CONTENT MEASUREMENTS (A CASE STUDY OF CENTRAL URALS OBJECTS)

N.P.SENCHINA, *Postgraduate student, n_senchina@inbox.ru*
National Mineral Resources University (*Mining University*), *St Petersburg, Russia*

The article analyses relationships between electrochemical processes in the weathering crust and geochemical fields to estimate the natural electric fields influence on the movement of metal ions in rocks. *In situ* and laboratory tests data can help to evaluate mass transfer under the influence of electric fields and redistribution of chemical elements in rocks due to electrical phenomena. The observed dependences allow confirming the influence of the natural electric field on differentiation of elements in rocks.

***Key words*:** geoelectrochemistry, a natural electrical field method, geochemistry.