

УДК 552.08.53(550.834)

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ СВЯЗИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД И РУДНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ НА МЕСТОРОЖДЕНИИ НАТАЛКА

В. М. Шарафутдинов, И. М. Хасанов

Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт ДВО РАН, г. Магадан
E-mail: seismolog@neisri.ru, au@maglan.ru

Впервые в истории изучения Омчакского рудного узла выполнены лабораторные замеры удельного электрического сопротивления и коэффициента анизотропии горных пород месторождения Наталка с выходом в экзоконтактные зоны. Изученными электрическими свойствами горных пород подтверждается выявленная ранее двухуровневая петрофизическая зональность, выражающаяся в монотонном изменении параметра удельного электрического сопротивления в пределах Наталкинского рудного поля (первый уровень) и в значительной дифференциации значений электрических параметров в пределах месторождения (второй уровень зональности), где также отмечается резкое возрастание коэффициента анизотропии. Отмечается зональное соответствие петрофизических параметров с наложенными процессами в горных породах северо-западного фланга Омчакского рудного узла. На исследуемой территории, возможно, действовали два разнонаправленных (с точки зрения воздействия на петрофизические параметры) процесса: углеродистый метасоматоз и кварц-сульфидная минерализация. Создана схема районирования исследуемой территории по электрическим свойствам, которая коррелируется с распределением рудной минерализации.

Ключевые слова: удельное электрическое сопротивление, коэффициент анизотропии, рудное поле, петрофизические параметры, зональность, минерализация.

ВВЕДЕНИЕ

Золоторудное месторождение Наталка находится в юго-восточной части Яно-Колымской складчатой области, в юго-западном крыле крупного складчатого сооружения – Аян-Юряхского антиклинория. Главной тектонической структурой района является Омчакский (Тенькинский) разлом, который проходит непосредственно через рудное поле. Само месторождение Наталка – одно из наиболее значительных в России по запасам; его геологическое строение, структура, геохимия и т. д. довольно подробно изучены и описаны в литературе (Ворошин и др., 1989; Калинин и др., 1992; Горячев и др., 2000; Межов, 2000; Гончаров и др., 2002; Гаштольд, 2006; Григоров, 2006; Стружков, 2006; Голуб и др., 2008). В результате ранее проведенных авторами геолого-геофизических и минералого-петрофизических исследований месторождения Наталка получены следующие основные результаты (Шарафутдинов и др., 2008. С. 100–102):

выявлена и доказана двухуровневая петрофизическая зональность Наталкинского рудного поля (петромагнитные и петроплотностные параметры). Первым уровнем является монотонное площадное изменение физических свойств горных

пород в определенном направлении, связанное с насыщением пород халькофильными и сидерофильными группами металлов и обусловленное влиянием глубинного разлома, который фиксируется выявленной авторами субвертикальной зоной проводимости. Второй уровень находит отражение в локальных аномалиях и градиентных изменениях петрофизических параметров (ПФП) в экзоконтактах рудной залежи и рудных зон, что, вероятно, связано с физико-химическими процессами их формирования. Оба уровня выявленной петрофизической зональности прослежены в пределах рудного поля по простиранию на 4 км и по падению на 800 м;

субвертикальные зоны электропроводимости фиксируют глубинные разломы, которые могут служить в качестве флюидоподводящих каналов и инициировать площадные физико-химические процессы, приводящие к резкому изменению физических свойств горных пород и руд, слагающих золоторудные поля и узлы;

рудное поле характеризуется высокими значениями ПФП, которые изучены в плане до 4–5 км и по падению на 800 м. Высокие значения магнитной восприимчивости, плотности и (частично) остаточной намагниченности могут являться индикатором наличия рудных (электропроводящих и высокоплотных) минералов;

рудные зоны характеризуются М-образным графиком поведения ПФП, но в целом повышенными их значениями и, как следствие, некоторых геофизических параметров (в частности, поляризуемости). Этот характер поведения ПФП в разрезе по падению прослеживается на 800 м и подтверждается минералогическими исследованиями.

Выявленная двухуровневая петрофизическая зональность увязывается с геохимическими данными, полученными геологическим отделом ООО «РиМ» в 2005–2006 гг., и корректно согласовывалась с геохимической моделью многоуровневой зональной рудообразующей системы месторождения, разработанной в ООО «РиМ» (Григоров, 2006).

Вышеприведенные результаты были получены на основе замеров и интерпретации в основном петроплотностных и петромагнитных параметров. Однако на исследуемой территории были выявлены субвертикальная зона проводимости, участки высокой поляризуемости, электропроводящие минералы, формирующие электрические свойства горных пород. В связи с этим целью проводимых исследований, результаты которых изложены в настоящей статье, было комплексное изучение именно электрических и анизотропных свойств горных пород Наталкинского рудного поля и вмещающих пород, а также выявление их связей с другими петрофизическими параметрами и рудной минерализацией. Для этого была создана измерительная аппаратура и разработана методика исследований.

Измерения электрических свойств горных пород образцов горных пород месторождения Наталка ранее не проводились. Кажущееся электрическое сопротивление пород Омчакского рудного узла, определяемое на основе площадных электроразведочных работ, выполненных объединением «Северовостокзолото», изменялось от нескольких единиц до десятков тысяч омметров (Круглов В. М. и др., 1985 г.).

ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ, МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Прежде чем переходить к результатам исследований, необходимо уточнить, что авторы понимают под электрическими свойствами горных пород. Удельное электрическое сопротивление ($UЭС - \rho$) – это показатель, который характеризует способность пород горных пород и полезных ископаемых пропускать электрический ток; численно оно равно сопротивлению 1 м^3 вещества электрическому току, проходящему через куб параллельно двум его граням и измеряется в Ом·м (Методическое..., 1962). Кажущееся удельное электрическое сопротивление – это «*измеряемое при электроразведочных ... работах электрическое сопротивление, зависящее от условий*

измерения, типа и размера установки и ρ пород» (Физические..., 1984. С. 149). Измеряемое удельное кажущееся сопротивление – это наблюдаемое электрическое поле, нормированное по параметрам установки таким образом, чтобы в однородном полупространстве кажущееся удельное сопротивление совпадало с удельным. «*Кажущееся сопротивление численно равно истинному удельному электрическому сопротивлению однородного полупространства, в котором при заданных расстояниях между электродами и питающем токе возникает такая же разность потенциалов, как и при измерениях над реальной неоднородной средой*» (Физические..., 1984. С. 27).

Отбор образцов для замера электрических свойств осуществлялся из коллекции лаборатории геофизики (Шарафутдинов В. М., 2002 и 2005 г.) по отдельным профилям, пересекающим предполагаемый выход на поверхность субвертикальной проводящей зоны, охватывающей Наталкинское рудное поле, и с выходом за ее пределы, а также по кернам из 6 скважин бурового профиля +20. Общее количество образцов 247 шт., отобранных со 140 точек, в том числе с поверхности 173 образца из 66 точек и из керна скважин 74 образца в диапазоне глубин от 2,0 до 600 м, с шагом от 11 до 43 м (в зависимости от сохранности керна). Данные по поверхности для каждой точки усреднялись по 2–3 образцам, по скважинам один образец соответствует одной точке наблюдения.

Измерения удельного сопротивления образцов горных пород проводили при помощи двухэлектродной установки в соответствии с существующим нормативным документом (Методическое..., 1962). Измерительная установка состоит из блока питания, измерительного цифрового комбинированного прибора ЦК 4800, двухэлектродного измерительного устройства, исследуемого образца и соединительных проводов. Для измерения сопротивления образцов использовали измерительный цифровой прибор (ЦК 4800), принцип действия которого основан на измерении напряжения при пропускании постоянного электрического тока в образце; измеряемое напряжение постоянного тока пропорционально сопротивлению, диапазон измерений по параметру сопротивления составляет от 0,00001 до 20 000 кОм (Инструкция..., 1990).

Образец горной породы представлял собой кубик с гранью 2 см. Electroды, через которые пропускался постоянный электрический ток, располагались симметрично друг другу с противоположных сторон образца. Измерения проводили в двух взаимно перпендикулярных положениях образца; таким образом определялось электрическое сопротивление образца в продольной и поперечной плоскости, принятое нами в дальнейшем как продольное и поперечное сопротивление.

Удельное электрическое сопротивление (ρ) при этом вычислялось по известной формуле (Методическое..., 1962):

$$\rho = R \cdot S / L,$$

где R – замеренное сопротивление образца, Ом; S – поперечное сечение образца, м^2 ; L – его длина, м.

Так как образец представляет собой куб с ребром 0,02 м, то окончательный расчет удельного сопротивления упрощается до вида:

$$\rho = 0,02 \cdot R.$$

В силу того что образцы пород обладают неоднородным строением (слоистостью, вкрапленностью и т. п.), т. е. анизотропны, то для представления и последующего анализа материалов были рассчитаны среднее квадратическое сопротивление (ρ_m) среды (называемое средним сопротивлением анизотропной среды) и коэффициент анизотропии (λ), по приведенным формулам (Методическое..., 1962):

$$\rho_m = \sqrt{\rho_t \cdot \rho_l}, \quad \lambda = \sqrt{\rho_t / \rho_l}$$

где ρ_t и ρ_l – соответственно поперечное и продольное удельное сопротивление образца.

Известно, что в естественном залегании (ниже уровня грунтовых вод) поровое пространство горных пород насыщено водой (Физические..., 1984).

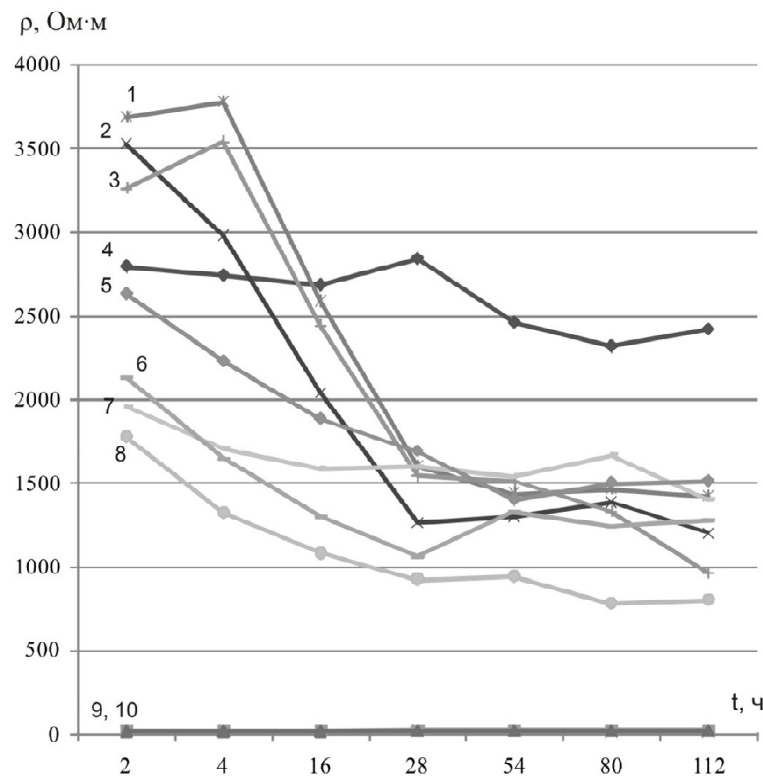


Рис. 1. Изменение удельного сопротивления образцов в зависимости от времени насыщения водой их порового пространства: 1, 7, 8 – песчаник; 9, 10 – аргиллит; 4 – дайка; 2, 3, 5, 6 – диамиктит

Fig. 1. The changing resistivity in samples versus the time of their pore space saturation with water: 1, 7, 8 – sandstones; 9, 10 – argillites; 4 – dykes; 2, 3, 5, 6 – pebble siltstones

При этом в условиях юго-востока Яно-Колымской складчатой системы (ЯКСС) до глубины 100–150 м породы довольно часто находятся в мерзлом состоянии. В целях учета этого явления и выбора оптимального режима измерения образцов предварительно (в процессе опытно-методических работ) были выполнены экспериментальные исследования образцов в следующем порядке:

1) отобрана группа из 29 образцов по всей территории работ, представляющих различные горные породы, имеющих различный минеральный состав и, как следствие, различное удельное сопротивление;

2) измеряли сопротивления этой группы образцов в сухом состоянии, при средней температуре образцов 20°C и в сухом, но мерзлом состоянии при средней температуре образцов -15...-25°C;

3) измеряли эту же группу образцов после насыщения их пористого пространства пресной водой в течение 2, 4, 16, 28, 54, 80 и 112 ч при средней температуре образцов 20°C;

4) измеряли эту же группу образцов после насыщения их пористого пространства пресной водой в течение более 54 ч при средней температуре образцов -15...-25°C.

В результате экспериментальных работ установлено следующее:

в сухом состоянии образцы характеризуются очень высоким сопротивлением – в десятки тысяч Ом, а у значительной части образцов сопротивление более 20 тыс. кОм и оно не может быть достоверно измерено используемой аппаратурой. По исследованным образцам выявлено, что в мерзлом состоянии сопротивление «сухих» образцов увеличивается в среднем в 1,87 раза (от 1,2 до 2,97);

оптимальными следует считать измерения, проведенные не менее чем через 54 ч насыщения образцов водой; именно после этого срока замачивания измерения параметра сопротивления выходят на асимптоту и становятся стабильными (наиболее характерные образцы – на рис. 1);

водонасыщенные образцы, находящиеся в мерзлом состоянии, имеют более высокие значения сопротивления (в среднем на 32%), чем в талом состоянии. При этом повышения сопротивления малопористых образцов в мерзлом состоянии, имеющих относительно пониженные (аргиллиты, в том числе содержащие углеродистое вещество) – до 120 Ом·м и повышенные (мелкозернистые песчаники) – более 2500 Ом·м значения, незначительны и составляют соответственно 7 и 15%. Наиболее значительные расхождения – до 43% выявлены при измерении более

пористых образцов (алевролиты, диамиктиты, песчаники), характеризующихся невысокими (в среднем от 500 до 2000 Ом·м) значениями сопротивления (см. таблицу).

Отметим, что при промерзании происходит закономерное несущественное повышение сопротивления у различных групп пород, однако пропорциональные зависимости между ними сохраняются, поэтому в целом при настоящих исследованиях этим повышением можно пренебречь.

Таким образом, экспериментальные исследования подтверждают закономерности поведения параметра сопротивления в обводненных талых и мерзлых горных породах, выявленные ранее А. Д. Фроловым (1976) и В. С. Якуповым (2000). Согласно их исследованиям, *«удельное сопротивление скальных пород при промерзании возрастает в среднем не более чем в 10 раз и редко превышает 10 000 Ом·м. С увеличением доли и абсолютного количества прочносвязанной воды в породе – от песчаников к алевролитам, от измененных пород к неизменным – величина скачка удельного сопротивления при промерзании падает, иногда такой скачок вовсе не имеет места»* (Якупов, 2000. С. 61). Эти сведения подтверждают и полученные авторами экспериментальные данные. Они полностью опровергают мнение о том, что Наталкинское *«месторождение золота разрабатывается в многолетне-мерзлых породах с очень высоким удельным электрическим сопротивлением пород – в десятки – сотню тысяч Ом·м»*, высказанное Ю. Я. Ващиловым (2007. С. 54).

На основе экспериментальных исследований разработана следующая методика массовых замеров удельного сопротивления образцов:

1) отбор коллекции образцов, характеризующих всю исследуемую территорию;

2) распиловка образцов на кубики с гранью 0,02 м;

3) замачивание образцов в пресной воде в течение 54 ч;

4) измерение сопротивления образцов в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, т. е. измерение продольного и поперечного сопротивления;

5) расчет удельного сопротивления и коэффициента анизотропии образцов;

6) определение погрешности измерений.

В результате исследований проведены замеры 247 образцов из 66 точек отбора и 6 скважин, по профилям общей протяженностью 38 км, на территории Наталкинского рудного поля, северо-западного фланга Омчакского рудного узла и его обрамления, на глубину до 600 м (абс. отм. 350 м). В процессе исследований осуществлялись контрольные замеры, которые составили по объему 12,1% от общего количества замеров (по нормативу (Физические..., 1984) 5–10%). Относительная погрешность замеров сопротивления составила 6,26% при нормативной 5–10% (Физические..., 1984).

Результаты петрофизических наблюдений обработаны программным комплексом спектрально-корреляционного анализа данных – КОСКАД (Петров, Никитин, 1990) для выделения и уточнения зависимости ПФП между собой и рудной минерализацией.

Электрические свойства горных пород Наталкинского рудного поля при положительных и отрицательных температурах

The electrical properties of rocks from the Natalka Ore Field under temperatures above and below zero

№ образца	Значения УЭС в Ом·м при температуре		Порода
	+25°C	-25°C	
1	2800	3222	Диамиктит
2	2420	2419	Алевролит
3	1004	945	Аргиллит
4	114	123	Диамиктит
5	74	119	То же
6	82	107	«
7	21,8	19	Алевролит
8	18,8	16	То же
9	960	1999	Диамиктит
10	1200	1659	Аргиллит
11	1420	2399	Сланец алевроглин.
12	802	899	Диамиктит
13	900	1469	То же
14	960	1599	«
15	776	1149	«
16	880	1115	«
17	830	981	«
18	760	779	«
19	690	1099	«
20	1200	1939	Песчаник
21	910	1239	То же
22	1400	1699	«
23	860	1265	«
24	1276	2559	«
25	1510	1693	Диамиктит
26	3240	3559	Андезит (дайка)
27	1312	1619	Диамиктит
28	1490	1599	То же
29	3080	3143	Андезит (дайка)

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛУЧЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Для изучения распределения электрических свойств горных пород Омчакского рудного узла и их соотношения с выявленной ранее (Шарафутдинов, Хасанов, 2008) субвертикальной зоной проводимости в процессе интерпретации по параметру кажущегося удельного сопротивления и геологическим данным была создана схема районирования исследуемой территории (рис. 2). На схеме первой зоной («вмещающие») обозначены породы за пределами проекции субвертикальной проводящей зоны; второй зоной («рудный узел») является периферийная часть Омчакского рудного узла. Третья зона («рудное поле») располагается в центральной части рудного узла, выделена по параметру повышенного УЭС и близка к границам Наталкинского рудного поля (Калинин, 1992),

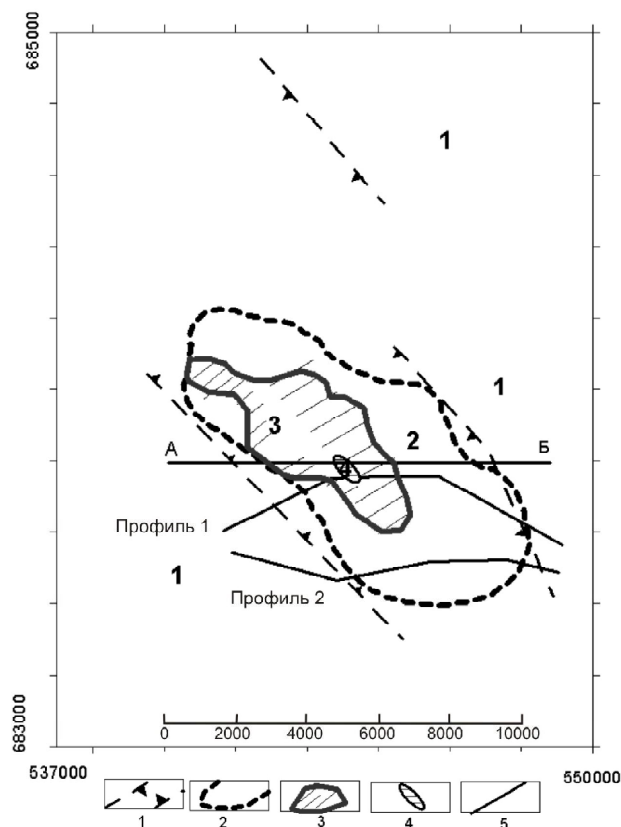


Рис. 2. Районирование по параметру сопротивления: 1 – проекция на поверхность субвертикальной зоны проводимости; 2 – граница северо-западного фланга Омчакского рудного узла; 3 – контур Наталкинского рудного поля; 4 – рудная залежь месторождения Наталка; 5 – линии профилей. Цифры на схеме: 1 – «вмещающие», 2 – «рудный узел», 3 – «рудное поле», 4 – «рудная залежь»

Fig. 2. The resistance character areas: 1 – a projection onto the surface of the subvertical conductivity zone; 2 – the northwestern bounds of the Omchak Mineral Area; 3 – the Natalka Ore Field area; 4 – the Natalka Lode; 5 – profiling. Figure indications: 1 – «host rocks», 2 – «ore district», 3 – «ore field», 4 – «lode»

четвертая зона («рудная залежь») – рудная залежь месторождения Наталка (Григоров, 2006). Представительность интерпретационных зон следующая: 1-й зоны – 25 замеренных образцов, 2-й – 18, 3-й – 83, 4-й – 47.

В результате исследований установлен ряд закономерностей в распределении параметров УЭС и $K_{ан}$ как в границах проводящей субвертикальной зоны, охватывающей Омчакский рудный узел, так и за ее пределами.

Образцы, отобранные за пределами проводящей зоны, обладают повышенным (1200–3000 Ом·м) сопротивлением и низким $K_{ан}$ (1,1–1,35). Образцы, отобранные в пределах проводящей зоны (и, соответственно, Омчакского рудного узла), характеризуются дифференцированными, но в целом пониженными значениями удельного сопротивления (20–1000 Ом·м) и повышенными значениями $K_{ан}$ (1,4–2,6). Обобщенные (для проводящей зоны и за ее пределами) гистограммы сопротивления и $K_{ан}$ образцов приведены на рис. 3.

Гистограммы УЭС и $K_{ан}$ для образцов, отобранных по поверхности, представленные как среднее арифметическое групп, которые характеризуют горные породы, распространенные по профилю А–Б (см. рис. 2) как за пределами проводящей зоны (рис. 4, гистограммы 1, 7), так и в самой зоне (рис. 4, гистограммы 2–6), указывают на закономерное зональное распределение электрических параметров. В пределах проводящей зоны от периферии к центру наблюдаются М-образное поведение параметра УЭС и последовательно увеличивающиеся значения $K_{ан}$.

Установленный характер поведения электрических параметров объясняется, возможно, следующим образом:

1) образцы, отобранные с периферийных частей проводящей зоны (см. рис. 4, гистограммы 2 и 6), характеризуются самым низким сопротивлением (20–500 Ом·м) и $K_{ан}$ (1,35–1,4) и, очевидно, отображают области распространения «регионального» углеродистого метасоматоза, характерного для рудного узла в целом (Семенов, 1974; Жамалетдинов, Семенов, 1978);

2) образцы центральной части (см. рис. 4, гистограммы 3 и 5), обладающие повышенным сопротивлением (1200–1400 Ом·м) и $K_{ан}$ (1,3–1,5), возможно, характеризуют участки гидротермально-метасоматически измененных пород с повышенной концентрацией кварц, кварц-карбонатного прожилково-жильного материала, типичных для площади рудного поля;

3) образцы зоны «рудная залежь» (см. рис. 4, гистограмма 4) обладают пониженным сопротивлением (до 650 Ом·м) и самым высоким $K_{ан}$ (более 1,6), что, по-видимому, свойственно наиболее измененным породам, возможно, приуроченным к линейным минерализованным (сульфидизированным, графитизированным, окварцованным) зонам

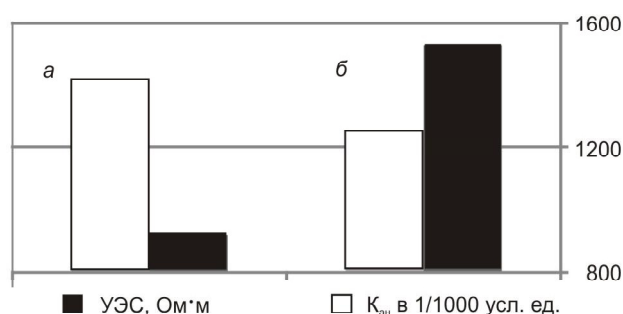


Рис. 3. Гистограммы УЭС и $K_{ан}$ образцов в границах проводящей зоны (а) и за ее пределами (б)

Fig. 3. The SER and $K_{ан}$ histograms of samples within conductivity zone (а) and outside it (б)

дробления (Семенов, 1974; Жамалетдинов, Семенов, 1978);

4) обобщенные (среднее арифметическое по группе) гистограммы всех исследованных по поверхности образцов, систематизированные (см. выше) в последовательности: «вмещающие» – «рудный узел» – «рудное поле» – «рудная залежь», фиксируют зональное распределение электрических параметров (рис. 5).

Приведенные материалы позволяют по петрофизическим данным выделить 4 группы горных пород, слагающих северо-западный фланг Омчакского рудного узла (РУ) и прилегающие к нему территории, которые характеризуются разным значением УЭС и $K_{ан}$. Минералого-петрографические описания этих групп выполнены Т. И. Мухомовой (2007 г.).

К первой группе могут быть отнесены неизмененные и слабоизмененные горные породы, развитые за пределами рудного узла, – «вмещающие». Им свойственно высокое сопротивление (свыше 1500 Ом·м) и относительно пониженное значение $K_{ан}$ (1, 2). Образцы этой группы (25 шт.) представлены преимущественно грубозернистыми породами атканской свиты – песчаниками с туфогенной примесью, песчанистыми алевролитами с гравийной примесью и алевролитистыми глинистыми сланцами с редкой песчанистой и туфогенной примесью.

Вторая группа – измененные в разной степени горные породы рудного узла в целом с низким УЭС (70 Ом·м) и повышенным $K_{ан}$ (1,4). Образцы (18 шт.) представлены преимущественно тонкозернистыми разностями горных пород: углито-глинистыми сланцами и аргиллитами с редкой алевролитистой примесью, алевролитистыми аргиллитами, иногда с тонкой вкрапленностью сульфидов, реже алевролитами с редкой вкрапленностью сульфидов.

Третья группа – измененные породы рудного поля с повышенным сопротивлением (1300 Ом·м) и $K_{ан}$ (более 1,4). Образцы этой группы состоят из измененных окварцованных диамиктитов,

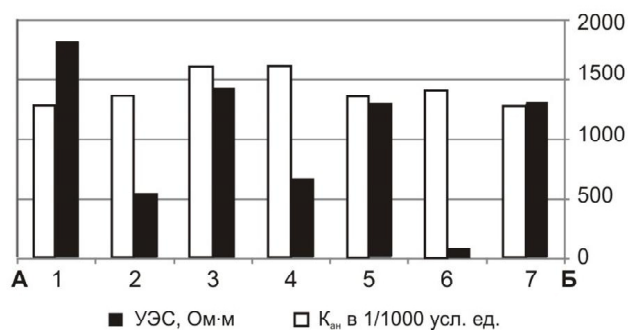


Рис. 4. Гистограммы УЭС и $K_{ан}$ по профилю А–Б (см. рис. 2). Темное – УЭС (Ом·м), светлое – $K_{ан}$ (1/1000 усл. ед.)

Fig. 4. The SER and $K_{ан}$ histograms over the A–B profile (see Fig. 2). The SER is dark (Om·m), the $K_{ан}$ is light (1/1000 conventional units)

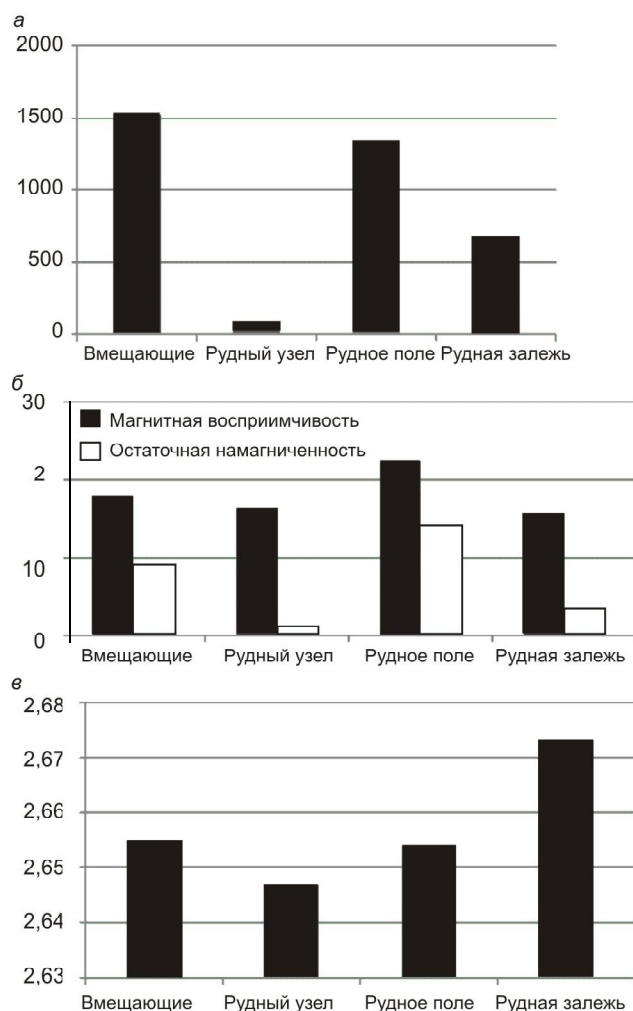


Рис. 5. Гистограммы УЭС, Ом·м (а), магнитных параметров, $1 \cdot (1/4\pi) \cdot 10^{-6}$ СИ (б) и плотности $1 \cdot 10^3$ кг/м³ (в) образцов по территории Омчакского рудного узла и его ближайшего обрамления

Fig. 5. The SER (а), magnetic parameters (б) and density (в) histograms of samples taken from the Omchak Mineral Area and its rimming structures. Specific resistance – Ом·m, magnetic parameters – $1 \cdot (1/4\pi) \cdot 10^{-6}$ SI, density – $1 \cdot 10^3$ kg/m³

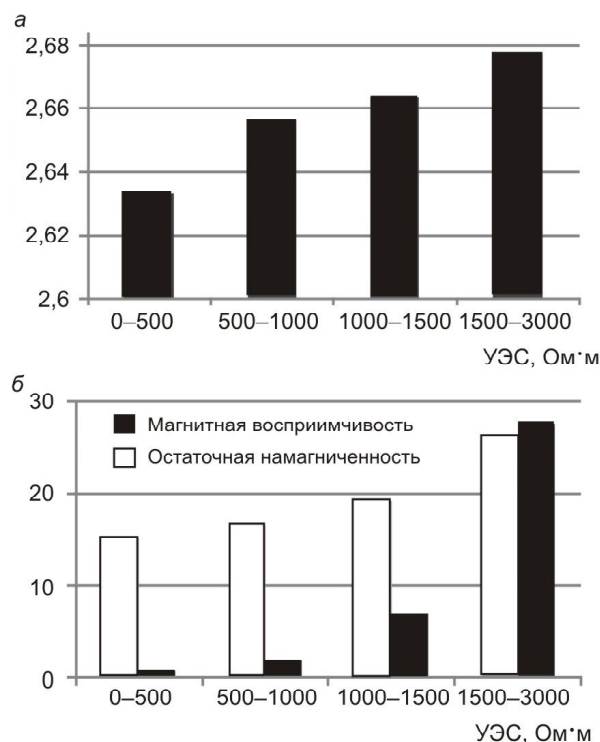


Рис. 6. Зависимость распределения и плотности, $1 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ (а) и магнитных параметров, $1 \cdot (1/4\pi) \cdot 10^{-6} \text{ СИ}$ (б) от удельного сопротивления в образцах, отобранных по поверхности Омчакского рудного узла

Fig. 6. The magnetic parameters (a) and density (б) versus the electrical resistivity in samples taken from the surface of the Omchak Mineral Area. Specific resistance – $\text{Om} \cdot \text{m}$, magnetic parameters – $1 \cdot (1/4\pi) \cdot 10^{-6} \text{ SI}$, density – $1 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$

реже из окварцованных песчаников, еще реже из диамиктитов и алевролитов с тонкой сульфидной вкрапленностью. В 82 образцах этой группы пород количество новообразований кварца, серицита, хлорита и карбоната составляет примерно от 10 до 25% от объема породы.

Четвертая группа – это интенсивно измененные породы самой рудной залежи, которым присущи низкое сопротивление (не более $650 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) и высокие значения $K_{\text{ан}}$ (около 1,6). Образцы представлены в основном сульфидизированными и окварцованными диамиктитами, измененными песчанистыми алевролитами с тонкой вкрапленностью сульфидов (иногда с линзочками пирита). В 45 образцах этой группы содержание новообразованных минералов увеличивается от 25–30 до 50%.

Магнитные параметры и плотность (см. рис. 5) хорошо коррелируются с выделенной зональностью электрических свойств. Особенно стоит подчеркнуть наличие взаимосвязи петрофизических характеристик и их зональное соответствие (генетическая связь?) площадям развития в различной степени измененных пород Омчакского рудного узла. Так, углефицированные толщи Омчакского рудного узла характеризуются уменьшением магнитных, плотностных и электрических

(низкое УЭС и высокий $K_{\text{ан}}$) параметров (образцы 2-й группы). В то время как участки метасоматически измененных пород, несущих преимущественно кварц-сульфидную минерализацию, в пределах «рудного поля» – «месторождения» идентифицируются в целом повышенными петрофизическими параметрами (образцы 3-й и 4-й группы горных пород). При этом повышенное удельное сопротивление и относительно пониженная плотность характеризуют 3-ю группу пород, образцы которой преимущественно окварцованы, а относительно пониженное сопротивление и высокая плотность образцов 4-й группы, по-видимому, обеспечивается относительно повышенной концентрацией сульфидов в образцах этой группы. Распределение ПФП в образцах, отобранных с поверхности по всей территории Омчакского рудного узла (рис. 6), показывает, что с уменьшением сопротивления (менее $500 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) уменьшаются и магнитные параметры (менее $1,19 \cdot 10^{-6} \text{ СИ}$), и плотность (до $2,63 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$). Это подтверждает выделенный ранее (Шарафутдинов, Хасанов, 2006) первый уровень петрофизической зональности, который отображается в монотонном изменении ПФП в определенном направлении. Образцы, составляющие группу пород с УЭС менее $500 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, представлены углисто-глинистыми сланцами, аргиллитами с алевролитистой примесью, содержащими УВ, иногда с тонкой сульфидной вкрапленностью. Образцы пород в диапазоне УЭС от 500 до $1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ состоят преимущественно из измененных окварцованных диамиктитов с тонкой вкрапленностью сульфидов и окварцованных сульфидизированных песчаников. Образцы пород с УЭС от 1000 до $1500 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ представлены кварцевыми диамиктитами, окварцованными тонкозернистыми песчаниками, метасоматитами со слюдисто-кварцевыми просечками и тонкой вкрапленностью сульфидов. Образцы пород с УЭС более $1500 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ в основном состоят из диамиктитов с тонкой сульфидной (изолированной) вкрапленностью и измененных окварцованных диамиктитов. Таким образом, можно предположить, что понижение сопротивления среды, сопровождающееся понижением магнитных, а главное – плотностных параметров, в основном связано с увеличением углефицированного вещества (УВ), являющегося производным от процессов углеродистого метасоматоза, приуроченного к глубинному разлому. А повышение сопротивления, магнитных и плотностных параметров связано с процессами кварц-сульфидной минерализации, которые в плане корреляции ПФП между собой являются разнонаправленными.

Взаимозависимость петрофизических параметров в вертикальной плоскости (рис. 7) рудной залежи (буровой разрез +20 до глубины $600\text{--}700 \text{ м}$) показывает, что образцы с низким сопротивлением (до $1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) характеризуются весьма вы-

сокой плотностью (более $2,79 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$) и магнитной восприимчивостью (более $1,75 \cdot 10^{-6} \text{ СИ}$). Эта группа из 29 образцов представлена диамиктитами и полимиктовыми песчаниками с неравномерно развитой тонкой вкрапленностью сульфидов, алевролитов с кварц-карбонатными микропросечками и редкой вкрапленностью сульфидов (УЭС до 500 Ом·м), а также сульфидизированных диамиктитов и алевролитов, последние часто с песчаной примесью и реже с нитевидным кварцевым прожилкованием (УЭС от 500 до 1000 Ом·м). Это может объясняться повышенной концентрацией в этих образцах плотных минералов с электронной проводимостью сульфидов и оксидов металлов, сопровождающих рудный процесс на всех его стадиях. Отмечено (см. рис. 7), что содержание золота повышается на интервалах, где отобраны образцы с высоким удельным сопротивлением (1000–4000 Ом·м), относительно пониженной плотностью ($2,72\text{--}2,74 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$) и магнитной восприимчивостью (от $1,51$ до $1,67 \cdot 10^{-6} \text{ СИ}$). Такие характеристики ПФП можно связать с повышенным содержанием кварцевого материала. В силу того что эта группа образцов (45 шт.) состоит из диамиктитов и песчаников с субпараллельными нитевидными просечками кварца, диамиктитов с редкой вкрапленностью пирита и метасоматически окварцованных алевролитов, она имеет повышенное УЭС (от 1000 до 1500 Ом·м).

В разрезе бурового профиля +20 с глубиной плотность и магнитная восприимчивость в образцах увеличиваются, в то время как удельное сопротивление уменьшается. Это указывает на то, что с глубиной процессы сульфидизации проявлены более интенсивно, в близповерхностном же пространстве преобладают процессы окварцевания, что приводит к уменьшению плотности и увеличению сопротивления. Эти факты находят отчетливое подтверждение в работе С. Ф. Стружкова (2006).

Комплексная интерпретация всех полученных петрофизических материалов позволяет сделать в первом приближении следующие выводы.

Горные породы северо-восточной части территории рудного поля характеризуются повышенными значениями петрофизических параметров: плотностью $2,68\text{--}2,76 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, магнитной восприимчивостью $1,75\text{--}3,66 \cdot 10^{-6} \text{ ед. СИ}$, остаточной на-

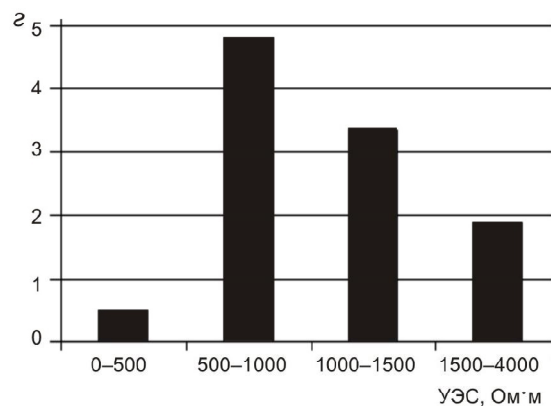
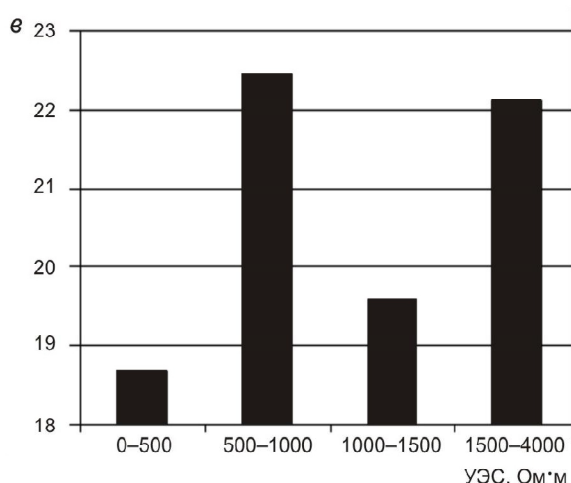
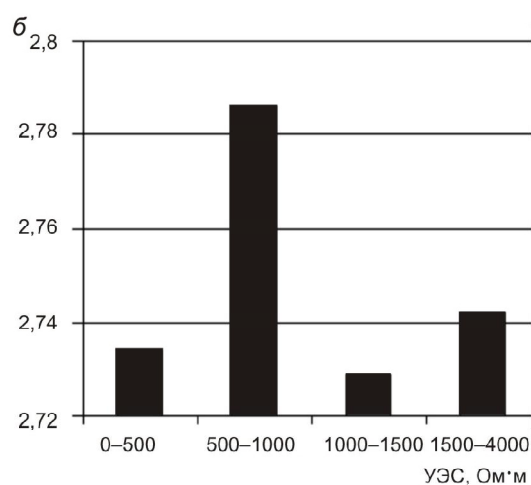
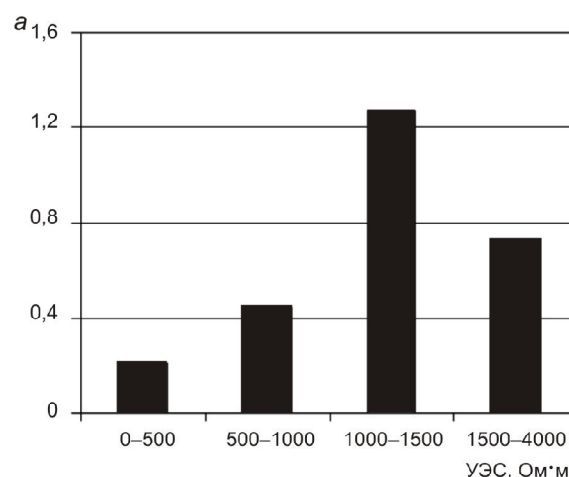


Рис. 7. Зависимость распределения содержания золота, г/т (а), плотности, $1 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ (б), магнитной (в) и остаточной (г) намагниченности (в $1 \cdot (1/4\pi) \cdot 10^{-6} \text{ СИ}$) от удельного сопротивления (в Ом·м) в образцах, отобранных в разрезе по буровому профилю +20, в пределах месторождения Наталка

Fig 7. The gold grade (а), density (б), magnetic susceptibility (в) and residual magnetization (г) versus the specific resistance (в Ом·м) in samples taken from borehole profile +20 section within the Natalka Lode area. Gold grade – г/т, specific resistance – Ом·м, magnetic parameters – $1 \cdot (1/4\pi) \cdot 10^{-6} \text{ СИ}$, density – $1 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$

магнитностью $2,39\text{--}7,96 \cdot 10^{-6}$ ед. СИ, удельным электрическим сопротивлением $1100\text{--}2500$ Ом·м. Это, очевидно, связано с тем, что данные горные породы подвержены интенсивной кварц-сульфидной минерализации.

Осадочные горные породы юго-западной части рудного поля обладают пониженными значениями петрофизических параметров (плотность $2,46\text{--}2,63 \cdot 10^3$ кг/м³, магнитная восприимчивость $0,47\text{--}1,35 \cdot 10^{-6}$ СИ, остаточная намагнитенность $0\text{--}0,6 \cdot 10^{-6}$ СИ, удельное электрическое сопротивление $100\text{--}1500$ Ом·м). Этот факт свидетельствует о том, что породы преимущественно были подвержены процессам углеродистого метасоматоза.

Центральная часть исследуемой территории, залежь месторождения Наталка, фиксируется дифференцированными значениями (сопряженными в плане локальными аномалиями повышенных и пониженных значений) петрофизических параметров и зонами их градиентов. Это может объясняться телескопированием рудоотложения, что связано с разнонаправленными, в плане становления петрофизических свойств горных пород, процессами формирования месторождения. Одной из особенностей строения рудной залежи является наличие в ее центральной части интервала, характеризующегося высокой анизотропией электрических свойств, что свидетельствует о преимущественно прожилково-жильном структурно-текстурном строении изученного фрагмента рудной залежи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основе исследований электрических свойств горных пород Омчакского рудного узла и его ближайшего обрамления можно сделать следующие выводы:

1) измеренное удельное сопротивление образцов, отобранных с поверхности по территории рудного узла, согласуется с ранее наблюдаемым кажущимся удельным сопротивлением, полученным в результате площадных электроразведочных работ (Круглов В. М. и др., 1985 г.);

2) определено, что удельное электрическое сопротивление образцов, находящихся в мерзлом состоянии, имеет более высокие (в среднем на 32%) значения, чем в талом состоянии. При этом повышение сопротивления малопористых образцов (аргиллиты, в том числе содержащие УВ, мелкозернистые песчаники) в мерзлом состоянии незначительно и составляет от 7 до 15% УЭС талых пород. При промерзании увеличение УЭС до 43% выявлено в процессе измерений более пористых образцов (алевролиты, диамиктиты, песчаники). При промерзании происходит повышение сопротивления у различных групп пород в различной степени (но не более 50%), однако пропорциональные зависимости между ними сохраняются.

При охлаждении образцов до -20°C для выборки из всех пород Омчакского РУ получено самое максимальное значение УЭС, равное 3558 Ом·м (образец № 315, гальково-гравийный алевролит);

3) установлено, что увеличение глинистости, углистого вещества и сульфидизации приводит к уменьшению сопротивления среды, а процессы окварцевания способствуют резкому увеличению сопротивления. При этом увеличение УВ и окварцевания вызывает уменьшение плотности среды, а сульфидизация – ее увеличение;

4) результаты изучения электрических свойств горных пород подтверждают выявленную ранее (Шарафутдинов, Хасанов, 2006) двухуровневую петрофизическую зональность, выражающуюся в монотонном изменении параметра УЭС в пределах территории рудного узла (первый уровень), и в значительной дифференциации значений электрических параметров в пределах месторождения (второй уровень зональности), где также отмечается резкое возрастание коэффициента анизотропии;

5) установлено зональное соответствие петрофизических (плотностные, магнитные, электрические) параметров с наложенными процессами в горных породах северо-западного фланга Омчакского рудного узла. В пределах исследуемой территории, возможно, действовали два разнонаправленных (с точки зрения воздействия на ПФП) процесса: углеродистый метасоматоз и кварц-сульфидная минерализация. Для первого уровня петрофизической зональности, охватывающей всю площадь выхода на поверхность субвертикальной зоны повышенной проводимости, характерен процесс углеродистого метасоматоза, приуроченного к глубинному разлому. Второй уровень зональности, характеризующийся повышением и резкой дифференциацией сопротивления, магнитных и плотностных параметров, возможно, связан с процессами кварц-сульфидной минерализации формирования непосредственно Наталкинского месторождения.

ЛИТЕРАТУРА

Вацлов Ю. Я. О рудной петрофизике // Вестник СВНЦ ДВО РАН. – 2007. – № 4. – С. 52–55.

Ворошин С. В., Еремин Р. А., Тюкова Е. Э., Шахтыров В. Г. Новые материалы по структуре и минералогии Омчакского узла // Геохимия и минералогия рудных месторождений Северо-Востока СССР. – Магадан : СВКНИИ ДВО РАН, 1989. – С. 67–86.

Гаитольд В. В. Геолого-структурные особенности локализации золотого оруденения наталкинского типа и его геолого-экономическая оценка на примере месторождений Омчакского рудного узла : автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. – Магадан, 2006. – 24 с.

Голуб В. Н., Петров А. Н., Горячев Н. А. Геолого-структурные условия локализации рудных зон юго-восточного фланга Наталкинского золоторудного месторождения // Вестник СВНЦ ДВО РАН. – 2008. – № 4. – С. 16–20.

Гончаров В. И., Ворошин С. В., Сидоров В. А. Наталкинское золоторудное месторождение. – Магадан : СВНЦ ДВО РАН, 2002. – 250 с.

Горячев Н. А., Сидоров В. А., Литвиненко И. С., Михалицына Т. И. Минеральный состав и петрохимические особенности рудных зон глубоких горизонтов Наталкинского месторождения // Колыма. – 2000. – № 2. – С. 38–49.

Григорьев С. А. Генезис и динамика формирования Наталкинского золоторудного месторождения по данным системного анализа геохимического поля // Руды и металлы. – 2006. – № 3. – С. 44–48.

Жамалетдинов А. А., Семенов А. С. Электропроводящие породы северо-западной части Кольского полуострова // Вопр. геофизики. – 1978. – Вып. 27. – С. 99–107.

Инструкция по эксплуатации. Прибор измерительный цифровой комбинированный ЦК 4800. – М., 1990. – 104 с.

Калинин А. И. Месторождение Наталка // Многофакторные прогнозно-поисковые модели месторождений золота и серебра Северо-Востока России / под ред. М. М. Константинова, И. С. Розенблюма, М. З. Зиннатуллина. – М., 1992. – С. 5–11.

Калинин А. И., Канищев В. К., Орлов А. Г., Гаитольд В. В. Структура Наталкинского рудного поля // Колыма. – 1992. – № 10–11. – С. 10–14.

Межов С. В. Геологическое строение Наталкинского золоторудного месторождения // Колымские ВЕСТИ. – 2000. – № 9. – С. 8–17.

Методическое руководство по определению физических свойств горных пород и полезных ископаемых / под ред. Н. Б. Дортман и М. Л. Озерской. – М. : Госгеолтехиздат, 1962. – 457 с.

Петров А. В., Никитин А. А. Классификация комплексных геополей на однородные области // Геология и разведка. – 1990. – № 3. – С. 11–18.

Семенов А. С. Электроразведка методом естественного электрического поля. – Л. : Недра, 1974. – 245 с.

Стружков С. Ф. Многофакторная модель золоторудного месторождения Наталка // Руды и металлы. – 2006. – № 3. – С. 34–44.

Физические свойства горных пород и полезных ископаемых : справ. геофизика. – М. : Недра, 1984. – 455 с.

Фролов А. Д. Электрические и упругие свойства криогенных пород. – М. : Недра, 1976. – 253 с.

Шарафутдинов В. М., Хасанов И. М. Пространственные и генетические связи аномальных петрофизических зон, рудной минерализации и глубинной субвертикальной зоны повышенной электропроводности в пределах Наталкинского рудного поля // Вестник СВНЦ ДВО РАН. – 2006. – № 4. – С. 2–11.

Шарафутдинов В. М., Хасанов И. М., Михалицына Т. И. Петрофизическая зональность Наталкинского рудного поля // Тихоокеан. геол. – 2008. – Т. 27, № 5. – С. 89–103.

Якупов В. С. Исследования мерзлых толщ методами геофизики. – Якутск : ЯФ СО РАН, 2000. – 336 с.

Поступила в редакцию 30.09.2009 г.

CORRELATION RELATIONSHIPS BETWEEN THE ROCK ELECTRICAL PROPERTIES AND ORE MINERALIZATION OF THE NATALKA LODGE

V. M. Sharafutdinov, I. M. Khasanov

It is for the first time in the study history of the Omchak Mineral Area that the laboratory measurements were made of both the rock electrical resistivity and anisotropy factor for the Natalka Lode and its outer contact zones. The established electrical properties of rocks testify to the two-level petrophysical zoning there. The latter was established earlier and manifests itself in a monotonous change of the electrical resistivity parameter within the Natalka Ore Field (the first level), and in a considerable differentiation of electrical parameter values within the lode area (the second level of zoning), from where a sharp increase in the anisotropy factor is as well reported. The petrophysical parameter measurements and superimposed rock processes reveal their zone-specific correspondence in the northwestern part of the Omchak Mineral Area. Two differently oriented processes as the carbonaceous metasomatism and quartz-sulfide mineralization are assumed to have taken place in the area of consideration and differently affected the petrophysical parameters of rocks there. A schematized map of this area is developed, which demonstrates the existing correlation between the rock electrical properties and distribution of ore minerals.

Key words: specific electrical resistance, anisotropy factor, ore field, petrophysical parameter, zoning, mineralization.