

УДК 553.086

М.А. Богуславский¹, А.А. Бурмистров²

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ОЦЕНКИ ПРОДУКТИВНОГО СУЛЬФИДНОГО ОРУДЕНЕНИЯ НОРИЛЬСКОГО ТИПА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ОПТИЧЕСКОГО И ПЕТРОФИЗИЧЕСКОГО МЕТОДОВ (НА ПРИМЕРЕ ТАЛНАХСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ)

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1

Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1

Осуществлено количественное изучение минерального состава руд и вмещающих пород по аншлифам из образцов керна двух скважин Талнахского месторождения, а также определены значения ряда их физико-механических, магнитных и электрических свойств. Сопоставление этих данных позволило рассчитать содержание основных рудных минералов и полезных компонентов в изученных образцах по их петрофизическим свойствам, а также выявить околорудные петрофизические аномалии в экзоконтактах рудных горизонтов. Использование этой методики исследований может способствовать повышению эффективности поисково-оценочных работ на сульфидное оруденение норильского типа.

Ключевые слова: аншлифы руд, петрофизические исследования, магнитные свойства, статистический анализ, электрические свойства, петрофизические аномалии, Талнахское месторождение.

The quantity of the mineral composition of ore and parent rocks was carried out. Ore sections from the core samples of two wells of the Talnakh field were used for these studying. Also a number of their physical, mechanical, magnetic and electrical properties were determined. The content of the main ore minerals and useful components in the studied samples were calculated due to comparison of these data of their petrophysical properties. Additionally petrophysical anomalies in the external contact of ore horizons were identified. Using of this methodology may contribute to improving the efficiency of survey and evaluation work on Norilsk type sulfide mineralization.

Key words: ore sections, petrophysical research, magnetic properties, statistical analysis, electrical properties, petrophysical anomalies, Talnakh ore deposit.

Введение. В основе структурно-петрофизического анализа, разработанного В.И. Старостиним [1979], лежит фундаментальная теоретически обоснованная и инструментально проверенная закономерная количественная зависимость величин различных петрофизических свойств пород и руд от их состава и структуры, все это также следствие геологических процессов их образования и наложенных изменений. Это положение было не раз подтверждено и развито во многих работах, посвященных изучению рудных месторождений различного типа, в том числе и в публикациях авторов [Богуславский и др., 2009; Бурмистров и др., 2014].

Работа основана на результатах изучения минерального состава и ряда физико-механических, магнитных и электрических свойств 24 образцов керна, отобранных из двух скважин на Талнахском месторождении.

Геологическое строение месторождения. В разрезе Талнахского месторождения и прилегающих площадей выделяются стратифицированные морские отложения ордовикского, силурийского и девонского возраста; отложения лимно-параллической угленосной формации тунгусской серии, карбона и перми; а также образования туфолововой вулканогенной толщи нижнего триаса и четвертичные отложения.

Медно-никелевое оруденение Талнахского месторождения приурочено к крупному (≥ 30 км²) сложнопостроенному Верхнеталнахскому интрузиву, который относится к норильскому типу норильского интрузивного комплекса ($v\delta-tv\beta T_{1nr}^{nr}$). Интрузив имеет форму хонолита, полого ($5-10^\circ$) погружающегося на север, который разделяется на три ветви: Юго-Западную, Северо-Восточную и Северо-Западную. Талнахское месторождение приурочено к южной оконечности Юго-Запад-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии, геохимии и экономики полезных ископаемых, канд. геол.-минер. н.; e-mail: mboguslavskiy@yandex.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии, геохимии и экономики полезных ископаемых, канд. геол.-минер. н.; e-mail: alek.burmistroff2017@yandex.ru

ной ветви, представлявшей собой фронтальную зону внедрения магмы, что обусловило высокую концентрацию в ней меди и платиноидов. Это объясняет их высокое содержание в рудах месторождения, близкое по уровню к селективным рудам рудника «Октябрьский».

Морфология, состав и пространственное положение рудных тел. Область развития промышленного сульфидного медно-никелевого оруденения ликвационно-магматического генетического типа характеризуется сложным многоярусным строением. Рудные тела локализованы как в пределах Талнахского стратифицированного интрузива, так и в породах его экзоконтанта. По текстурным особенностям и содержанию цветных и благородных металлов на месторождениях Норильского района выделяют три промышленных типа руд: вкрапленные (бедные), прожилково-вкрапленные (медистые) и сплошные сульфидные (богатые).

Богатые руды пространственно связаны с приподошвенной зоной Талнахского интрузива, а в некоторых местах они выходят во вмещающие породы верхнего девона, карбона и перми тунгусской серии.

Прожилково-вкрапленные медистые руды пространственно тяготеют к зонам локализации богатых (сплошных) руд, в экзоконтактах и на флангах которых они образуют пластообразные и линзовидные тела сложной в плане формы и мощностью до 16 м.

Характерные особенности медистых руд — их текстурное разнообразие, значительная изменчивость концентрации рудных компонентов, сложность и невыдержанность минерального состава, обусловленная пестротой и частой сменой минеральных ассоциаций по разрезу и площади распространения, а также тесные срастания рудообразующих сульфидов с нерудными минералами вмещающих пород. Характер распределения и уровень концентрации сульфидов в рудах определяют их текстурный облик, что связано как с особенностями проявления ликвационных и позднемагматических процессов, так и со структурными, химическими и физико-механическими свойствами рудовмещающих габброидов и роговиков.

Сульфиды развиваются вдоль плоскостей стратификации расслоенного интрузива, выполняют секущие трещинки (образуют прожилки), находятся в интерстициях между породообразующими силикатными минералами, иногда отмечается очень высокая концентрация сульфидов (вплоть до образования массивных руд). Такое многообразие форм их распределения позволяет при расчленении продуктивной толщи выделять руды с полосчатыми, рассеянными, гнездовидно-вкрапленными, прожилковыми и прожилково-вкрапленными текстурами. В медистых рудах наибольшим развитием пользуются гнездовидно-вкрапленная, прожилково-вкрапленная и рассе-

янно-вкрапленная текстуры. Полосчатая текстура, обусловленная чередованием рудных и безрудных полосок мощностью от 1–5 мм до 15 мм, распространена ограниченно [Кокорин, 2003].

Вкрапленные руды тяготеют к нижним придонным горизонтам интрузива, сложенным пикритовыми, троктолитовыми, такситовыми и оливиновыми (контактовыми) габбро-долеритами, которые прослеживаются по всей площади интрузива, выклиниваясь в его бортовых частях. В роговиках экзоконтакта интрузива руды имеют брекчиевую текстуру. На отдельных участках встречена карбонатная брекчия.

Материалы и методы исследования. Петрофизические исследования. По образцам керна из скв. 1 и 2 были измерены эффективная пористость ($P_{эф}$, %), плотность твердой фазы (d , г/см³), магнитная восприимчивость (χ , 10⁻⁵ ед. СИ), диэлектрическая проницаемость (ϵ) и удельное электрическое сопротивление (r , МОм·см).

По данным работы [Спиридонов и др, 2015], висячих боках рудных тел норильских месторождений обычно широко развиты ореолы метасоматических изменений вмещающих габброидов, которые в основном выражены в замещении их первичных минералов гидросиликатами. Эти изменения связаны с высокой концентрацией флюидной фазы в кристаллизовавшемся рудном расплаве. Они сопровождаются вкрапленностью широкого спектра рудных минералов, что обуславливает повышение эффективной пористости вмещающих пород и плотности их твердой фазы.

Эти свойства определяли методом гидростатического взвешивания (с точностью взвешивания 0,01 г): расчет их значений проводили по следующим формулам [Бурмистров и др., 2009]:

$$P_{эф} = 100 \cdot (P_n - P) / (P_n - P_{нв}),$$

где P_n — вес насыщенного водой образца; P — вес сухого образца;

$$d = 0,998 \cdot P / (P - P_{нв}),$$

где $P_{нв}$ — вес насыщенного водой образца в воде.

Величина магнитной восприимчивости вмещающих пород и руд в основном зависит от содержания в них магнетита и в значительно меньшей степени моноклинного пирротина (Po). Ее измеряли каппаметром ПИМВ-1М. Из-за разных размеров образцов и степени неровности их поверхности в ее средние значения (определенные по 3–4 замерам для каждого образца) вводили поправочные коэффициенты.

Диэлектрическая проницаемость (ϵ) пород в сухом состоянии возрастает с увеличением концентрации в них рудных минералов, а их удельное сопротивление (r) при этом снижается. Измерения ϵ проводились с помощью прибора RLC АКПП-6102, соединенного с конденсатором, между обкладками которого помещали образец. На частоте

$f = 10\ 000$ Гц определяли два значения емкости конденсатора (с образцом — C_i и без него — C_0), а в первом случае измеряли также тангенс угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$). Поскольку площадь сечения обкладок конденсатора была больше (в K_i раз), чем площадь сечения i -го образца, в расчетную формулу вводили поправочный коэффициент:

$$\varepsilon = \varepsilon_b \cdot K_i \cdot C_i / C_0,$$

где $\varepsilon_b = 1$ (диэлектрическая проницаемость воздуха).

Для определения удельного электрического сопротивления образцов сначала определяли их электрическое сопротивление (R). Поправка «за воздух» в величину $\text{tg}\delta$ не вводилась из-за невозможности точно определить ее для разных образцов. В итоге для небольших рудных образцов получены заниженные значения $\text{tg}\delta$ из-за влияния воздуха в пространстве между обкладками конденсатора. Это привело к завышению расчетных значений их удельного сопротивления. Расчеты проводились по следующим формулам [Петрофизика..., 1992]:

$$R = 1 / (6,28K \cdot C_i \cdot f \cdot \text{tg}\delta), \quad r = R \cdot S / L,$$

где S и L — площадь сечения (см^2) и толщина (см) образца соответственно.

Результаты исследований и их обсуждение.

Значения петрофизических свойств образцов приведены в табл. 1 и показаны на рис. 1, А–Г.

Эффективная пористость возрастает при приближении к рудным интервалам и обычно остается относительно высокой в их пределах (интервалы 61,9–76,2; 799,2–812,6; 902,3–914,1) (рис. 1, А). С глубиной ее общий уровень снижается, а различия между рудными и безрудными интервалами уменьшаются.

Плотность изученных рудных минералов варьирует от 4,1 г/см³ (халькопирит, Ср) до 5,1 г/см³ (магнетит, Мт). Используя средние ее значения для рудной (d_p) и нерудной (d_n) фаз образцов в целом, можно с достаточным приближением определить объемные доли обеих фаз в образцах. Для их расчетов приняты следующие значения плотности (г/см³): для рудной фазы $d_p = 4,7$; для нерудной фазы d_n такситового габбро равен 2,6, пикритового габбро — 2,7, ороговикованных базальтов — 2,9, безрудных роговиков и карбонатной брекчии — 2,6 и 2,5 соответственно. Составлена следующая система уравнений:

$$d_{\text{обр}} = V_p d_p + V_n d_n; \\ V_p + V_n = 1,$$

Таблица 1

Петрофизические свойства образцов

Номер образца	Глубина отбора, м	Вмещающие породы и руды	d , г/см ³	χ , 10 ⁻⁵ ед. СИ	ε	r , МОм·см	$P_{\text{эф}}$, %
Скважина 1							
18	767	базальт ороговикованный (р)	3,00	144	6	0,6	2,8
1	779	габбро-долерит такситовый	3,08	2940	10	0,3	0,3
2	787		3,04	3080	11	0,3	0,3
3	799	габбро пикритовое (р)	2,92	3420	8	0,5	1,4
4	812		2,97	3300	8	0,5	1,3
5	823	габбро-долерит пикритовый	2,99	2440	9	0,3	0,2
6	838		2,88	2360	9	0,4	0,2
7	848		2,99	1720	9	0,4	0,1
8	864		2,99	1520	7	0,4	0,2
9	878		2,90	1280	7	0,6	0,1
10	884		2,80	1280	6	0,6	0,1
11	895	оливиновое габбро (р)	2,87	4059	8	0,7	0,1
17	902	габбро-долерит пикритовый (р)	3,15	4422	8	0,7	0,4
12	907,2		3,26	3455	8	0,7	0,3
13	914,1		3,27	2832	17	0,2	0,8
14	919,8	руда	3,43	6400	17	0,2	0,2
15	925	роговик пироксен-плагиоклазовый (р)	3,27	2666	8	0,6	0,3
16	932,6	габбро-долерит такситовый	2,61	170	6	0,6	0,5
Скважина 2							
21	61,9	габбро-долерит такситовый (р)	2,84	5560	12	0,4	2,5
23	66,1		2,87	3260	12	0,7	1,0
20	67,9	роговик пироксен-плагиоклазовый (р)	2,77	6200	10	0,3	2,9
22	76,2	роговик пироксен-плагиоклазовый	2,61	952	5	1,4	3,6
24	84,3	карбонатная брекчия	2,58	220	6	0,8	1,1
19	90,9		2,49	184	6	0,8	0,8

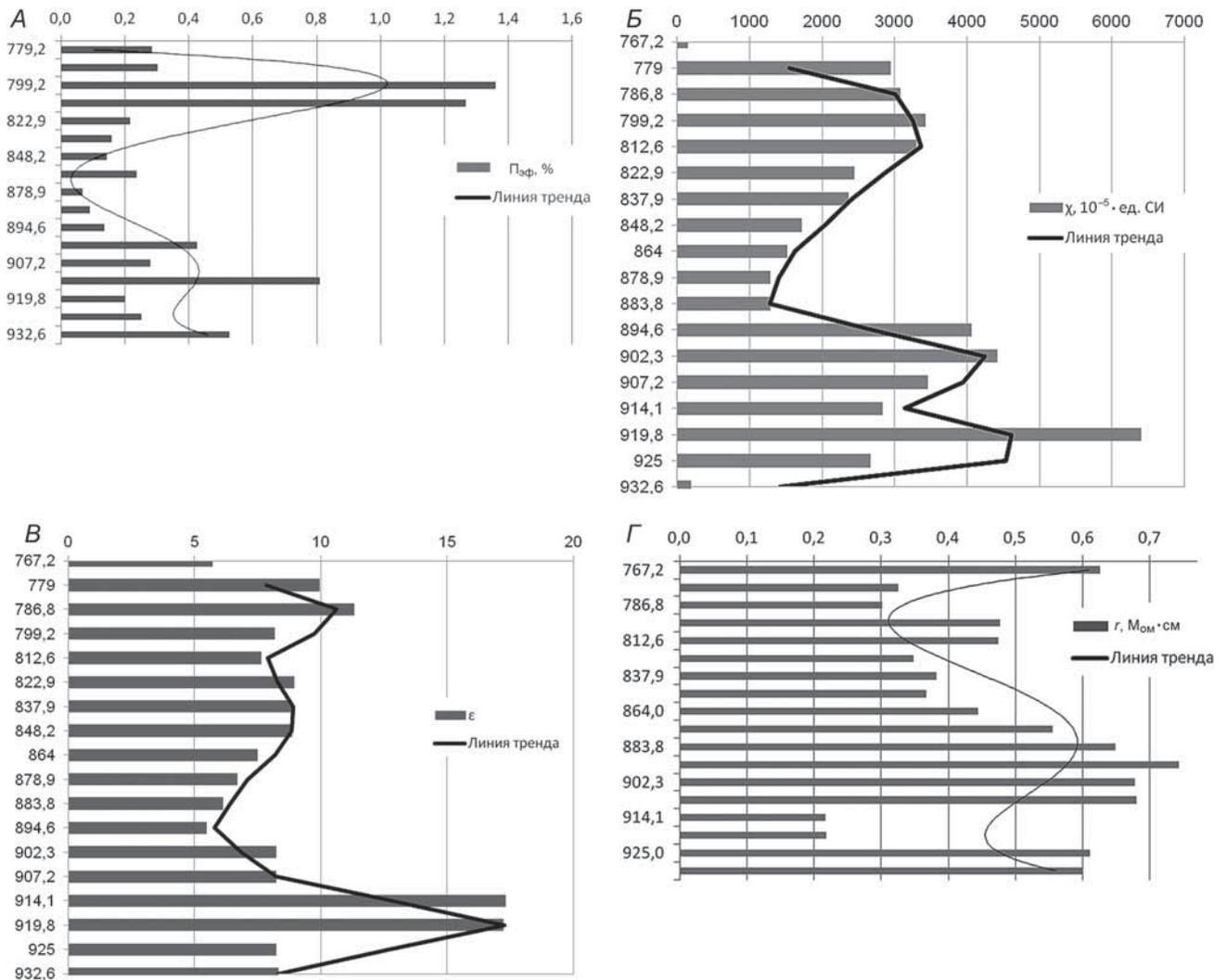


Рис. 1. Гистограммы петрофизических свойств пород (скв. 1): А – эффективная пористость, %; Б – магнитная восприимчивость (10^{-5} ед. СИ); В – диэлектрическая проницаемость; Г – удельное электрическое сопротивление (МОм·см) (по вертикальной оси приведена глубина отбора образцов, м)

где $d_{\text{обр}}$ – плотность образца, V_p и V_n – объемные доли рудной и нерудной фаз в образцах соответственно.

Как видно из данных табл. 2, между расчетными и определенными по аншлифам значениями объемного содержания (%) рудной фазы имеются различия, но коэффициент парной корреляции (КПК) между ними значимый (КПК = +0,38, при его пороговом значении +0,35 для этой выборки).

Плотность пород возрастает с ростом содержания рудных минералов и достигает максимальных значений в богатом рудном интервале (обр. № 12–14). Плотность пород верхнего рудного интервала в скв. 1 (обр. № 1–4), представленного вкрапленными рудами, не сильно отличается от таковой пород безрудного интервала (обр. № 5–10), так как последний содержит мелкую вкрапленность магнетита, что подтверждается высокой магнитной восприимчивостью образцов (табл. 1, рис. 1, Б).

Пики значений магнитной восприимчивости характеризуют образцы № 3, 4, а особенно № 11, 17, 14, 21, 20. Это в основном связано с наличием

мелкой вкрапленности магнетита ($\chi = 0,1 \div 1$ ед. СИ). Его содержание в породах при этом может составлять 0,1–1% и более (рис. 2). Наличие сульфидных включений не может привести к значи-

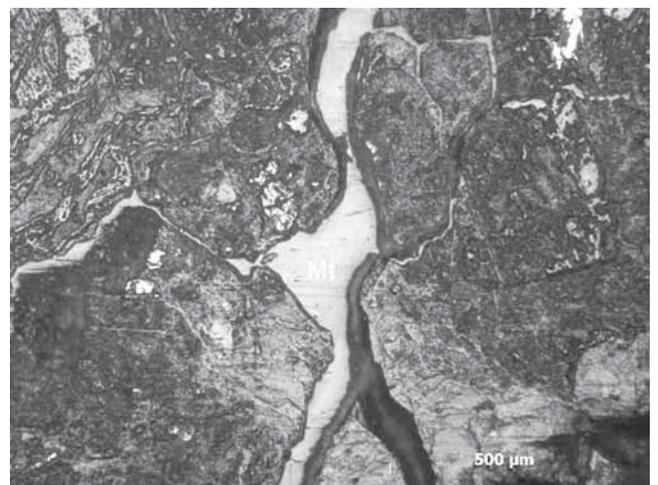


Рис. 2. Пржилок магнетита (Mt) в нерудном веществе (николи параллельны)

Таблица 2.
Объемное содержание рудной фазы (I_p) и рудных минералов по данным минераграфических исследований и петрофизическим расчетам

Номер образца	Глубина, м	I _p (расчет по плотности)	Объемное содержание I _p и рудных минералов, %							I _p (расчет по диэлектрической проницаемости)
			в аншлифах					сумма		
			Pу	Po	Pn	Crу	Mt			
Скважина 1										
18	767,2	5	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0	1	
1	779,2	19	1	н.о.	н.о.	<1	<<1	1,5	21	
2	786,8	17	н.о.	1	2	<1	<<1	3,5	26	
3	799,2	11	4	н.о.	<1	<1	10	15	14	
4	812,6	14	н.о.	1	1	1	н.о.	3	12	
5	822,9	15	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0	18	
6	837,9	9	2	н.о.	н.о.	н.о.	6	8	17	
7	848,2	15	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0	17	
8	864	15	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0	11	
9	878,9	10	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0	7	
10	883,8	5	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0	4	
11	894,6	8	н.о.	5	2	4	1	12	11	
17	902,3	23	2	1	<1	<1	2	6	15	
12	907,2	28	н.о.	2	1	1	н.о.	4	15	
13	914,1	28	4	<1	<1	8	2	15	41	
14	919,8	37	н.о.	60	23	4	1	88	41	
15	925	28	н.о.	4	1	4	<1	9,5	15	
16	932,6	0,5	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0	3	
Скважина 2										
21	61,9	7	н.о.	6	5	3	<<1	14	28	
23	66,1	8	н.о.	3	2	5	<1	10,5	27	
20	67,9	3	н.о.	50	<<1	10	<<1	60	22	
22	76,2	0,6	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0	0	
24	84,3	4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0	3	
19	90,9	0,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0	3	

Примечание. Условные обозначения минералов см. в тексте.

тельному росту χ , так как магнитным среди них может быть только моноклинный пирротин ($\chi = 600\div 1000$ ед. СИ).

Тренды изменения удельного сопротивления и диэлектрической проницаемости имеют между собой обратную связь (значение КПК между ними составляет $-0,7$) (рис. 1, В, Г). В интервалах с рассеянной рудной вкрапленностью сопротивление пород снижается не так значительно, как возрастает диэлектрическая проницаемость. Причина этого заключается в том, что для сухих образцов удельное сопротивление зависит не столько от

концентрации рудных минералов в них, сколько от их пространственного распределения в породе. Если в породе содержится только несколько процентов непрерывно связанных между собой проводящих включений (рис. 3–5), то удельное

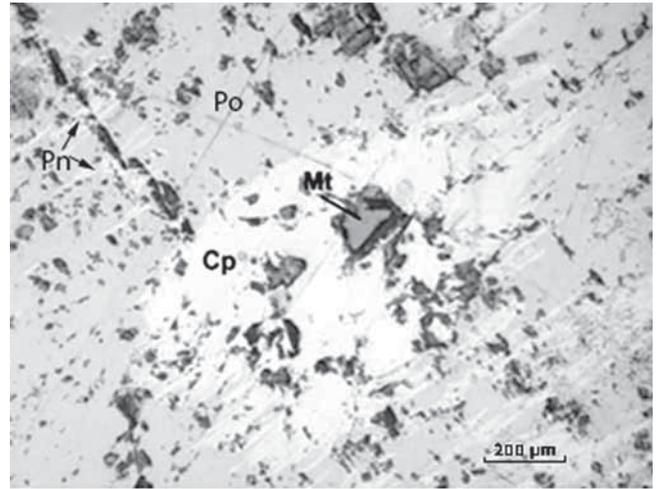


Рис. 3. Мелкие зерна магнетита (Mt) в пирротин-пентландитовом (Po–Pn) матриксе. Зерна халькопирита (Cr) ассоциируют с магнетитом (николи параллельны)



Рис. 4. Структура остатков от замещения пирротина (Po) (николи параллельны)

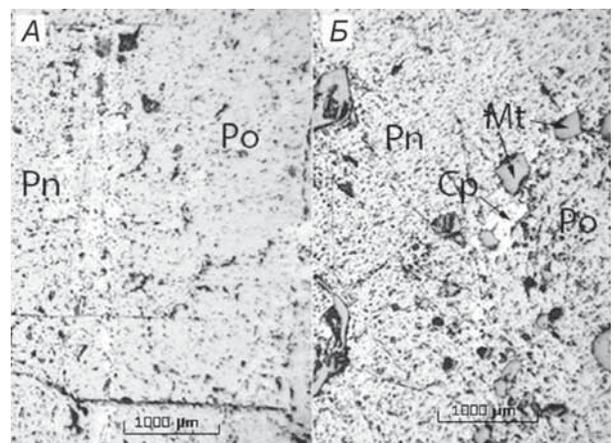


Рис. 5. Богатые руды пирротин-пентландитового состава (А) и богатые руды халькопирит-пирротин-пентландитового состава с магнетитом (до 5%) (Б) (николи параллельны)

сопротивление пород может снизиться в десятки раз, поэтому в образцах № 13 и 14, в которых присутствуют крупные рудные гнезда (рис. 3, 5), отмечены минимумы его значений (рис. 1, Г).

Степень достоверности прогноза и выделения рудных интервалов возрастает при использовании всех информативных петрофизических свойств одновременно. Это становится возможным при использовании комплексного аномального петрофизического коэффициента (КАПК_i), который определяли для каждого (*i*-го) образца по формуле [Бурмистров и др., 2009]:

$$\text{КАПК}_i = \text{Ln} (d_i/d_{\text{ср}} \cdot \chi_i/\chi_{\text{ср}} \cdot \varepsilon_i/\varepsilon_{\text{ср}} \cdot r_{\text{ср}}/r_i),$$

где d_i , χ_i , ε_i , r_i — значения плотности твердой фазы, магнитной восприимчивости, диэлектрической проницаемости и удельного электрического сопротивления *i*-го образца соответственно, а $d_{\text{ср}}$, $\chi_{\text{ср}}$, $\varepsilon_{\text{ср}}$, $r_{\text{ср}}$ — средние значения этих свойств.

Для расчета КАПК использованы только те свойства, которые имеют высокую прямую или обратную (удельное электросопротивление) связь с содержанием рудной фазы в образцах. Эффективная пористость не включена в расчет КАПК из-за ее незначимой корреляционной связи с содержанием рудной фазы (коэффициент парной корреляции равен +0,24). При переходе от рудных к безрудным интервалам КАПК возрастает от отрицательных (или относительно невысоких положительных) до высоких положительных значений (с основным максимумом на богатом рудном интервале 914,1–919,8 м) (табл. 2, 3, рис. 5).

Другой эффективный метод выделения зон окolorудных изменений и рудных интервалов состоит в определении коэффициента парной (или ранговой) корреляции (КПК) между магнитной восприимчивостью и плотностью пород, который вычисляется для каждой точки наблюдения по нескольким парам их значений [Пахомов и др., 1988]. Для неизменных пород значение КПК близко к +1. С уменьшением содержания магнетита и моноклинного пирротина и с увеличением концентрации в породах других сульфидов КПК снижается вплоть до отрицательных значений. Для получения необходимого числа пар значений этих свойств соседние интервалы отбора образцов были объединены в группы. За счет повторного включения в соседние группы смежных интервалов получено сглаживание исходных значений КПК методом «скользящего окна». Как в верхнем, так и в нижнем рудных интервалах в скв. 1 по мере роста в группах числа минерализованных образцов КПК постепенно снижается (табл. 4).

Группы, включающие в основном безрудные образцы (интервалы 848,2–883,9 и 67,9–90,9 м), наоборот, имеют максимальные значения КПК (часто близкие к +1). Широкая область отрицательных значений КПК выявлена в пределах верхнего рудного интервала в скв. 1 и его экзо-

Таблица 3

Содержание рудной немагнитной ($V_{\text{нм}}$) и ферромагнитной ($V_{\text{фм}}$) фракций, комплексный петрофизический коэффициент (КАПК) и значения расчетного суммарного содержания меди и никеля в образцах (скв. 1)

Номер образца	$V_{\text{нм}}$, %	$V_{\text{фм}}$, %	КАПК	Расчетное содержание (Cu+Ni), %
Скважина 1				
18	5	0,1	–3,5	2
1	16	2,9	0,8	7
2	14	3,1	1	6
3	8	3,4	0,3	4
4	10	3,3	0,2	5
5	12	2,4	0,4	5
6	7	2,4	0,2	3
7	13	1,7	0	5
8	13	1,5	–0,5	5
9	9	1,3	–1,1	4
10	4	1,3	–1,3	2
11	4	4,1	–0,4	3
17	18	4,4	0,3	8
12	24	3,5	0,1	9
13	25	2,8	1,7	10
14	30	6,4	2,6	12
15	26	2,7	–0,1	10
16	0	0,2	–3,4	0

Таблица 4

Корреляция плотности и магнитной восприимчивости по интервалам скважин

Интервал, м	КПК	Интервал, м	КПК
Скважина 1		Скважина 2	
767,2–799,2	0,00	61,9–76,2	0,62
779,2–812,6	–1,00	66,1–84,3	0,72
786,8–822,9	–0,43	67,9–90,9	0,93
799,2–864	–0,36		
822,9–864	–0,51		
837,9–878,9	–0,39		
848,2–883,8	0,82		
848,2–902,3	0,48		
878,9–902,3	0,66		
883, –907,2	0,55		
894,6–914,1	–0,59		
902,3–919,8	0,64		
907,2–925	0,97		
914,1–932,6	0,86		

контактов, где развито вкрапленное оруденение. В других рудных интервалах (нижний в скв. 1) и в скв. 2 КПК снижается не так резко. Это связано с повышенной концентрацией в образцах магнетита и, возможно, моноклинного пирротина (рис. 5), что фиксируется и по максимумам магнитной восприимчивости (рис. 1, Б). В целом также отметим, что из-за малого числа образцов выделение основных зон с разными уровнями КПК носит достаточно приближенный характер.

Количественная оценка минерального состава вмещающих пород и руд. На следующем этапе исследований осуществлялась статистическая оценка минерального состава рудной фазы и доли нерудной фазы в образцах по результатам поляризационно-оптического изучения аншлифов (обр. № 13, 3, 6, 17) и по петрофизическим данным. В аншлифах подсчитывали содержание минералов на 15–20 площадках диаметром ~1 мм. Относительная погрешность определения содержания рудной и нерудной фаз по аншлифам вполне удовлетворительная. Она составила несколько процентов, но для содержания отдельных рудных минералов оказалась значительно выше и нередко достигала 100% и более. Это связано с высокой дисперсией значений содержания этих минералов (даже при таком большом числе измерений).

Кроме того, оценки содержания этих минералов для одних и тех же образцов, полученные по разным аншлифам, обычно также существенно различались. В меньшей степени это относится к оценкам содержания рудной и нерудной фаз. Все это прежде всего связано с текстурно-структурными особенностями руд, которые нередко характеризуются очень неравномерным (гнездообразным или прожилковым) распределением рудной фазы в объемах отдельных образцов. Поэтому можно сделать вывод, что число аншлифов для получения достаточно точных результатов должно быть значительно увеличено, но петрофизическая оценка содержания основных рудных минералов и фаз вмещающих пород и руд все равно будет объективнее и точнее (как будет показано ниже), что определяется значительно большим объемом образца по сравнению с объемами аншлифов. Отметим, что объем и число петрофизических образцов можно значительно увеличить без больших дополнительных временных и материальных затрат на их изучение. Однако очевидно, что оба метода исследований дополняют один другой, и можно ограничиться полуколичественной оценкой минерального состава образцов по аншлифам. Это необходимо делать для отдельных интервалов скважин и для основных текстурных и минеральных типов руд.

Для осуществления количественной оценки содержания основных рудных минералов в объемах образцов были использованы значения плотности, магнитной восприимчивости и диэлектрической проницаемости рудных и нерудных минералов и изученных образцов в целом. Объемное содержание ферромагнитной фракции ($V_{\text{фм}}$) определяли по формуле, полученной нами в результате аппроксимации статистических данных магнитной восприимчивости интрузивных пород [Дортман, 1992]:

$$V_{\text{фм}} (\%) \approx 10^{(\lg \chi) - 3},$$

а объемное содержание рудной немагнитной фракции ($V_{\text{нм}}$) по формуле

$$V_{\text{нм}} (\%) = V_{\text{руд}} (\%) - V_{\text{фм}} (\%).$$

Для определения содержания основных рудных минералов в образцах сначала по следующим значениям их плотности (г/см^3): халькопирит 4,1; пентландит и гексагональный пирротин 4,7; магнетит и пирит 5, были определены средние значения плотности их сочетаний (фракций). При этом учитывались приблизительные средние соотношения рудных минералов в рудах, установленные по данным наших полуколичественных минерографических исследований. В результате были получены следующие значения плотности (г/см^3) фракций: для халькопирита и пентландита — 4,4; для гексагонального пирротина и пирита — 4,8; для моноклинного пирротина и магнетита — 4,8, а для рудной фазы ее значение было оставлено прежним (4,7). Содержание ферромагнитного и парамагнитного пирротина условно принято одинаковым, так как обе эти разновидности достаточно широко распространены в норильских рудах. В итоге значения объемного содержания пентландит-халькопиритовой ($V_{\text{Ср+Pн}}$) и пирротин-пиритовой ($V_{\text{Py+Po}}$) фракций определяли из следующей системы уравнений:

$$4,4V_{\text{Ср+Pн}} + 4,8(V_{\text{Py+Po}} + V_{\text{фм}}) = 4,7V_{\text{руд}};$$

$$V_{\text{нм}} = V_{\text{Ср+Pн}} + V_{\text{Py+Po}};$$

$$V_{\text{нм}} = V_{\text{руд}} - V_{\text{фм}}.$$

Суммарно содержание меди и никеля ($C_i(\text{Cu+Ni})$, %) в образцах определяли путем перевода объемного содержания этой фракции в весовое (%) и с учетом нормативного содержания этих металлов в минералах: $\text{Cu} \approx 34\%$ (в халькопирите) и $\text{Ni} \approx 34\%$ (в пентландите). В итоге была получена следующая расчетная формула:

$$C_i(\text{Cu+Ni}), \% = 0,34 \cdot V_{\text{Ср+Pн}} \cdot 4,4 / d_i,$$

где d_i — плотность i -го образца.

Аналогичные расчеты выполнены с использованием измеренных величин диэлектрической проницаемости для каждого образца ($\epsilon_{\text{обр}}$), при этом значения ϵ рудной и нерудной фаз были приняты равными 80 и 6 соответственно. Для расчета объемного (долевого) содержания рудной фазы ($V_{\text{руд}}$) использована формула Лихтенекера для определения диэлектрической проницаемости смешанных фаз. С учетом объемного (долевого) содержания нерудной фазы ($V_{\text{н}}$) составлена следующая система уравнений:

$$\epsilon_{\text{обр}} = 80V_{\text{руд}} + 6V_{\text{н}};$$

$$V_{\text{н}} + V_{\text{руд}} = 1.$$

Рассчитанные значения $V_{\text{руд}}$ близки к ранее полученным по величинам ее плотности (табл. 2). На этом этапе исследований, возможно, их следует считать менее достоверными, так как величины

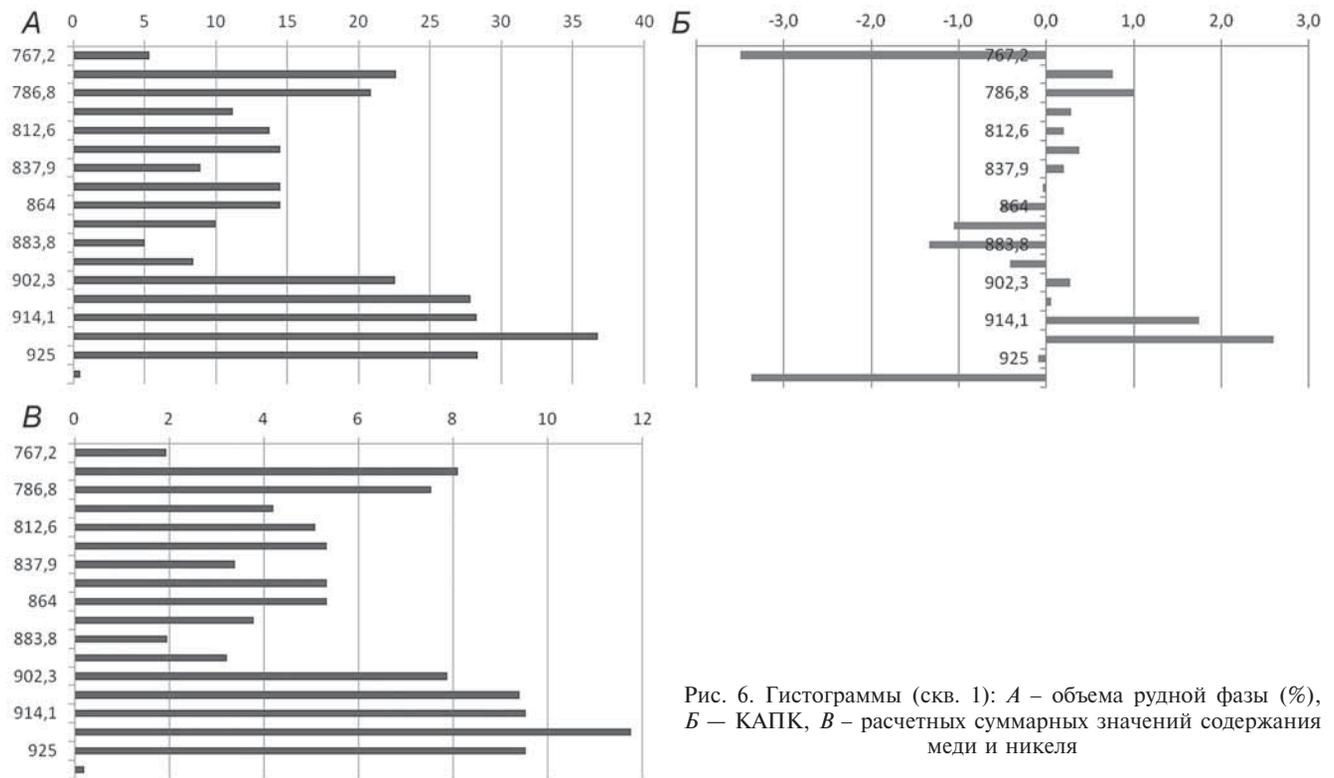


Рис. 6. Гистограммы (скв. 1): *A* – объема рудной фазы (%), *B* – КАПК, *B* – расчетных суммарных значений содержания меди и никеля

ε рудной фазы сильнее зависят от соотношения содержания в ней различных рудных минералов, чем от значения ее плотности.

Можно считать, что полученные значения расчетного суммарного содержания металлов вполне удовлетворительно совпадают с данными опробования (табл. 5) по скв. 2, так как размеры образцов малы по сравнению с интервалами опробования, которые, к тому же, не всегда совпадают с местами отбора образцов.

Таблица 4

Содержание рудной немагнитной ($V_{\text{нм}}$) и ферромагнитной ($V_{\text{фм}}$) фракций, комплексный петрофизический коэффициент (КАПК) и значение расчетного суммарного содержания меди и никеля в образцах (скв. 2)

Номер образца	$V_{\text{нм}}, \%$	$V_{\text{фм}}, \%$	КАПК	Содержание (Cu+Ni) по данным опробования, у.е.	Расчетное содержание (Cu+Ni), %
Скважина 2					
21	1	5,6	1,4	4	3
23	5	3,3	0,2	2,5	3
20	3	6,2	1,5	2	1
22	0,4	1	-2,7	0,1	0
24	4	0,2	-3,4	0,1	2
19	0,2	0,2	-3,6	0,1	0

Полученные результаты можно также использовать для прогнозной оценки содержания платиноидов (МПП) в рудах этого типа, так как между значениями содержания Cu, Ni и МПП су-

ществует значимая прямая корреляционная связь (рис. 6). Это определяется общими процессами образования рудных минералов, содержащих эти элементы, а также их закономерным совместным нахождением в сульфидных рудах норильского типа, особенности которого детально описаны в работе [Спиридонов и др., 2015].

Заключение. Петрофизическое изучение вмещающих пород и руд на выбранном участке Талнахского месторождения позволило выявить петрофизические аномалии не только в пределах самих рудных горизонтов, но и в их экзоконтактах.

Результаты количественного минераграфического изучения петрофизических образцов показали, что интенсивность этих аномалий связана с уровнем концентрации сульфидов и магнетита во вмещающих породах и рудах в различных их сочетаниях. Повышение значений эффективной пористости на этих участках разреза обусловлено метасоматическими изменениями вмещающих пород.

Эти аномалии характеризуются существенными отклонениями от фоновых значений как самих петрофизических свойств, так и в большей степени КАПК. На этих участках разреза также происходит резкое снижение значений коэффициента парной корреляции между магнитной восприимчивостью и плотностью твердой фазы пород. Использование этих параметров позволяет значительно повысить чувствительность метода, что важно для выявления низкоконтрастных аномалий на относительно большом их удалении от рудных тел.

Выявление петрофизических аномалий и трендов их изменения в пространстве может повысить эффективность прогнозно-поисковых и оценочных работ на сульфидное оруденение норильского типа, а также дать дополнительную информацию для корректировки мест заложения и ориентировки скважин.

Достоверность результатов этих исследований можно значительно повысить (без существенного увеличения временных и материальных затрат) за счет изучения большего числа петрофизических образцов, а также после уточнения значений этих

физических свойств для основных рудных минералов по их концентратам. При этом необходимо проводить количественные минераграфические, а также геохимические и другие виды исследования.

Сочетание петрофизических и минераграфических исследований позволяет получить удовлетворительные результаты по оценке продуктивности сульфидного оруденения норильского типа.

Петрофизическая информация также необходима для более надежной интерпретации результатов геофизических работ [Куликов и др., 2014; Андреева и др., 2006; Ломакин, 1998].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Андреева Е.В., Бобачев А.А., Варенцов И.М., Верещина М.П. Комплексирование геофизических методов при поисках медно-никелевых руд на объектах ГМК «Норильский Никель» // Разведка и охрана недр. 2006. № 8. С. 71–79.

Богуславский М.А., Бурмистров А.А. Петрофизические свойства кимберлитов трубки Комсомольская и их связь с особенностями ее вещественного состава, условиями образования и алмазонасностью // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2009. № 6. С. 26–33.

Бурмистров А.А., Старостин В.И., Дергачев А.Л., Петров В.А. Структурно-петрофизический анализ месторождений полезных ископаемых: Учебник. 2-е изд. испр. и доп. М.: МАКС Пресс, 2009. 408 с.

Бурмистров А.А., Хайратдинов Р.Р., Агафонова О.В. Рудно-метасоматическая и петрофизико-геохимическая зональность золоторудного месторождения Светлинское (Ю. Урал) // Тез. науч. конф. «Ломоносовские чтения», 2014 г., сер. Геология (URL: https://geo.web.ru/db/msg.html?mid=1187684&uri=burmistrov_et_al_2014.pdf).

Куликов В.А., Варенцов И.М., Стерлигова И.Д., Соловьева А.В. Оценка удельного электрического сопротивления богатых медно-никелевых руд Норильского региона // Геофизика. 2014. № 6. С. 25–29.

Ломакин А.Б. Петрофизическое картирование слабконтрастных сред и прогноз месторождений полезных ископаемых: Автореф. докт. дисс. СПб., 1998.

Пахомов М.И., Пахомов В.И. Петрофизический метод выделения и оценки метасоматитов. М.: Недра, 1988.

Петрофизика: Справочник: В 3 кн. Кн. 1. Горные породы и полезные ископаемые / Под ред. Н.Б. Дортман. М.: Недра, 1992. 391 с.

Спиридонов Э.М., Серова А.А., Куликова И.М. и др. Генетическая минералогия Pd, Pt, Au, Ag, Rh в норильских сульфидных рудах // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57, № 5. С. 445–476.

Старостин В.И. Структурно-петрофизический анализ эндогенных рудных полей. М.: Недра, 1979. 240 с.

Поступила в редакцию 04.06.2020

Поступила с доработки 30.06.2020

Принята к публикации 30.06.2020