

## ПЕТРОФИЗИЧЕСКАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ НАТАЛКИНСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ

*В.М. Шарафутдинов, И.М. Хасанов, Т.И. Михалицына*

*Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт ДВО РАН, г. Магадан*

Поступила в редакцию 30 ноября 2007 г.

Проанализированы петрофизические свойства 1168 образцов горных пород и руд, отобранных в разрезах Наталкинского рудного поля, 235 из них исследованы геолого-минералогическими методами с изготовлением шлифов и аншлифов. Выявлена и обоснована общая двухуровневая петрофизическая зональность рудного поля, установлены ее взаимоотношения с рудными участками, межзонным пространством, вмещающими их измененными породами и минеральным составом. Оба уровня выявленной петрофизической зональности прослежены в пределах рудного поля по простиранию на 4 км и на глубину 800 м. Определена пространственно-генетическая связь субвертикальной зоны проводимости (приуроченной к Омчакскому рудному узлу) с петрофизическими изменениями, которые отражают установленный минералогический состав и текстурное строение метасоматитов и руд.

**Ключевые слова:** петрофизические параметры, субвертикальная зона проводимости, межзонное пространство, рудная залежь, пирротин, Северо-Восток России.

### ВВЕДЕНИЕ

Район исследований охватывает Наталкинское золоторудное месторождение, которое является крупнейшим в России. Для изучения геологической природы выявленных аномалий геофизических полей [22, 23] и субвертикальной электропроводной зоны [18] в пределах Наталкинского рудного поля были проведены исследования распределения петрофизических параметров (ПФП) и рудной минерализации. Основной целью данных исследований было изучение и корреляция петрофизической зональности рудного поля с процессами минерализации, а также попытка объяснения, на этой основе, природы субвертикальной зоны высокой электрической проводимости глубинного заложения, охватывающей весь рудный узел.

Аналогичные по параметрам субвертикальные и наклонные зоны высокой проводимости глубинного заложения, контролирующие золоторудные узлы, районы и крупные месторождения различного типа и генезиса, выделены и описаны для Дальневосточного региона и Востока Сибири в ходе предшествующих исследований и освещены в литературе [1–6, 26]. Для Северо-Восточного региона комплекс глубинных электроразведочных, петрофизических и геолого-минералогических исследований на крупнообъемном золоторудном месторождении проводится впервые.

### КРАТКАЯ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОМЧАКСКОГО УЗЛА

Территория Омчакского золоторудного узла (включающего Наталкинское месторождение) находится в пределах Яно-Колымской складчатой области и тяготеет к ее юго-восточной части, где располагается в юго-западном крыле крупного складчатого сооружения – Аян-Юряхского антиклинория. Само Наталкинское месторождение расположено в пределах Тенькинской антиклинали (Ю-З крыло). Складчатой структурой первого порядка для Наталкинского рудного поля является Тенькинская антиклиналь С-З направления. Основной складчатой структурой второго порядка – Наталкинская синклиналь. Наталкинская синклиналь является брахиструктурой, длина – 4.5 км, ширина – 2.5 км, простирание – 310–320°, крылья залегают под углами 40–50° [12].

В геологическом строении района принимают участие геосинклинальные отложения перми и триаса, образующие непрерывный разрез общей мощностью около 6–7 км. В незначительном количестве распространены вулканогенные образования нижнего мела. Меловые отложения с угловым стратиграфическим несогласием залегают на отложениях перми. Толща осадочных пород прорвана рядом гранитоидных тел и даек различного состава и возраста. Четвертичные отложения представлены ал-

лювиальными, пролювиальными и делювиальными фациями [11].

На территории узла осадочные породы имеют позднепермский возраст [7]. В основании разреза верхнепермских пород на территории Аян-Юряхского антиклинория залегают отложения родионовской свиты, в пределах Омчакского рудного узла они отсутствуют и выходят на дневную поверхность в бассейне р. Нелькоба. Для нижней в узле пионерской свиты характерны неяснопятнистые разновидности алевритистых аргиллитов. В породах отмечается повсеместное присутствие редкой вкрапленности пирита кубической формы. Расположенная выше атканская свита представлена неслоистыми или неяснослоистыми диамиктитами. Размерность рассеянного материала диамиктитов различная, преимущественно гравийная, распределение его неравномерное. Встречаются прослой алевритистых аргиллитов с примесью галечной размерности. Гравийный материал часто неокатанный, галечный – хорошей окатанности. Обломки представлены кислыми и средними вулканическими породами (альбитофирами, фельзитами), реже интрузивными (диоритами), осадочными породами (аргиллитами, песчаниками). Омчакская свита характеризуется флишоидным переслаиванием песчаников, алевролитов и аргиллитов, горизонтальной, в меньшей степени косою и градиционной слоистостью.

Являясь частью метаморфического пояса мезозоид Колымы [11], измененные породы Аян-Юряхского антиклинория относятся к зеленосланцевой и амфиболитовой фациям метаморфизма, отвечая андалузит-силлиманитовому типу изменений. В золоторудных полях метаморфизм сочетает в себе одновременно признаки регионально-контактового, дислокационного и гидротермального метаморфизма [9, 10].

Разрывные нарушения в районе весьма многочисленны, четко проявлены и в значительной мере определяют структурный план территории. Преобладают продольные относительно складчатой структуры и поперечные к ней разрывные нарушения. Первые имеют преимущественно северо-западное простирание, а поперечные разломы – северо-восточное и широтное. Главной тектонической структурой района является Омчакский (Тенькинский) глубинный разлом. Осевой шов разлома следует вдоль долины р. Омчак. Установленная длина его – более 300 км. Амплитуды перемещений блоков пород (взбросо-сдвигового типа) вдоль разлома составляют 300–400 м.

В пределах Омчакского рудного узла выделяются несколько полей слабой золотоносности и три золоторудных месторождения: Наталкинское, Омчак-

ское и Павликовское. В металлогеническом отношении все они однотипны и относятся к пирит-арсенопиритовому типу золотокварцевой малосульфидной формации или к группе месторождений умеренных и значительных глубин. По структурно-морфологическим особенностям все месторождения принадлежат к месторождениям типа жильно-прожилковых зон.

Петрофизическими исследованиями, результаты которых приведены в данной статье, охвачена северная часть Омчакского рудного узла, включающая основное Наталкинское рудное поле. Здесь к серии сложно сочетающихся продольных разрывов рудоносного тектонического блока приурочены более 100 рудных зон – тел типа линейных штокверков, образованных кварцевыми прожилками (0.5–3 см) и жилами сложной формы. Границы рудных тел (зон) проявлены неотчетливо и определяются по данным опробования. По последним представлениям о строении месторождения как большеобъемного объекта с бедными преимущественно прожилково-вкрапленными рудами [8], оно рассматривается как сочетание рудных зон с содержаниями золота 2–10 г/т и межзонного пространства с бедными прожилково-вкрапленными рудами (0.4–2 г/т), объединяемыми в рудную залежь [13]. Такое представление о строении месторождения отражает определенные закономерности формирования месторождения, выявленные в процессе изучения его петрофизических параметров, а также позволяет предположить сочетание в пределах месторождения золотокварцевого и золото-сульфидно-вкрапленного типов оруденения.

По данным глубинных геоэлектрических исследований, Омчакский рудный узел приурочен к субвертикальной, мощностью до 4–6 км, зоне аномально низкого кажущегося сопротивления, прослеженной на глубину до 10–15 км. Суммарная мощность осадочного чехла территории, прилегающей к узлу, достигает 6–10 км. В его разрезе выделяются два геоэлектрических комплекса [18].

Верхний геоэлектрический комплекс, мощностью 2–6 км, характеризуется средневзвешенным кажущимся удельным сопротивлением 100 Ом·м. Комплекс в значительной своей части выходит на дневную поверхность и потому надежно сопоставляется с алевролитоглинистыми сланцами, алевролитами и песчаниками триаса–верхней перми ( $P_{2at-T_{1.3}}$ ). Нижний комплекс, мощностью 4–5 км и сопротивлением 0.06–3 Ом·м, на поверхности представлен только своей верхней частью, сложенной преимущественно углеродистыми алевролитоглинистыми сланцами родионовской ( $P_{1rd}$ ) и пионерской ( $P_{2pn}$ ) свит перми. Средние содержания  $C_{орг}$  в них варьируют от 1.11 % в родионовской свите до 1.4 % в нижнепионерской

подсвете. Нижняя часть комплекса не обнажена и представлена, по всей вероятности, метаморфизованными и сульфидизированными песчано-глинистыми отложениями нижнего и среднего палеозоя, интерпретируемыми так на основании состава отложений прилегающей с запада территории Охотского срединного массива.

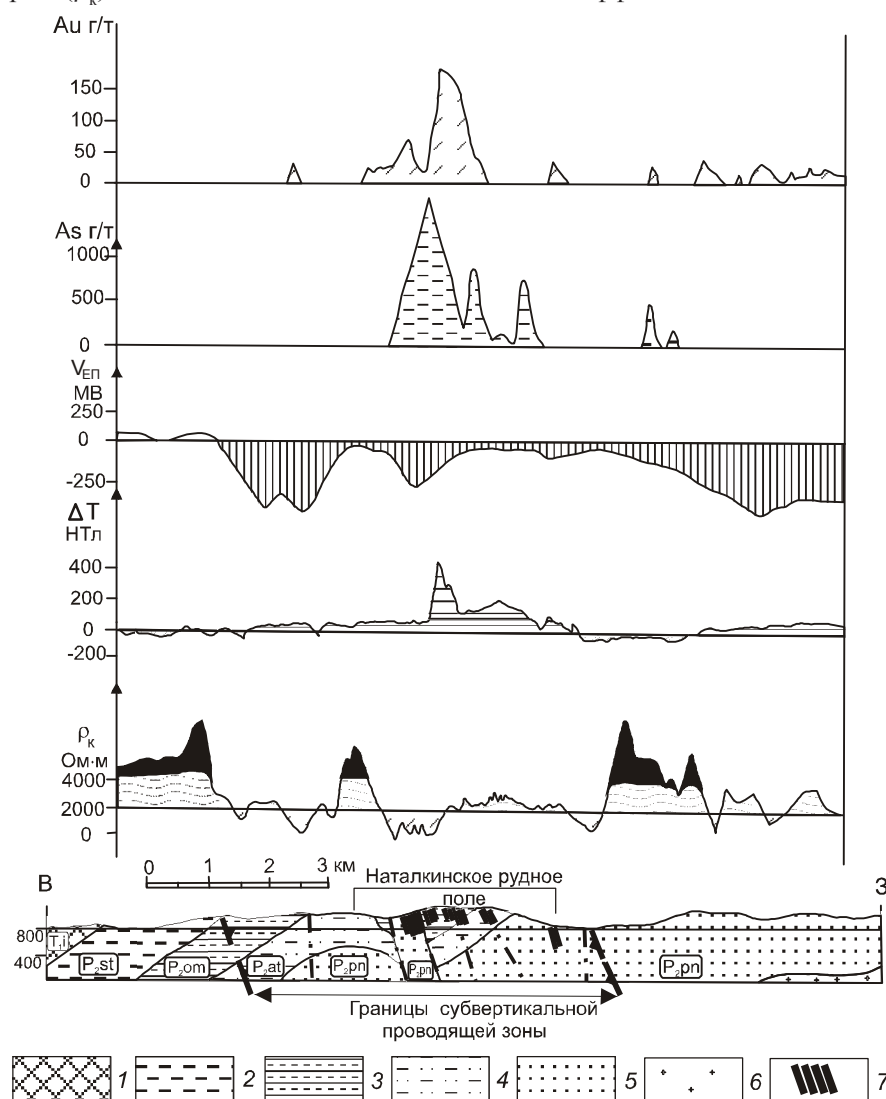
Подстиляется осадочный чехол относительно высокоомным (50–100 Ом·м) слоем, по-видимому, архей-протерозойскими образованиями кристаллического фундамента [18].

В наземных геофизических съемках (рис. 1) рудное поле отображается отрицательными аномалиями естественного электрического поля, локальной положительной аномалией магнитного поля, в геохимических полях – аномалиями мышьяка и золота. Последние связаны с областью рассеянной сульфидной минерализации, по которой ограничивается рудное поле. Значения кажущегося сопротивления пород ( $\rho_k$ ) имеют относительно повышенный диффе-

ренцированный характер (чередование локальных аномалий повышенного и пониженного сопротивления) на фоне общего понижения сопротивления. На графиках кажущегося удельного сопротивления достаточно уверенно выделяется интервал, который может быть представлен как предполагаемая проекция на дневную поверхность субвертикальной проводящей зоны (рис. 1).

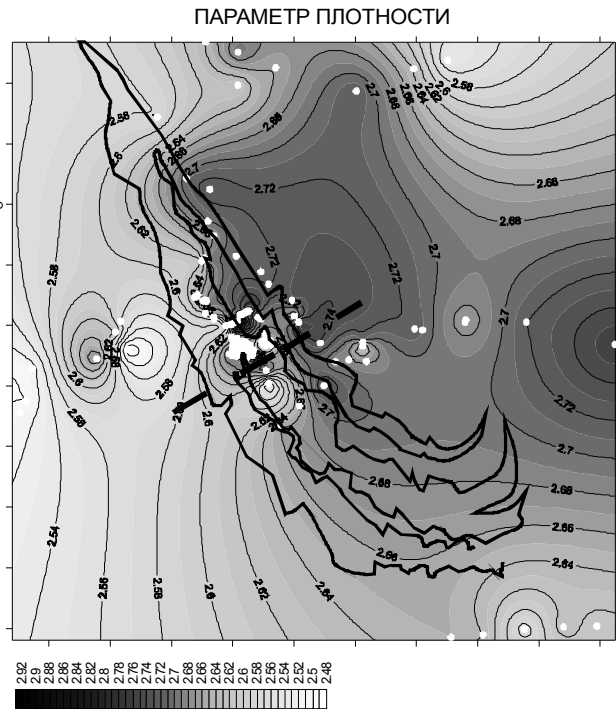
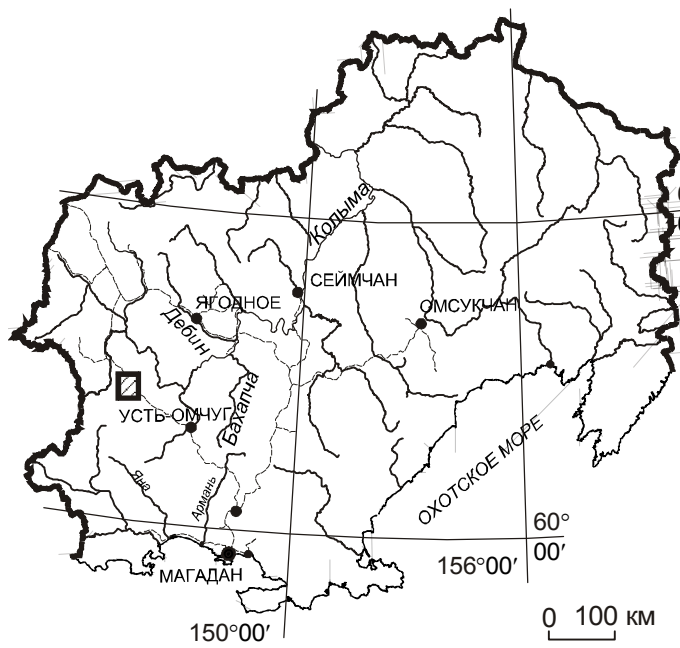
#### ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ, МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Образцы для исследований отбирались с поверхности по отдельным профилям (протяженностью до 3–4 км), пересекающим все рудное поле (рис. 2). Было отобрано 288 образцов горных пород и руд. По аномальным участкам произведен дополнительный отбор образцов с целью детализации и проверки выявленных аномалий распределения петрофизических параметров. Кроме того, было исследовано 111 образцов керна (рис. 3). Образцы отбира-

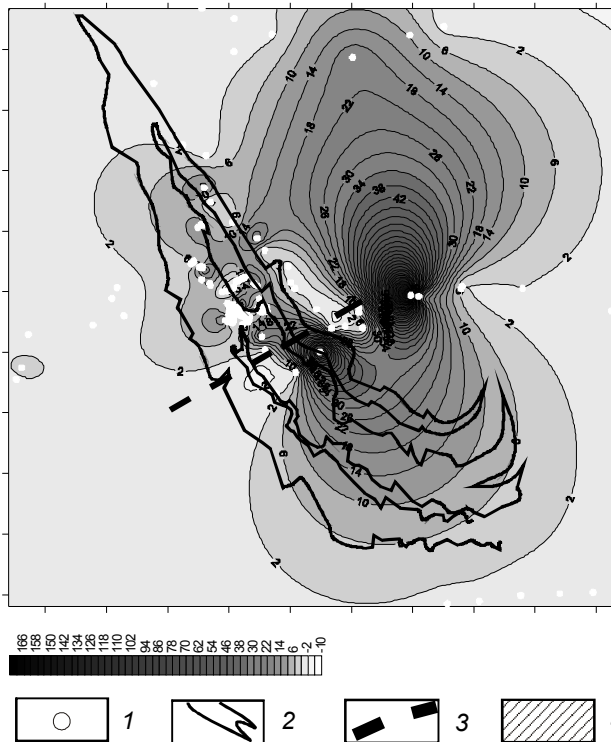


**Рис. 1.** Графики Au, As (вторичный ореол рассеяния), потенциала ( $V_{ЕП}$ ) естественного поля, аномального магнитного поля ( $\Delta T_a$ ) и сопротивление ( $\rho_k$ ) над Наталкинским рудным полем (по Е.Е. Воробьевой [21]).

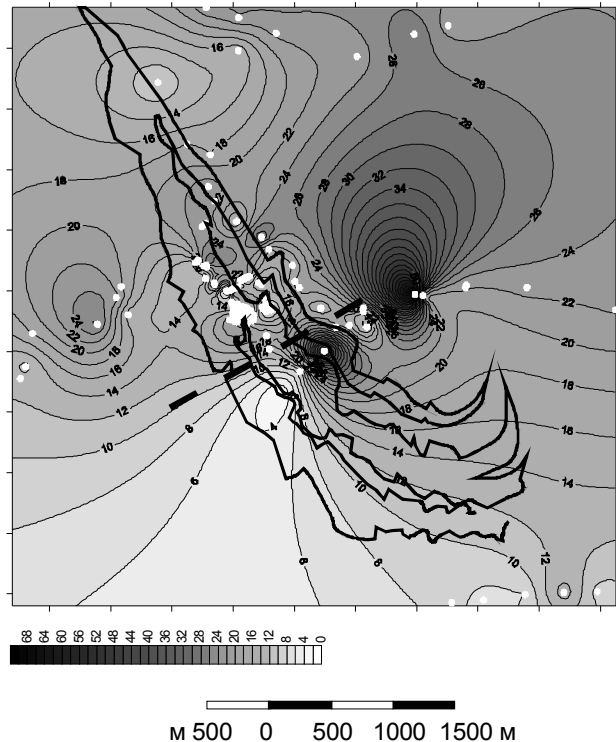
1 – тонкослоистые алеврито-глинистые сланцы индского яруса; 2 – полимиктовые песчаники, алеврито-глинистые сланцы, редкие пласты конгломератов старательской свиты; 3 – алевро-глинистые сланцы, пласты песчаников и туфогенных сланцев омчакской свиты; 4 – туфогенные сланцы с прослоями и линзами глинистых сланцев, алевролитов, песчаников атканской свиты; 5 – глинистые сланцы с тонкими прослоями песчаников, алевролитовые сланцы пионерской свиты; 6 – гранодиориты; 7 – рудные зоны.



ПАРАМЕТР ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ



ПАРАМЕТР МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ



м 500 0 500 1000 1500 м

Рис. 2. Распределение петрофизических параметров по поверхности Наталкинского рудного поля.

1 – точки отбора образцов; 2 – контур рудной залежи (Au ≥ 0.4 г/т); 3 – местоположение профиля 20; 4 – Омчакский рудный узел.

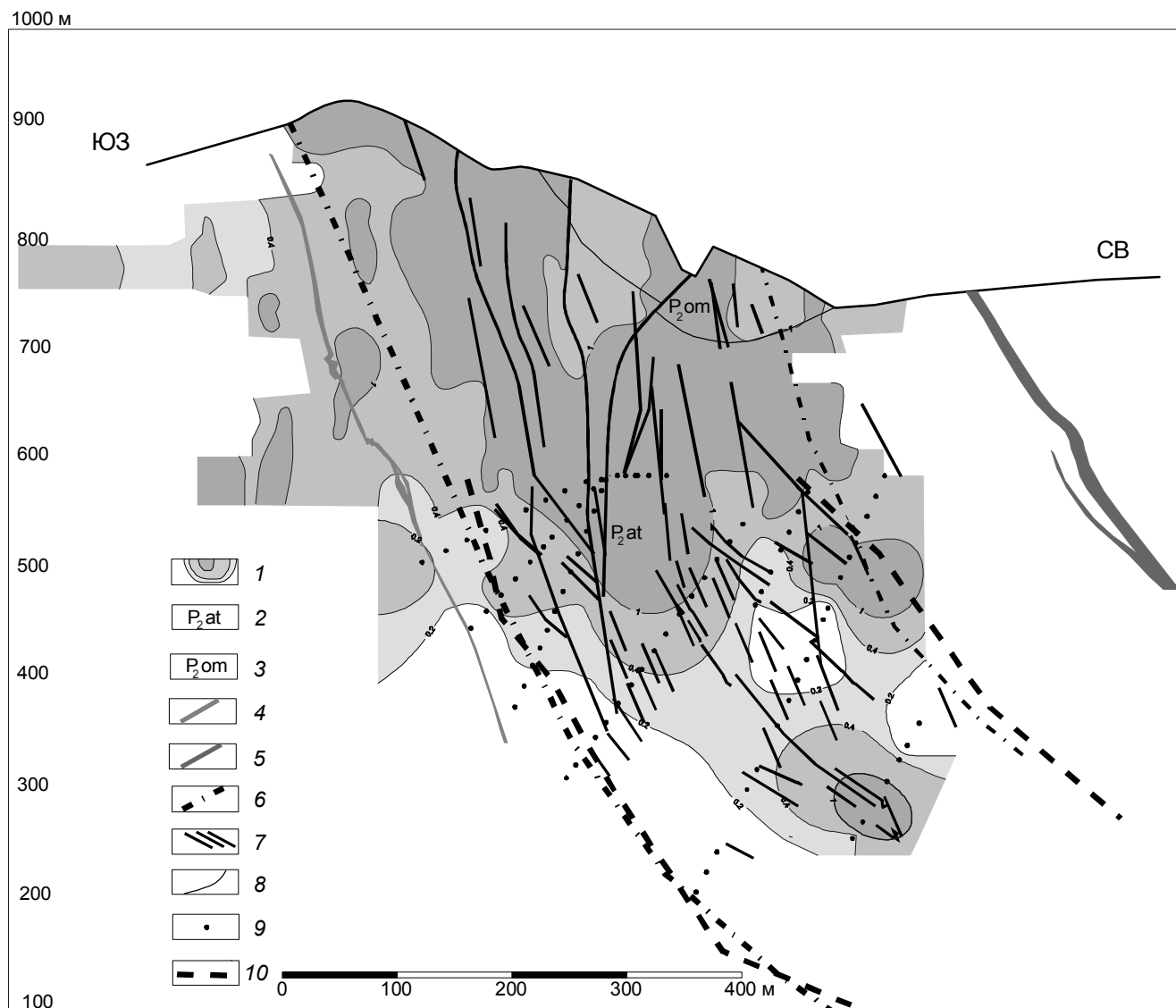


Рис. 3. Схематический геологический разрез по профилю 20.

1 – изолиты концентрации золота в г/т; 2 – образования атканской свиты: углисто-глинистые сланцы, песчаники, гравелиты, конгломераты; 3 – образования омчакской свиты: алевролиты, алевро-глинистые сланцы, песчаники; 4 – дайки кварц-альбитовых порфиров; 5 – дайки спессартитов; 6 – разрывные нарушения; 7 – кварцевые прожилково-жилковые зоны; 8 – геологические границы; 9 – точки отбора образцов; 10 – контур “рудных” классов.

лись с интервалом 20 м, на глубину до 800 м от дневной поверхности. Таким образом, исследования распределения петрофизических параметров проводились как в горизонтальной, так и вертикальной плоскости (рис. 4) Наталкинского рудного поля.

Методика геолого-петрофизических исследований включала геологическое описание образцов, измерение петроплотностных и петромагнитных параметров, а также минералого-петрографические исследования (микроскоп “Ахиорлан”). Затем образцы были проанализированы рентгеноспектральным флуоресцентным анализом на пороодообразующие

компоненты и методом количественного спектрального анализа (ЭКСА) на широкий круг элементов. Геохимические данные обрабатывались в прикладном программном пакете “Leader”, “Statistica”. При изучении пород наряду с традиционными петрографическими методами использованы петрохимические модули Я.Э. Юдовича [25], позволяющие более полно определить особенности состава пород, микроскопическое изучение которых вызывает трудности.

Замеры плотности проводились на денситометре ДГП-15, магнитной восприимчивости – на прецизионном цифровом капноместе Kappabridge KLY-2,



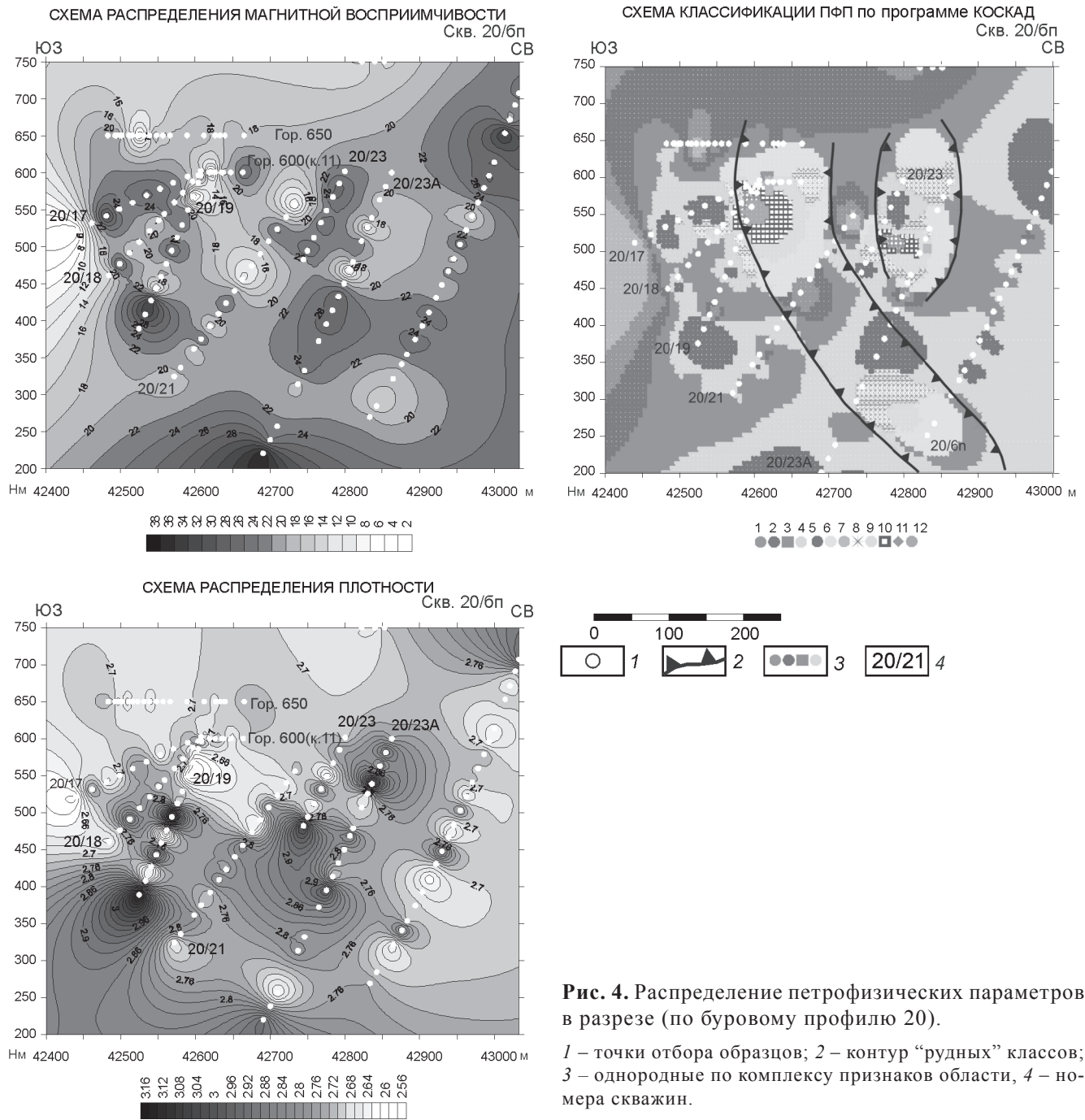


Рис. 4. Распределение петрофизических параметров в разрезе (по буровому профилю 20).

1 – точки отбора образцов; 2 – контур “рудных” классов; 3 – однородные по комплексу признаков области, 4 – номера скважин.

остаточной намагниченности – на рок-генераторе JR-4. Методика замеров стандартная для петрофизических исследований. Для оценки случайных ошибок измерений физических параметров производились контрольные замеры – более 5 % общего объема наблюдений [19]. В процессе контроля определялись абсолютная и относительные погрешности измерений. В целом, для Наталкинского рудного поля погрешности измерений составили по плотности: абсолютная – 0.009 г/см<sup>3</sup>, относительная – 0.32 %; по маг-

нитной восприимчивости – 6.66 %, по остаточной намагниченности – 6.28 %, что полностью соответствует нормативным требованиям точности лабораторных петрофизических исследований [19, с.16, табл. I.1].

Результаты петрофизических наблюдений были обработаны программным комплексом спектрально-корреляционного анализа данных (КОСКАД) с целью выделения и уточнения взаимной зависимости ПФП между собой и с рудной минерализацией. В процессе этих работ использовалась программа

классификации, в которой реализован алгоритм разделения многомерных нормальных смесей, предложенный Петровым А.В. [15]. Применение данного алгоритма позволило провести классификацию многопризнаковых геофизических (плотность, магнитная восприимчивость) и геохимических (первичные ореолы рассеяния золота) наблюдений на однородные области. Конечное число классов (однородных областей) определялось опытным путем в диапазоне от 7 до 14. Оптимальным количеством разбиения исследуемой территории на области, однородные по комплексу признаков, с использованием априорной геологической информации, было признано 12.

Кроме вышеуказанного, для выявления общих корреляционных закономерностей в целом по месторождению также использовались данные ПФП, измеренные по 769 образцам, отобранным по штольням Наталкинского месторождения [21].

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Комплексный анализ пространственного положения рудного поля и значений ПФП (рис. 2) позволил выявить следующие закономерности.

В пределах рудного поля наблюдается возрастание плотности горных пород ( $\sigma$ ) с запада на восток от 2.48 г/см<sup>3</sup> до 2.76 г/см<sup>3</sup>. Сама рудная залежь месторождения характеризуется дифференцированно повышенными значениями  $\sigma$  (2.60–2.76 г/см<sup>3</sup>) и ограничивается с востока зоной высоких градиентов.

Магнитная восприимчивость пород ( $\alpha$ ) в пределах рудного поля возрастает с юго-запада на северо-восток от 0.7 до 60.8·10<sup>-5</sup> СИ, характеризуясь в контуре рудной залежи сложным дифференцированным распределением. В северо-западной и центральной частях рудного поля отслеживается ряд локальных аномалий пониженных и повышенных значений  $\alpha$  (при преобладании последних), в юго-восточной части – монотонное петромагнитное поле. Величина  $\alpha$  является, главным образом, мерой концентрации в породах ферромагнитных минералов ( $C_{\text{фм}}$ ). Для всех видов пород наблюдается линейный рост  $\alpha$  с увеличением  $C_{\text{фм}}$ . Эта зависимость проявляется наиболее ярко тогда, когда уровень значений  $\alpha$  (>15.9·10<sup>-5</sup> СИ) превышает так называемый “парамагнитный уровень” [24].

Остаточная намагниченность ( $I_n$ ) горных пород центральной и южной частей рудной залежи характеризуется преимущественно повышенными значениями (15.9–39.8·10<sup>-5</sup> СИ), северной части – пониженными. Она отражает, главным образом, испытанные породами и минералами внешние воздействия, оказав-

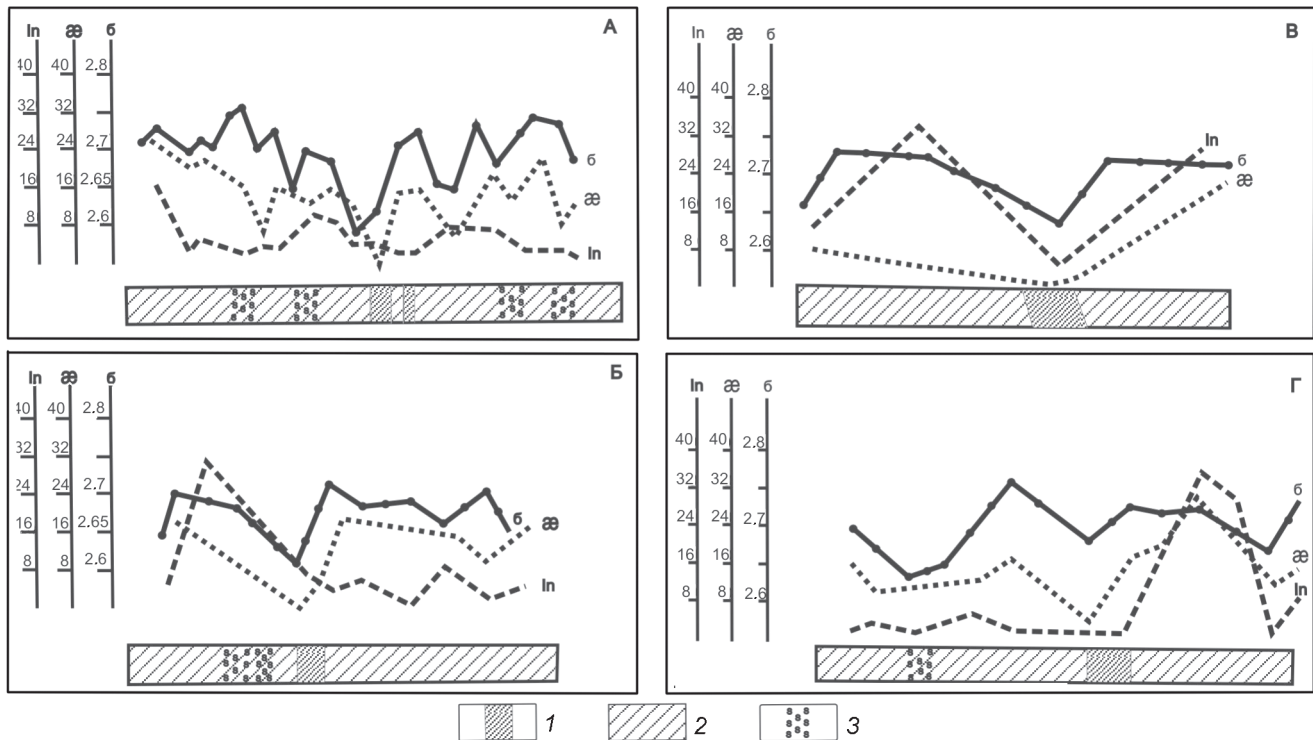
шие влияние на магнитное состояние породы и, в меньшей мере, вещественный состав ферромагнетиков и их концентрации. В силу этого  $I_n$  в отражении распределения и концентрации ферромагнитных минералов играет второстепенную роль [24].

В обобщенном виде график распределения ПФП с минимумами в центральных частях и максимумами на флангах имеет рисунок, близкий к “М-образному” (рис. 5), как в границах рудной залежи, так и в пределах всего рудного поля в целом. Такой характер распределения ПФП подтверждается и лабораторными экспериментами при прогреве пород в локальном температурном интервале [20].

В процессе изучения распределения петрофизических параметров и золотого оруденения на глубоких горизонтах месторождения, а также в разрезе профиля 20 установлено, что рудная залежь и окружающие ее вмещающие породы обладают повышенной плотностью (от 2.7 до 2.87 г/см<sup>3</sup>) и магнитной восприимчивостью (17.5–65.3·10<sup>-5</sup> СИ), а сами рудные зоны фиксируются локальными аномалиями пониженных значений этих параметров и зонами их градиентов (рис. 4, 5). Классификацией ПФП по программе КОСКАД, в блоке горных пород, вмещающем рудную залежь, установлено зональное увеличение  $\alpha$  и  $\sigma$  по падению (классы 2, 3.4) в северо-восточном направлении, соответственно, от 10.8 до 17.9·10<sup>-5</sup> СИ, и от 2.72 до 2.77 г/см<sup>3</sup> (рис. 4).

Совместная классификация ПФП и золоторудной минерализации (рис. 4, табл.1) показывает, что “рудные” классы (классы 9÷12; Au ≥ 1.73 г/т) обладают более низкими значениями  $\sigma$  (осредненное значение 2.723 г/см<sup>3</sup>) и  $\alpha$  (14.12·10<sup>-5</sup> СИ), чем “слаборудные” (классы 6÷8; Au ≥ 0.4 г/т;  $\alpha$  – 16.48·10<sup>-5</sup> СИ и  $\sigma$  – 2.735 г/см<sup>3</sup>) или “безрудные” (классы 1÷5; Au ≥ 0.18 г/т,  $\alpha$  – 15.57·10<sup>-5</sup> СИ и  $\sigma$  – 2.736 г/см<sup>3</sup>). Класс “слаборудный” соответствует термину “межзонное пространство” [8]. “Рудные” и “слаборудные” классы, определяющие контуры рудной залежи [13], укладываются в зоны северо-восточного падения и прослеживаются до глубин 800 м (рис. 3, 4), при этом глубинная часть распространения ПФП и рудной залежи не ограничена.

Следует отметить, что северо-восточное падение рудолокализирующих структур, зафиксированное в глубоких скважинах (до 800 м) и отраженное в распределении ПФП (рис. 4), совпадает с направлением падения ранее выделенной субвертикальной проводящей зоны [18], охватывающей все рудное поле и являющейся, по-видимому, фрагментом зоны Тенькинского глубинного разлома. Данная закономерность, наряду с другими фактами, является одним из наиболее важных свидетельств, подчеркивающих



**Рис. 5.** Распределение петрофизических параметров для рудных зон и вмещающего межзонного пространства. 1 – рудные зоны; 2 – межзонное пространство; 3 – зоны окварцевания; А – рудное тело прожилково-метасоматического типа, гор.600; Б – рудное тело прожилково-жильного типа, гор.750; В – рудное тело жильного типа, гор.650; Г – рудное тело типа “минерализованная зона смятия-дробления”, гор.650;  $I_n$  – остаточная намагниченность  $\cdot 10^{-5}$  СИ,  $\alpha$  – магнитная восприимчивость  $\cdot 10^{-5}$  СИ,  $\sigma$  – плотность  $\text{г/см}^3$ .

**Таблица 1.** Распределение петрофизических параметров и содержания золота по классам КОСКАД.

Номера классов	Золото, среднее значение (г/т)	Магнитная восприимчивость, среднее значение $\cdot 10^{-5}$ СИ	Плотность, среднее значение ( $\text{г/см}^3$ )
11	4.98	16.95	2.81
12	4.49	9.0	2.66
10	2.88	14.26	2.7
9	1.73	16.27 (среднее по группе <b>14.12</b> )	2.72 ( <b>2.723</b> )
8	0.81	17.97	2.75
6	0.76	14.98 (среднее по группе <b>16.48</b> )	2.72 ( <b>2.735</b> )
1	0.18	10.76	2.71
2	0.15	12.93	2.72
3	0.14	15.66	2.77
4	0.08	17.88	2.75
5	0.04	20.63 (среднее по группе <b>15.57</b> )	2.73 ( <b>2.736</b> )

*Примечание:* класс № 7 не использовался в обработке в связи с его малой представительностью (1 точка отбора образцов).

определяющую роль зоны разлома как рудоподводящего канала.

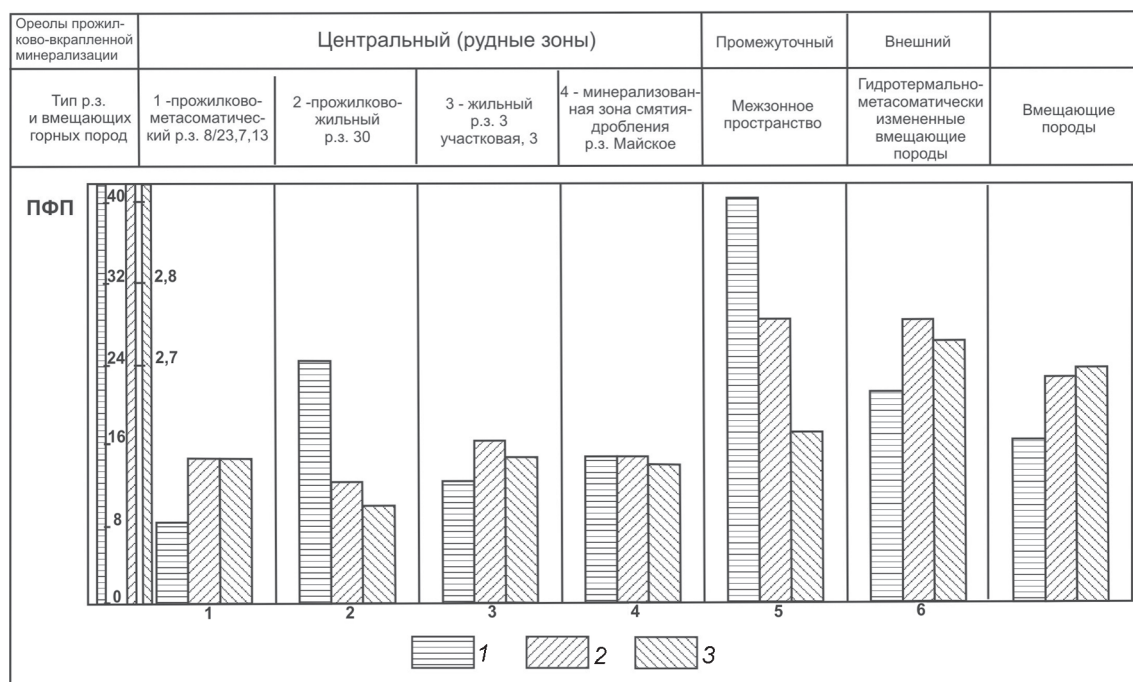
Изучение распределения ПФП в зальбандовых частях, в пределах рудной залежи и в обогащенных интервалах – рудных зонах – показывает, что существуют элементы горизонтальной и вертикальной зональности, отражающиеся в следующих закономерностях.

Рудные зоны характеризуются понижением всех ПФП относительно вмещающих их горных пород (до абсолютных средних значений  $I_n \sim 9.6\text{--}11.9 \cdot 10^{-5}$  СИ;  $\alpha \sim 11.9\text{--}15.9 \cdot 10^{-5}$  СИ;  $\sigma \sim 2.66\text{--}2.68 \text{ г/см}^3$ ) и часто фиксируются “М-образными” аномалиями ПФП (рис. 5, 6).

Межзонное пространство (участки рудной залежи со средней концентрацией Au – 0.4 г/т) характеризуется увеличением всех ПФП:  $I_n$  и  $\alpha$  резко дифференцированы от 1.6–2.4 до  $63.7\text{--}79.6 \cdot 10^{-5}$  СИ,  $\sigma$  увеличивается до 2.7–2.71  $\text{г/см}^3$ .

Внешний ореол прожилково-вкрапленной рудной минерализации или вмещающие рудную залежь гидротермально-метасоматически измененные горные породы характеризуются стабилизацией пара-





**Рис. 6.** Средние петрофизические характеристики различных типов рудных зон, межзонного пространства и вмещающих их пород.

1 – остаточная намагниченность, ·10<sup>-5</sup> СИ; 2 – магнитная восприимчивость, ·10<sup>-5</sup> СИ; 3 – плотность, г/см<sup>3</sup>.

метров  $I_n$  и  $\alpha$  в районе значений 19.9–31.8·10<sup>-5</sup> СИ (без резких градиентов) и  $\sigma$  до 2.73–2.75 г/см<sup>3</sup> (рис. 6).

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОЛОГО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В настоящее время в рудах и околорудных метасоматитах Наталкинского месторождения определены 73 жильных и рудных минерала. Из жильных минералов резко преобладает кварц, полевые шпаты (адуляр, альбит) и карбонаты (кальцит, анкерит и др.) присутствуют в подчиненном количестве. Серицит, хлорит, барит, апатит, скаполит относятся к числу редких. Рудная минерализация представлена преимущественно арсенопиритом и пиритом (рис. 7в, г, д), с преобладанием первого. В незначительных количествах в рудах присутствуют халькопирит, пирротин, сфалерит, галенит, рутил (рис. 7е) и др. [12]. Сульфиды, как правило, образуют рассеянную или линейно распределенную вкрапленность в прожилках. С рудной минерализацией ассоциируют прожилки кварца, альбита, железо-магнезиальных карбонатов. Углеродистое вещество (УВ) достаточно равномерно распределено в объеме породы. Под микроскопом хорошо видно сосредоточение УВ в виде тонких полос, параллельных слоистости (рис. 7а, б). В процентном количестве УВ составляет не более 1–2 %.

По петрохимическому составу (табл. 2) вмещающие породы характеризуются как нормально-щелочные (НМ+КМ=0.25–0.40), в единичных пробах отмечается повышенная щелочность до 0.57; наблюдается преобладание натрия над калием, в редких аргиллитовых прослоях содержание калия увеличивается (ЩМ<1). Отличительным признаком рассматриваемых пород является повышенная железистость (ЖМ > 0.60), сочетающаяся с закисным ее типом.

По результатам корреляционного анализа всей выборки представленного геологического материала выделяются три наиболее типичные геохимические ассоциации: 1) золоторудная – Pb, Mo, SiO<sub>2</sub>, Ag, As, W, Sn, Zn, Li, Cu, Na<sub>2</sub>O; 2) карбонатная – MnO, CaO, Mg, Ni, Cr, Co; 3) Вi, Ва в тесной корреляции с K<sub>2</sub>O, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, и P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Элементами-индикаторами оруденения являются мышьяк, вольфрам, сурьма, марганец. Отмечается вынос бария из рудных зон и обогащение им вмещающих пород [16].

В процессе исследований были выделены группы пород, которые по петрофизическим параметрам (локальные аномалии и резко градиентные изменения ПФП) определены как “аномальные” в количестве 75 проб, остальные отнесены к “вмещающим”. Отложения аномальной зоны представлены преимуще-

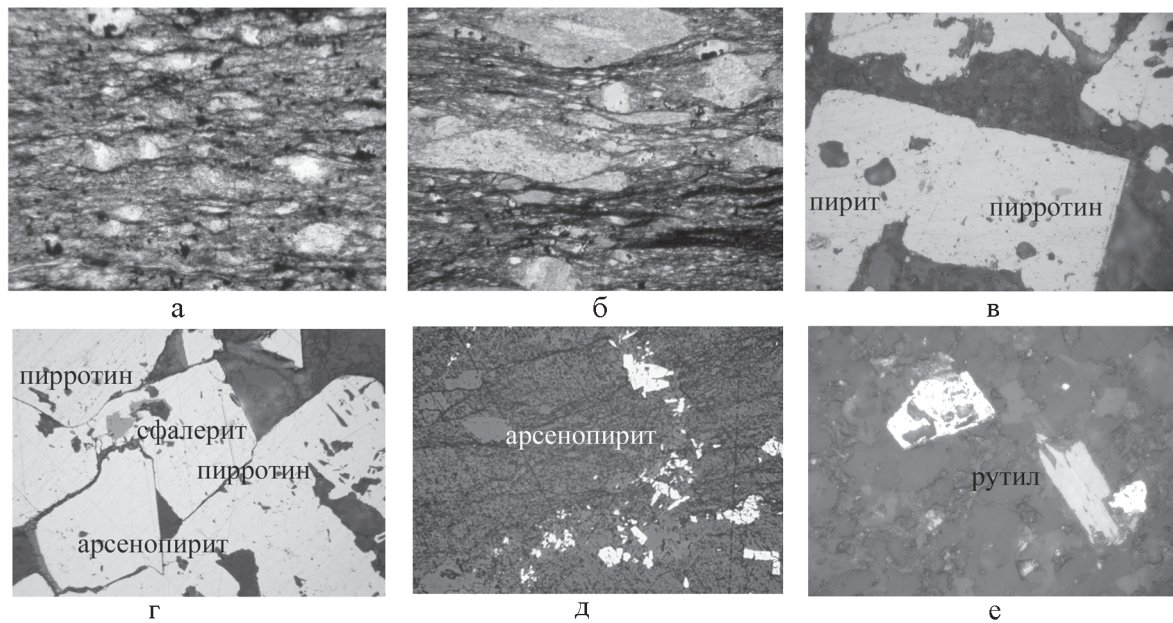


Рис. 7. Фотографии шлифов рудовмещающих пород атканской свиты.

а–б – распределение УВ в рудовмещающих породах пермских отложений атканской свиты: а – увел. 100, б – увел. 200, шлиф; в– включения пирротина в пирите, увел. 500, полированный шлиф; г – включения сфалерита и пирротина в арсенопирите, увел. 500, Полированный шлиф; д – арсенопирит-кварцевый прожилок, увел. 200, полированный шлиф; е – вкрапленность рутила в диамиктитах атканской свиты, увел. 500, полированный шлиф. Микроскоп “Аxioplan-2”.

Таблица 2. Петрохимические характеристики верхнепермских рудовмещающих пород.

Модуль	Аномальные зоны	Вмещающие породы
	содержание среднее	содержание среднее
НКМ	0.37	0.41
ПМ	3.00	4.60
ЩМ	1.66	2.10
ГМ	0.48	0.42
ТМ	0.056	0.052
ЖМ	0.76	0.69
ФМ	0.25	0.21

Примечание. НКМ –  $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$  – модуль нормированной щелочности, ПМ –  $(\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO})/\text{K}_2\text{O}$  – плагио-оклазовый модуль, ЩМ –  $(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$  – щелочной модуль, ГМ –  $(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO})/\text{SiO}_2$  – гидролизатный модуль, ТМ –  $(\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$  – титановый модуль, ЖМ –  $(\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MnO})/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2)$  – железный модуль, ФМ –  $(\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MgO})/\text{SiO}_2$  – фемический модуль.

шественно тонким переслаиванием светло-серого алевролита и темно-серого, почти черного аргиллита, единично встречаются диамиктиты. В результате корреляционного анализа проб с “аномальными” петрофизическими параметрами выделяются следующие геохимические ассоциации: 1. Ca, MnO, Zr, Sn, W; 2. MgO, Ni, Cr, Co; 3. Ag, Zn, Cu, Mo, Bi, Pb; 4.  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , Ba; 5.  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{SiO}_2$ , Fe,  $\text{TiO}_2$ , As. В аномальных зонах отмечается увеличение гидроли-

затного, железного и титанового модуля, снижение щелочности.

Группа пород, выделенная как “вмещающие” в количестве 114 проб, представлена преимущественно диамиктитами, характеризуется геохимическими ассоциациями: 1.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ , Ba,  $\text{SiO}_2$ ; 2. Zr, Sn, Zn, Bi, с менее тесной связью Cr, Ni и MgO, Pb; 3. Co, Cu,  $\text{Na}_2\text{O}$ , Fe; 4. CaO, MnO,  $\text{PaO}_3$ , Mo; 5. W, Ag, As. Отмечается увеличение значений щелочного и плагио-оклазового модуля.

В обеих группах пород наблюдается тесная корреляционная связь карбонатной группы за счет метасоматического и жильного карбоната, позитивная корреляция ЖМ с ФМ и ГМ.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Формирование “М-образного” графика распределения ПФП в единичной рудной зоне и всей рудной залежи объясняется следующим. В пределах рудных полей, как правило, концентрация сульфидов увеличивается во внешнем ореоле оруденения [12], что вызывает резкое возрастание петромагнитных ( $I_n$ ,  $\alpha$ ) параметров (ПМП) при экзоконтактовом температурном воздействии (200–350°C) и связано как с созданием парциальной термоостаточной намагниченности, так и с новообразованием ферромагнитных минералов, что подтверждается лабораторными

экспериментами [20]. Учитывая температуру становления жильных тел месторождения 280–380°C [12], наличие аномалий ПМП может быть обусловлено узколокальным температурным потоком в интервале 2÷4 Н (Н – мощность объекта – отдельного жильного тела или всей залежи), генетически связанным с циркуляцией гидротермальных растворов.

Характер изменения ПФП в пределах рудного поля позволяет сделать вывод о двухэтапной (или двухуровневой) петрофизической зональности.

Первым уровнем является повышение значений ПФП и постепенное площадное изменение физических свойств горных пород в определенном направлении (либо с запада на восток, либо с юго-запада на северо-восток) [23]. Это связано с насыщением халькофильными и сидерофильными группами металлов больших по объему масс горных пород и может быть обусловлено влиянием глубинного разлома, который фиксируется выявленной авторами субвертикальной зоной повышенной проводимости.

Второй уровень находит отражение в локальных аномалиях и резко градиентных изменениях ПФП в экзоконтактах рудной залежи и рудных зон, что, вероятно, связано пространственно (генетически?) 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.

Выявленная ранее [23] и подтвержденная вышеизложенными результатами исследований двухуровневая петрофизическая зональность имеет минералогическое обоснование, выражающееся в двухстадийном образовании пирротина: период интенсивного метасоматического замещения осадочных пород, проявленный в формировании арсенопирит-кварц-альбитовых метасоматитов, и в золоторудную стадию того же этапа. Признаками данного этапа являются: равномерная вкрапленность пиррита, замещение альбита серицитом и кварцем. Преобразование пород в связи с процессами интенсивного динамометаморфизма выражены сильной рассланцованностью и образованием УВ.

Относительно петрохимических параметров (табл. 2) можно отметить, что по гидролизатному модулю породы относятся к двум типам: сиаллитам и сиферлитам (0.31–0.55). Породы аномальной петрофизической зоны характеризуются следующими особенностями: увеличением содержания гидрослюдистого материала и интенсивности сульфидной минерализации; повышенными концентрациями магния, свинца, хрома, лития, цинка, железа, висмута, оксидов калия и титана; пониженным содержанием крем-

**Таблица 3. Физические свойства рудных минералов Наталкинского рудного поля (по данным [12, 17, 19]).**

Номер группы	Минерал	Плотность в г/см <sup>3</sup>	Удельное сопротивление, в Ом·м	Магнитная восприимчивость, в 10 <sup>-5</sup> СИ
1	Галенит	7.5–7.15	10 <sup>-5</sup> –10 <sup>-3</sup>	-3.3
	Арсенопирит	4.5–6.0	10 <sup>-5</sup> –10 <sup>-3</sup>	1–10
	Пирит	5.02–4.91	10 <sup>-4</sup> –10 <sup>-1</sup>	1–200
	Магнетит	5.17	10 <sup>-3</sup> –10 <sup>-2</sup>	(8.8–25)×10 <sup>5</sup>
	Марказит	4.0–4.7	10 <sup>-2</sup> –10 <sup>-1</sup>	1–20
	Пирротит	4.58–4.7	10 <sup>-5</sup> –10 <sup>-4</sup>	(0.13–1.3)×10 <sup>5</sup>
	Сидерит	3. –3.9	10·10 <sup>3</sup>	(2.5–7.5)×10 <sup>2</sup>
	Ильменит	4.7–5.2	10 <sup>-2</sup> –10 <sup>2</sup>	-
	Халькопирит	4.1–4.3	10 <sup>-3</sup> –10 <sup>-1</sup>	1–400
2	Касситерит	6.8–7.0	10 <sup>-3</sup> –10 <sup>-1</sup>	-2.0
	Сфалерит	3.9–4.0	10 <sup>-2</sup> –10	-6.5
	Шеелит	5.8–6.2	> 1×10 <sup>6</sup>	10–500
3	Барит	4.3–4.7	> 1×10 <sup>8</sup>	-1.8
	Эпидот	2.8–3.0	> 1×10 <sup>9</sup>	2.0
	Хлорит	2.2–3.0	> 1×10 <sup>8</sup>	3–10
	Мусковит	2.76–3.1	> 1×10 <sup>10</sup>	4–21
	Кварц	2.2–2.7	> 1×10 <sup>10</sup>	-1.6 – +0.5
	Кальцит	2.6–2.8	> 1×10 <sup>7</sup>	-0.5 – +0.5
	Серицит	2.2–2.5	> 1×10 <sup>7</sup>	-0.5 – +0.5
	Диккит	2.2–2.5	> 1×10 <sup>7</sup>	< 0.8

незема, кальция. Для группы пород, вмещающих аномальную зону, присуще обогащение пород кальцием, натрием и снижение концентраций калия, что характерно для рудосопровождающего метаморфизма Наталкинского поля [14].

Наиболее распространенные рудные минералы Наталкинского рудного поля, которые оказывают значительное влияние на физические свойства горных пород, приведены в таблице 3. Все эти минералы условно можно разбить на три группы по параметрам плотности и сопротивления. Для первой из них характерны высокие значения плотности (4.1 до 7.5 г/см<sup>3</sup>) и низкие значения удельного электрического сопротивления (преимущественно 10<sup>-5</sup>–1 Ом·м). Вторая группа имеет менее высокую плотность (3.9–7.0 г/см<sup>3</sup>) и также относительно пониженное удельное электрическое сопротивление (преимущественно 0.001–10 Ом·м). В третью группу входят минералы с пониженной плотностью (2.2–4.7 г/см<sup>3</sup>) и значительным удельным электрическим сопротивлением (10<sup>7</sup>–10<sup>10</sup> Ом·м).

Наличие минералов, входящих в две первые группы, обуславливает высокую электропроводность и плотность слагаемых ими руд и метасоматитов. При благоприятных текстурах, когда минералы первой группы образуют электрически связанные полосы или цепочки, они влияют на удельное электрическое сопротивление даже при нескольких процентах содер-



жания. В пределах Наталкинского рудного поля содержания сульфидов (особенно пирита и арсенопирита) в рудах, по данным [12] и проведенным нами исследованиям, достигают 5 %. В измененных вмещающих породах и рудах сульфиды формируют рассеянную вкрапленность, небольшие гнездовые выделения (до 2–3 см в поперечнике) или же мономинеральные прожилки до 1.5 см мощности. Особое положение занимает углеродистое вещество, оно в виде тончайших чешуек или порошковидных выделений пронизывает вмещающие породы, а также слагает отдельные тела жильной формы. Местами его концентрация, по ранее проведенным работам [12] и нашим исследованиям, достигает 2.5 %. Установленные факты, безусловно, приводят к значительному снижению электрического сопротивления среды. Минералы третьей группы обуславливают низкую электропроводность и плотность метасоматитов и руд.

Магнитные свойства руд и вмещающих горных пород зависят от содержания ферромагнитных минералов (магнетита, титаномагнетита и пирротина) и служат прямым индикатором (при превышении “парамагнитного уровня”) наличия минералов первой группы.

Таким образом, установленные параметры физических свойств минералов позволяют объяснить относительно повышенную электропроводность, а также плотность и намагниченность вмещающих горных пород, метасоматитов и руд, слагающих рудные поля и узлы.

Имеющиеся точки зрения [12] по поводу существования различных минеральных ассоциаций на территории Наталкинского месторождения сходятся в одном, что большинство продуктивных и наиболее распространенных минеральных ассоциаций содержат пирротин. В связи с этим пирротин может служить признаком общей минерализации, содержащей большое количество плотных, электропроводящих минералов первой и второй групп.

Изложенное показывает, что распределение ПФП может являться в определенной степени индикатором интенсивности общего процесса рудного минералообразования. Увеличение параметра магнитной восприимчивости связано в основном с увеличением содержания ферромагнитных минералов и ведет к значительному уменьшению кажущегося удельного сопротивления среды. Размах распространения минералов первой и второй групп значителен и, судя по области повышенных значений плотности, магнитной восприимчивости и остаточной намагниченности (на примере Наталкинского рудного поля), имеет величины, соизмеримые по простиранию с выходом глубинной субвертикальной зоны проводимос-

ти. Эти процессы носят региональный характер – первый уровень петрофизической зональности. Они в основном обеспечивают аномально низкое сопротивление среды, что выражается в выходе на дневную поверхность субвертикальной проводящей зоны (рис. 8).

Процессы, при которых происходит образование минералов третьей группы, связаны с уменьшением значений ПФП (или более дифференцированным их распределением), имеют значительно более локальный характер распространения – второй уровень петрофизической зональности, который может быть непосредственно связан с формированием рудных жил и всей рудной залежи в целом.

Все вышеизложенное относится к верхней части (до 800 м) субвертикальной зоны проводимости, которая аппроксимируется глубинным разломом. В этой зоне проводимость обуславливается наличием углеродистого вещества и сульфидов.

Таким образом, сульфидизация и наличие углеродистого вещества (УВ), безусловно, объясняют, пониженное сопротивление верхней части субвертикальной проводящей зоны, а самая проводящая часть аномалии, расположенная ниже 5–10 км, по-видимому, связана с совокупным эффектом наличия электронных (сульфиды и оксиды металлов, УВ) и ионных (циркуляцией минерализованных флюидов в субвертикальных трещинах) типов проводимости.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексный анализ геофизических и петрофизических полей, геохимических и геолого-минералогических данных по Наталкинскому рудному полю показал, что территория исследований представляет собой систему иерархически упорядоченных взаимосвязанных структур различного ранга, каждая из которых отличается специфическим набором физических свойств горных пород и имеет свою геологическую природу. На основе проведенных комплексных исследований получены следующие основные результаты.

1. Выявлена и доказана двухуровневая петрофизическая зональность Наталкинского рудного поля. Первым уровнем является монотонное площадное изменение физических свойств горных пород в определенном направлении, связанное с насыщением пород халькофильными и сидерофильными группами металлов и, может быть, обусловленное влиянием глубинного разлома, который фиксируется выявленной авторами субвертикальной зоной проводимости. Второй уровень находит отражение в локальных аномалиях и градиентных изменениях ПФП в экзоконтактах рудной залежи и рудных зон, что, вероятно,



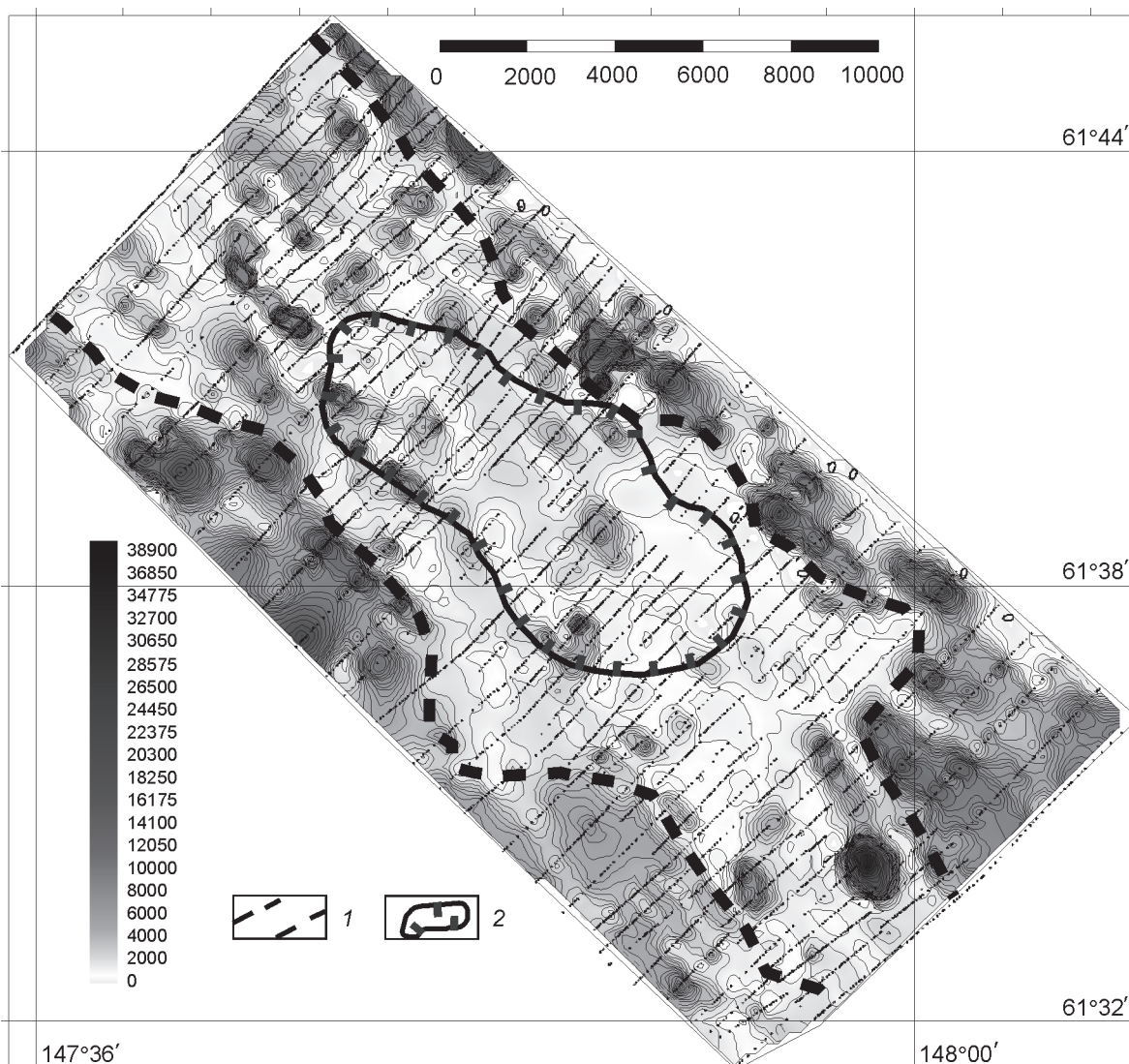


Рис. 8. Карта кажущегося сопротивления Омчакского рудного узла.

1 – контуры выхода на дневную поверхность субвертикальной глубинной проводящей зоны; 2 – контур Омчакского рудного узла.

связано пространственно (генетически?) 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.

2. 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 месторождения, рудные поля и узлы. Выделенные типы изменений находят свое отражение в установленных закономерных вариациях ПФП и подтверждаются минералогическими исследованиями:

сульфидизация и наличие УВ объясняют пониженное сопротивление верхней части субвертикальной проводящей зоны.

3. Рудное поле характеризуется высокими значениями ПФП (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. Все изложенное отвечает первому уровню петрофизической зональности, является причиной высокой проводимости и поляризуемости, возникновения локальных гравитационных максимумов, аномалий радиоактивных элементов, положительных дифференцированных магнитных аномалий.

4. Рудные зоны и залежи 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 метров и подтверждается минералогическими исследованиями.

5. Учитывая все особенности верхнепермских рудовмещающих пород Наталкинского рудного поля, можно предположительно сделать вывод – гидротермально-метасоматическое преобразование пород отразилось на петрофизических параметрах, в частности, на увеличении магнитной восприимчивости и повышенных показателях плотности породы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абрамов В.А., Кочетков А.Я., Ним Ю.А. Геофизические и геологические критерии прогнозирования оруденения // Геофизические исследования. Якутск: ИГЯФ СО АН, 1978. С. 66–84.
- Абрамов В.А. Глубинная структура Центрального – Алданского района по геофизическим данным // Глубинное строение и полезные ископаемые Востока СССР. Владивосток: ДВНЦ, 1985. С. 20–32.
- Абрамов В.А. Глубинная модель мезозойских рудоносных структур Алданского щита // Сов. геология. 1990. № 5 С. 42–48.
- Абрамов В.А. Ломтев Н.Ф. Цыганов В.И. Магнитотеллурическое зондирование при комплексном изучении глубинной структуры // Разведка и охрана недр. 1990. № 4. С. 39–46.
- Абрамов В.А. Глубинное строение ЦАР. Владивосток: Дальнаука, 1995. 180 с.
- Брянский Л.И., Романовский Н.П., Абрамов В.А. и др. Глубинная структура рудных районов очагового типа. М.: Наука, 1992. 157 с.
- Бяков А.С., Ведерников И.Л. Стратиграфия пермских отложений Северо-Восточного обрамления Охотского массива, центральной и юго-восточной частей Аян-Юряхского антиклинория. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1990.
- Гаштольд 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: СВНЦ ДВО РАН, 2006. 30 с.
- Гельман М.Л. О роли регионального метаморфизма в золотом оруденении Северо-Востока СССР // Докл. АН СССР. 1976. Т. 230, № 6. С. 1406–1409.
- Гельман М.Л., Крутоус М.П. О метаморфизме Верхоянского комплекса в верховьях р. Колымы // Геология и рудность метаморфических комплексов Дальнего Востока. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1979. С. 56–66.
- Геология СССР. Т. XXX. Северо-Восток СССР. Геологическое описание. В 2 кн / Ред. И.Е. Дробкин. М.: Недра, 1971. Кн. 1. 548 с.; Кн. 2. 536 с.
- Гончаров В.И., Ворошин С.В, Сидоров В.А. Наталкинское золоторудное месторождение. Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 2002. 250 с.
- Григорьев С.А. К генезису и динамике формирования Наталкинского золоторудного месторождения // Материалы научно-практической конференции 4–6 апреля 2006 года “Прогноз, поиски, оценка рудных и нерудных месторождений на основе их комплексных моделей – достижения и перспективы”. М.: ЦНИГРИ, 2006. С. 55–59.
- Михалицына Т.И. Золотоносные толщи пермских отложений Яно-Колымского пояса // Благородные и редкие металлы Сибири и Дальнего Востока: рудообразующие системы месторождений комплексных и нетрадиционных типов руд: Материалы науч. конф., г. Иркутск 3–7 октября 2005г. Иркутск: Изд-во Ин-та географ. СО РАН, 2005. Т. 2. С. 80–82.
- Петров А.В., Никитин А.А. Классификация комплексных геополей на однородные области // Геология и разведка. 1990. № 3. С. 11–18.
- Приставка В.А., Сидоров В.А., Михалицына Т.И. и др. Геолого-геохимическая модель золоторудного месторождения Наталка // Колымские ВЕСТИ, 2000. № 9. С. 18–25.
- Соловьев Г.А. Петрофизическая характеристика эндогенных месторождений. М.: Недра, 1984. 160 с.
- Хасанов И.М., Ермоленко В.Г., Шахтыров В.Г. Глубинная структура Омчакского рудного узла // Проблемы геологии и металлогении Северо-Востока Азии на рубеже тысячелетий (Билибинские чтения). Магадан, 2001. С. 286–289.
- Физические свойства горных пород и полезных ископаемых. Справочник геофизика. М.: Недра, 1984. 455 с.
- Шарафутдинов В.М. Отражение палеотемпературных полей интрузивного массива в петромагнитных параметрах экзоконтактной зоны // Сейсмологические и петрофизические исследования на Северо-Востоке России. Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 1992. С. 177–207.
- Шарафутдинов В.М. Региональный и локальный банки петрофизических параметров // Колыма. 2002. № 2. С. 16–20.
- Шарафутдинов В.М., Хасанов И.М. Геофизические характеристики Омчакского золоторудного узла и некоторые магнитоэлектрические аспекты локализации золотого оруденения // Геодинамика, магматизм и минерогения континентальных окраин Севера Пацифики. Т. 3. Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 2003. 267 с.
- Шарафутдинов В.М. Некоторые вопросы распределения петрофизических параметров и магнитоэлектрических полей золоторудного месторождения Наталка // Наука Северо-Востока России – начало века. Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 2005. С. 231–234.
- Шолпо Л.Е. Использование магнетизма горных пород для решения геологических задач. Ленинград: Недра, 1977. 183 с.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Основы литохимии. СПб.: Наука, 2000. 479 с.
- Яновский В.М., Абрамов В.А., Рогачев Б.В. и др. Геология золоторудных месторождений Востока СССР. М.: ЦНИГРИ, 1988. 264 с.

*Рекомендована к печати Н.П. Романовским*

*V.M. Sharafutdinov, I.M. Khasanov, T.I. Mikhailitsina*

### **Petrophysical zoning of the Natalka ore field**

Petrophysical features of 1168 rock and ore samples taken in plan and in the section of the whole Natalka ore field were analyzed. 235 of them were studied by geologic and mineralogical methods with subsequent preparation of thin sections and polished sections. The general two-level petrophysical zoning of the ore field was recognized and proved. Its relations with ore sites, interzonal space, host altered rocks and mineral composition were established. Both levels of the established petrophysical zoning were traced within the bounds of the ore field along strike for 4 km and along dip for 800 m. The spatial-genetic relation of the subvertical zone of conductivity (confined to the Omchak ore cluster) with petrophysical changes, which reflect the established mineral composition and the structure of metasomatites and ores, was defined.

**Key words:** petrophysical parameters, subvertical zone of conductivity, interzonal space, ore deposit, pyrrhotite.