

**ХАРАКТЕРИСТИКА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ПАВЛИКОВСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО  
МЕСТОРОЖДЕНИЯ  
(ЯНО-КОЛЫМСКИЙ МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКИЙ ПОЯС)**

***И.М. Хасанов<sup>1,2</sup>, А.В. Ткачев<sup>1</sup>, А.В. Кошурников<sup>3</sup>, А.П. Ганов<sup>1</sup>***

<sup>1</sup>ФГБУН Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДВО РАН,  
ул. Портовая 16, г. Магадан, 685000

<sup>2</sup>ФГБУО ВО Северо-Восточный государственный университет, ул. Портовая 13, г. Магадан, 685000;  
e-mail: aumaglan@yandex.ru, avt\_magadan@mail.ru, sigma47@rambler.ru

<sup>3</sup>ФГБУО ВО Московский государственный университет им. В.М. Ломоносова, Ленинские горы, МГУ д. 1,  
г. Москва, 119991; e-mail: koshurnikov@msu-geophysics.ru

Поступила в редакцию 15 августа 2019 г.

В представленной работе приведены результаты анализа геофизических полей золоторудного месторождения и установлены их некоторые особенности. Представлен комплекс геофизических исследований и методические приемы обработки, способные решать задачи прогноза золотого оруденения в пределах Яно-Колымского металлогенического пояса. На основании интерпретации комплекса геофизических данных предложены поисковые геолого-геофизические признаки золотого оруденения в иерархической последовательности рудный узел – рудное поле – рудовмещающая зона – рудное тело. Одним из основных методических приемов интерпретации при определении поисковых признаков потенциально рудных тел (или обогащенных интервалов) является исследование частотных характеристик процесса вызванной поляризации.

**Ключевые слова:** метод вызванной поляризации, частотные характеристики процесса вызванной поляризации, магнитотеллурические зондирования, золотокварцевая минерализация, Яно-Колымский регион, Магаданская область.

**ВВЕДЕНИЕ**

Выявление поисковых геофизических признаков перспективных площадей на уровне рудных узлов и полей, а также обогащенных участков и интервалов в пределах месторождений и рудных тел (рудолокализующих структур) всегда являлось одним из основных содержаний геофизических исследований. Однако, особенно на уровне месторождение – рудное тело, очень часто решение перечисленных задач становится весьма сложным и трудно реализуемым.

Проблема состоит в том, что в целом по территории исследований горные породы достаточно контрастны по физическим свойствам, но при этом на участках локализации оруденения в ряде случаев физические свойства пород слабо отличаются от таковых безрудных зон. Тем не менее, использование при интерпретации геофизических данных, подходов, основанных на статистических, классификационных и прочих приемах обработки, позволяет установить

признаки проявления гидротермально-метасоматических процессов и, таким образом, прогнозировать золотое оруденение. В работе представлены результаты обработки геофизических материалов с целью создания перечня признаков, характерных для золотокварцевых месторождений Центрально-Колымского региона (Магаданская область). Исследования проводились в пределах Павликовского рудного поля и одноименного месторождения, входящего в состав Омчакского рудного узла (ОРУ) Тенькинской металлогенической зоны Яно-Колымского металлогенического пояса (рис. 1) [11, 18].

**ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА  
ОБРАБОТКИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

При создании работы использованы фондовые материалы аэро-гаммаспектрометрической (АГС) и гравиметрической съемки (база ГРАВИМАГ), наземных геофизических работ 1983–2005 гг. (Сегаль С.З., Журавлев В.Г., Родионов В.И; ЦГЭ СВП-



Рис. 1. Схема расположения территории исследований на металлогенической основе.

ГО, ОАО «Магадангеология» г. Магадан), а также 2015–2017 гг. (Хасанов И.М., Ткачев А.В., Кошурников А.В., Ганов А.П.; СВКНИИ ДВО РАН, г. Магадан, НПП «МГУ Геофизика» г. Москва).

Результаты гравиметрических, аэромагнитных и аэро-гаммаспектрометрических данных геофизических наблюдений были обработаны программным комплексом спектрально-корреляционного анализа данных (КОСКАД) с целью выделения и уточнения взаимной зависимости геофизических параметров между собой [6, 15]. Применение данного пакета программ позволило выполнить широкий круг преобразований геофизических полей:

- трансформации потенциальных полей (пересчёты на горизонты выше поверхности наблюдений, вычисление горизонтальных и вертикальных градиентов наблюденных полей, различные виды осреднения);
- вычисление локальных аномалий гравитационного поля (разложение исходного поля на составляющие посредством двумерной адаптивной фильтрации с автоматическим вычислением окна фильтрации 8.5×30.1 км);
- вычисление статистических данных геофизических полей в пределах скользящего окна;
- комплексная классификация гравиметрических магнитных и АГС данных;
- решение обратных задач грави- и магниторазведки для построения глубинных разрезов по системе

выбранных профилей (выбранные параметры характеризуют распределение магнитовозмущающих и гравитирующих масс в слое 0–6 км).

При первичной обработке магнитотеллурических наблюдений (измеритель MTU-5A, измерение пяти компонент электромагнитного поля –  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$ , высокочастотный – аудиоманнитотеллурический режим в диапазоне от 0.1 до 10 000 Гц) использовался программный комплекс производства «PhoenixGeophysics» и ООО «Северо-Запад», его основные программы: «TimesSeriesViewer» – для просмотра записей поля и «SSMT-2000» – для первичной обработки.

Далее производилась интерактивная отбраковка данных и получение гладких кривых магнитотеллурического зондирования (МТЗ), используемых затем в процедурах анализа и инверсии. Редакция осуществляется в программе «MT-Corrector» (ООО «Северо-Запад»). На этом этапе были построены гладкие сплайн-аппроксимации различных компонент тензора импеданса и типпера, которые затем были использованы на этапах анализа, инверсии и интерпретации данных МТЗ.

Глубинная геоэлектрическая модель строилась с использованием алгоритмов 1D и 2D-инверсии. Для построения разреза верхней части использовалась одномерная инверсия. Построенный разрез использовался как стартовая модель для двумерной инверсии.

Ее стратегия предполагала поэтапное вовлечение различных компонент в оптимизационную схему. Сначала инвертировались квазипродольные кривые МТЗ, а затем ансамбль данных был расширен за счет привлечения квазипоперечных кривых; при этом модель, полученная на первом этапе, использовалась в качестве начального приближения на втором этапе [21, 22].

Электрические многочастотные исследования проводились с помощью аппаратного комплекса: «Астра» (генератор) – «ИМВП-8» (приемник) в диапазоне частот 0.3–78 Гц, трехэлектродной установкой ( $MN = 10$  м,  $AO = 35$  м).

#### ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Омчакский рудный узел (ОРУ) включает в себя Наталкинское, Омчакское и Павликовское коренные месторождения золота, большое количество рудопроявлений и пунктов минерализации. Тектоническое строение рудного узла определяется северо-западными разрывными нарушениями, относящимися к зоне Тенькинского глубинного разлома. Наряду с продольными северо-западными разрывными нарушениями заметным распространением пользуются поперечные относительно Тенькинской металлогенической зоны разломы северо-восточного простирания, реже отмечаются разломы широтного и субмеридионального направлений.

В пределах рудного узла отмечено сравнительно небольшое количество интрузивных тел. Известные датировки интрузивных тел позволяют выделить два этапа проявления магматизма на площади рудного узла.

Наиболее древний – позднеюрский – дорудный нера-бохапчинский интрузивный комплекс представлен небольшими по размерам штоками кварцевых диоритов и диорит-порфиринов и дайками спессартитов, диорит-порфиринов и микродиоритов. Они являются дорудными, но пересекают жилы раннего метаморфогенного кварца. На площади Павликовского рудного поля дайки этого интрузивного комплекса распространены относительно равномерно.

Второй этап – меловой (ранне-позднемеловой), в пределах рудного узла представлен дайками риолитов, гранит-порфиринов, андезитов, диорит-порфиринов, а также телами эксплозивных брекчий трубообразной и дайкообразной формы [1].

Разрывные нарушения Омчакского рудного узла и его окружения очень многочисленны, разнообразны по размерам, простиранию и по направлению перемещения по ним. Выделяются четыре основные системы разломов по простиранию: северо-западная, северо-восточная, субмеридиональная, субширотная.

Первая-вторая и третья-четвертая системы являются взаимно перпендикулярными. Все разломы имеют значительную протяженность и на больших участках прямолинейны, что говорит о крутом их залегании. Крутое падение разрывных нарушений подтверждается данными подземных выработок и бурения.

Аномальный характер геохимического поля ОРУ определяется такими элементами, как золото, мышьяк, вольфрам. Рудные поля месторождений ОРУ фиксируются вторичными ореолами золота, ограниченными по изолинии 0.1 г/т, мышьяка (16 геофонов или 640 г/т), вольфрама (два геофона или более 3 г/т). Ореолы остальных элементов практически не обнаруживают связи с известными рудными полями и локализуются по их периферии (висмут, цинк, хром, никель, кобальт, барий, молибден, марганец).

Площадь Павликовского рудного поля слагают туфогенно-осадочные породы позднепермского возраста, подразделяемые на атканскую (туфомикститы) и омчакскую (глинистые и песчано-глинистые алевролиты и песчаники). Тектонические нарушения представлены зонами дробления мощностью от 2 до 100 м. В центральной части месторождения достаточно отчетливо выделяются три относительно крупных тектонических шва северо-западного простирания и серия самостоятельных и сопряженных с ними разрывных нарушений более высоких порядков. В районе рудного поля эти тектонические швы дугообразно изгибаются до субширотного направления.

Литологический фактор контроля оруденения в пределах поля выражается в приуроченности наиболее богатого золотого оруденения к микститам атканской свиты и нижней части алевролитов омчакской свиты. На начальных стадиях тектонических подвижек и складкообразования, одновременно с заложением основных рудоконтролирующих структур, в толще осадочных пород происходило нарастание сдвиговых деформаций. Это приводило к тому, что в резко неоднородных микститах с наличием крупных галек интрузивных пород в песчано-глинистом (изначально) матриксе проявлялось громадное количество локальных участков сжатия и растяжения – около каждой гальки, испытывающей разворот при прогрессирующем одностороннем сдвиге. Таким образом, в какой-то момент это могло привести к тому, что вся пачка микститов оказалась значительно более проницаемой для гидротермальных растворов по сравнению с относительно однородными, существенно глинистыми подстилающими и перекрывающими отложениями пионерской и омчакской свит. В условиях восходящего фронта гидротермальных растворов это могло привести к интенсивному рудоотложению (окварцеванию

и сульфидизации) в благоприятной среде испытавших деформации микститах и под экраном вышезалегающих алевролитов омчакской свиты.

Магматический фактор контроля оруденения выражен в том, что более хрупкие, по сравнению с вмещающей песчано-глинистой толщей, штоки и крутопадающие дайки интрузивных пород являются, в первую очередь, рудоподводящими каналами.

Рудные тела месторождения приурочены к оперяющим трещинам основных тектонических нарушений. В основном, это сколовые трещины северо-западного простирания, представленные относительно выдержанными зонами дробления и рассланцевания. Они группируются в полосу, протягивающуюся в северо-западном направлении, длиной около 2.5 км и шириной от 200 до 500 м. Протяжённость рудных зон от нескольких десятков метров до 1650 м, мощность колеблется в довольно широких пределах – от нескольких десятков сантиметров до 24 метров. Рудные зоны представляют собой сближенные и субпараллельные в целом, линейно вытянутые по простиранию и падению зоны трещиноватых, передробленных и перемятых осадочных пород, сцементированных жильными гидротермальными образованиями.

В геологических границах рудные зоны не выделяются, контуры их устанавливаются только по данным опробования. Мощность минерализованных зон дробления, к которым приурочены рудные зоны, от 5 до 40 м. Гидротермальные образования в рудных зонах представлены системами параллельных и ветвящихся прожилков, линзами или короткими жилами, участками метасоматического окварцевания.

Состав жильных образований преимущественно кварцевый, иногда кварц-карбонатный и редко только кальцитовый. Из жильных минералов преобладает кварц, слагающая около 90 % объема жильного материала, в небольшом количестве присутствуют кальцит, хлорит, серицит, альбит, каолинит, иногда калишпат. Из рудных минералов отмечено самородное золото, арсенопирит, пирит, менее распространены сфалерит и галенит. В рудных зонах месторождения установлены резкие колебания содержания золота как по простиранию, так и по падению. Содержания золота варьируют от первых граммов до сотен граммов на тонну; в рудных телах средние содержания золота меняются от 1.5 до 6.9 г/т. Среднее содержание сульфидов от 2 до 5 % иногда до 10 %. Оруденение отнесено к золото-кварцевому формационному типу [2].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

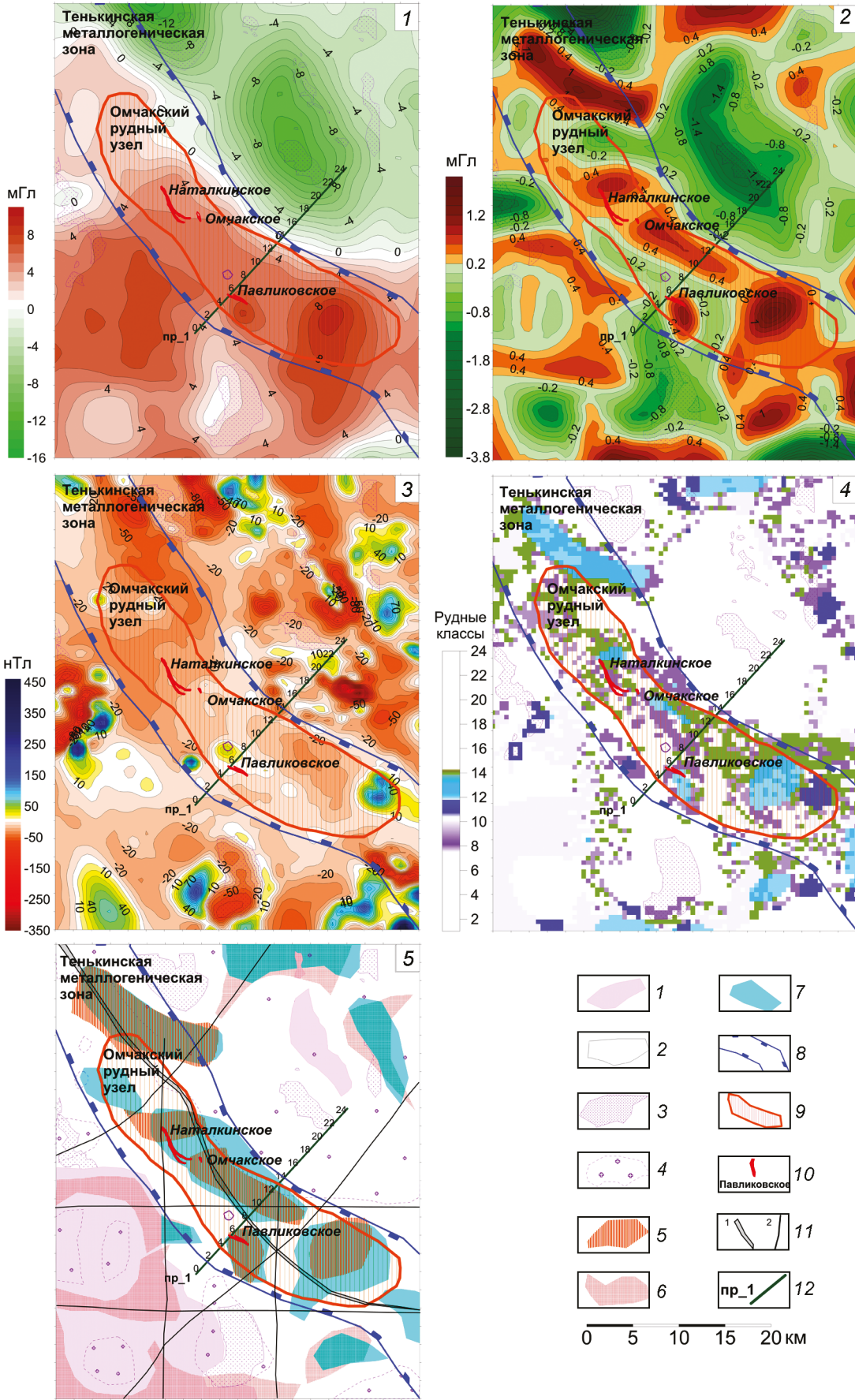
Перед геофизическими исследованиями ставились задачи выделения аномальных эффектов (поис-

ковых признаков), определяющих положение известных (берутся за эталон) и потенциально золотоносных участков в иерархии рудный узел – рудное поле – рудовмещающая зона (месторождение) – рудоносная зона (рудное тело). Анализ аэро-геофизических и наземных геофизических работ позволил сформулировать методические подходы к интерпретации имеющихся и авторских материалов и построить ожидаемую физико-геологическую поисковую модель.

По геологическим данным объекты поиска – рудоносные зоны, представляют собой достаточно мощные (20–30 м) зоны кварц-сульфидной минерализации как прожилковой, так и прожилково-вкрапленной морфологии. Связаны они с разрывными нарушениями преимущественно северо-западного простирания. Повышенная концентрация сульфидов, как правило, приурочена к зальбандовым частям зон. Процессы окварцевания приводят к увеличению удельного электрического сопротивления (УЭС) и уменьшению вызванной поляризации (ВП), увеличение концентрации сульфидов приводит к увеличению значений параметра ВП [3, 23], а наличие разрывных нарушений уменьшают УЭС затронутой ими геологической среды вследствие процессов катаклаза и милонитизации. Такие разнонаправленные процессы, происходящие при образовании рудоносных зон, приводят к формированию сложных геофизических полей, не дающих возможности их однозначной и уверенной фиксации.

Омчакский рудный узел (ОРУ) и его ближайшее окружение, составляющие фрагмент Тенькинской металлогенической зоны (ТМЗ), в гравиметрическом поле ( $\Delta g$ ) пространственно сопряжен с широкой до 12 км зоной горизонтального градиента – собственно с зоной Тенькинского глубинного разлома (рис. 2, 1). В поле локальной составляющей  $\Delta g$  исследуемый фрагмент Тенькинской МЗ отмечается повышенной концентрацией локальных положительных аномалий (интенсивностью до 2 мГл.), которые связываются с областями сжатия и уплотнения осадочной толщи динамо-метаморфической природы в зоне влияния Тенькинского глубинного разлома. Территория Павликовского рудного поля пространственно совпадает с одной из упомянутых локальных аномалий гравитационного поля (рис. 2, 2, 5).

Отрицательные локальные аномалии гравиметрического поля интенсивностью от -0.4 до -3.8 мГл фиксируют выходы гранитоидных интрузий и, вероятно, достаточно крупные, не вскрытые эрозией массивы. Последние располагаются преимущественно на территориях, сопряженных с ОРУ, на северо-восточном и юго-западном флангах рудного узла на расстоянии 10 ÷ 15 км от месторождений золота (рис. 2, 1, 2).



Магнитное поле ( $\Delta T_a$ ) Омчакского РУ (рис. 2, 3) – близкое к нормальному, слабо пониженное (от -10 до -25 нТл), осложнённое локальными положительными (от 30 до 200 нТл) аномалиями  $\Delta T_a$ , ориентированными в северо-западном направлении, с одной из них сопряжено распространение горных пород Павликовского рудного поля. Данный тип аномалий отражает зону внедрения малых интрузивных тел, типа штоков, среднего состава и ореол сопровождающих магматогенный процесс метасоматитов. Для Павликовского рудного поля это альбит-кварцевые и альбит-карбонатно-кварцевые метасоматиты, внутри которых находятся все рудные зоны месторождения. Комбинация линейных, изометричных и дуговых положительных аномалий отражает, по всей вероятности, зоны тектонических нарушений и ороговикования вмещающих пород в экзоконтактах интрузивных тел. Сложно построенные области знакопеременного поля соответствуют надинтрузивным зонам и полифазным, полиформационным магматическим образованиям, не вскрытым в современном эрозионном срезе.

Данные аэро-гамма съемки (РАЭ) выделяют в пределах ОРУ территории с относительно повышенным вкладом калиевой и (в меньшей степени) ториевой компоненты, которые трактуются как площади метасоматически и метаморфически (серицитовые, альбит-карбонат-кварцевые метасоматиты; биотит-пирротинные, мусковит-пиритовые метаморфические зоны) измененных пород. Именно с ними связаны основные месторождения рудного узла.

В результате комплексного (локальная составляющая  $\Delta g$ , магнитное поле  $\Delta T_a$  и концентрация радиоактивных элементов – РАЭ) классификационного анализа установлено (рис. 2, 4), что рудные классы выделяются (относительно «фона» – среднего по всем остальным классам):

- низкими, но положительными значениями аномального магнитного поля 6.6 нТл (фон -17 нТл) при относительно низкой их дифференциации;

- повышенными значениями локального поля силы тяжести 0.46 мГл (на фоне -0.7 г/см<sup>3</sup>) при пониженной дифференциации значений;

- характеризуется повышением содержания калия 1.26 % (на фоне 0.99 %), дифференциация не

отличается от фона; незначительным привнесом урана  $1.69 \cdot 10^{-4}$  (на фоне  $1.58 \cdot 10^{-4}$ ) и тория  $6.61 \cdot 10^{-4}$  (на фоне  $6.36 \cdot 10^{-4}$ ) при их пониженной дифференциации (табл. 1).

Следует отметить, что выделенные локальные положительные аномалии гравитационного поля в совокупности с распределением рудных классов создают план северо-западной направленности, подчёркивают границы Тенькинской МЗ, охватывают территории рудных полей месторождений Омчакского рудного узла. (рис. 2, 5).

В разрезе по параметру эффективной плотности Павликовское рудное поле и собственно месторождение пространственно совпадают с аномалией относительно повышенной плотности. По магнитным данным горные породы в пределах рудного поля характеризуются слабыми магнитными свойствами (слабо положительная эффективная намагниченность) (рис. 3, а, б). По данным классификационного анализа (по параметрам эффективная плотность и эффективная намагниченность) породы Павликовского рудного поля (и месторождения) характеризуются относительно повышенной плотностью и слабо магнитными свойствами (рис. 3, в, табл. 2).

Используя автоматический вариант метода обратных вероятностей [15] с целью более результативного выделения слабых аномалий применительно к разрезу по параметру эффективной плотности были получены значения статистики F, которые интерпретируются следующим образом. Если значение стати-

Таблица 1. Таблица рудных классов ОРУ.

Класс (на рис. 3)	Параметр	Среднее значение параметра рудных классов (фон)	Вариация параметра рудных классов (фон)
8, 9, 11, 12, 14	$\Delta T_a$ (нТл)	6.6 (-17)	22.3 (24.5)
	Калий (%)	1.26 (0.99)	0.17 (0.17)
	$\Delta g$ лок (мГл)	0.48 (-0.7)	0.24 (0.3)
	Уран ( $10^{-4}$ %)	1.69 (1.58)	0.29 (0.41)
	Торий ( $10^{-4}$ %)	6.61 (6.36)	0.87 (1.29)

**Рис. 2.** Планы изолиний аномального гравитационного поля (1) и его локальной составляющей (2), аномального магнитного поля (3) и схемы расположения рудных классов (4), интерпретации геофизических данных (5).

1 – осадочные отложения триаса, 2 – осадочные отложения перми, 3 – интрузивные образования (гранитоиды), 4 – интрузивные образования (гранитоиды), не вскрытые эрозией, 5 – области сжатия и уплотнения осадочной толщи динамо-метаморфической природы в зоне влияния Тенькинского глубинного разлома, 6 – контактово-измененные породы, 7 – ореолы максимальной концентрации рудных классов, выделяемые по геофизическим данным, 8 – Тенькинская металлогеническая зона, 9 – Омчакский рудный узел, 10 – золоторудные месторождения, их названия, 11 – разрывные нарушения: зона Тенькинского глубинного разлома (1), прочие (2), 12 – линия геолого-геофизического разреза.

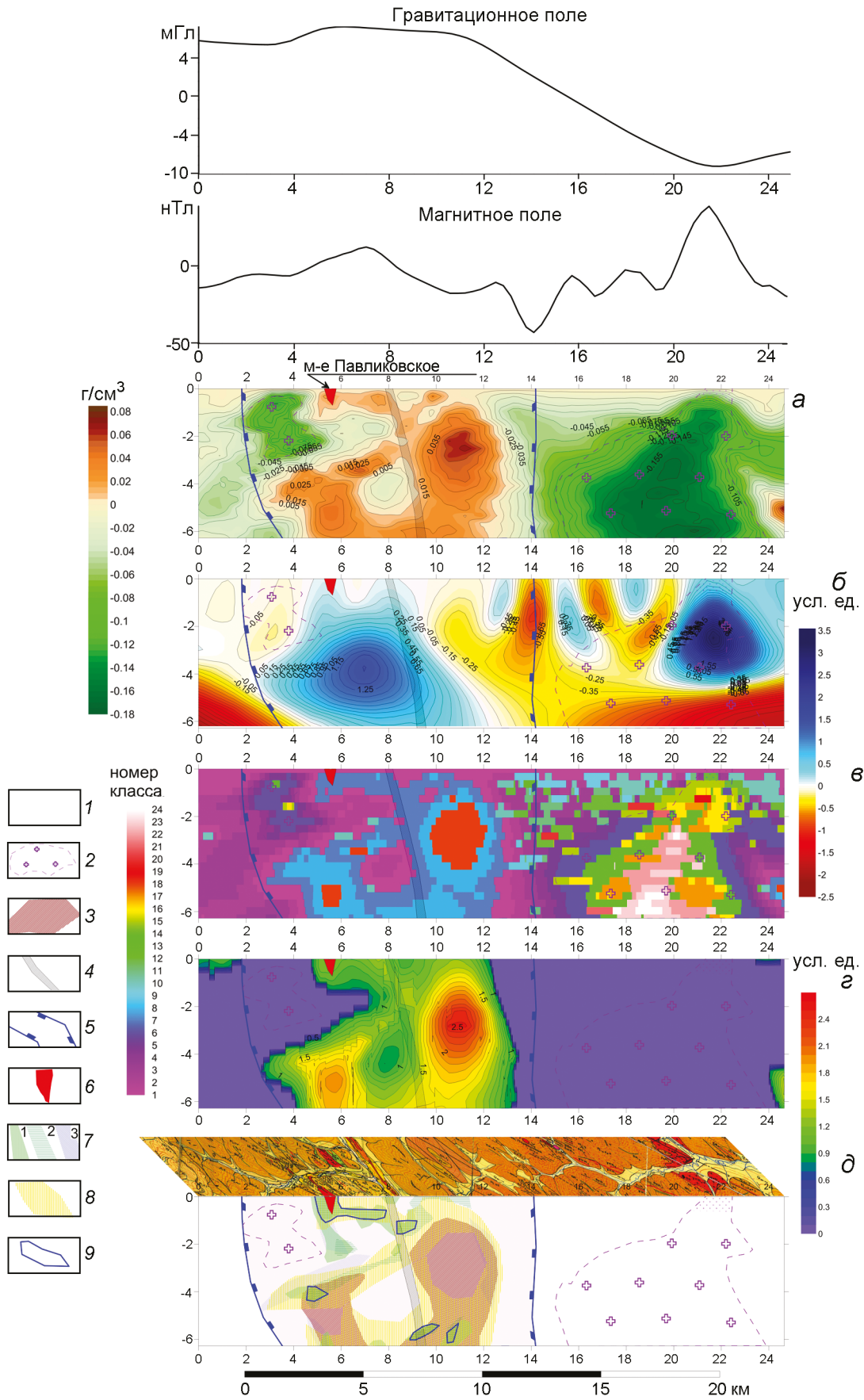


Таблица 2. Таблица рудных классов Павликовского рудного поля.

Класс	параметр	Среднее значение параметра рудных классов (фон)	Вариация параметра рудных классов (фон)
10–13	Эфф. плотность (г/см <sup>3</sup> )	0.02 (-0.08)	0.01 (0.01)
	Эфф. намагниченность (усл.ед)	0.03 (0.25)	0.64 (0.82)

стики находится в интервале  $0 \leq F \leq 0.5$ , то эталонная аномалия отсутствует. Если значение статистики попадает в интервал  $0.5 < F \leq 1.5$ , то эталонная («рудная») аномалия есть. И, наконец, если значение статистики  $1.5 < F < 1000$  – аномалия присутствует и ее форма совпадает, но амплитуда превышает амплитуду эталонной аномалии. Таким образом, области значений статистики в диапазоне  $0.5 < F \leq 1.5$  являются наиболее перспективными (рис. 3, з).

На основе полученных данных в разрезе становится возможным выделение совокупности геофизических признаков пород Павликовского рудного поля, к которым относятся (рис. 3, д):

- аномалии относительно повышенной плотности и низких магнитных значений эффективной намагниченности (рудные классы 10–13),

- зоны регистрации аномальной асимметрии, эксцесса и дисперсии параметра эффективной плотности,

- области значений статистики обратных вероятностей по параметру эффективной плотности в диапазоне  $0.5 < F \leq 1.5$ .

По данным наземной съемки методом магнитотеллурических зондирований в целом рудное поле Павликовского месторождения пространственно совпадает с аномалией повышенного удельного электрического сопротивления в диапазоне 300–3000 Ом·м (на фоне 50–200 Ом·м). Однако собственно рудовмещающая зона как в плане, так и в разрезе, характеризуется относительно пониженными значениями удельного электрического сопротивления. Если рассматривать значения этого параметра на срезах на различных глубинах, то можно заметить, что различные фрагменты рудовмещающей зоны (как по латерали, так и

по падению) имеют совершенно различные значения УЭС от 300 до 1300 Ом·м, хотя в целом отличаются от вмещающих пород, которые характеризуются по параметру УЭС от 500 до 3000 Ом·м. Однако четких границ ни самой рудовмещающей зоны, ни отдельных рудных зон установить не удается (рис. 4.).

По данным наземной съемки срединного градиента (Сегаль С.З., 1981), проведенной в центральной части Павликовского рудного поля, рудовмещающая зона отмечается широкой аномалией относительно пониженного удельного сопротивления (500–1000 Ом·м) на фоне повышенных сопротивлений (2000–2500 Ом·м) и характеризуются высокой общей поляризуемостью ( $\eta_k = 10–15\%$ ) на фоне пониженных значений ( $\eta_k = 3–7\%$ ). Выделить аномалии, которые однозначно связаны с отдельными рудными зонами или их обогащенными интервалами не представляется возможным (рис. 5, 1, 2).

Приведенные факты подтверждаются лабораторными петрофизическими исследованиями. Для одних и тех же разновидностей горных пород, отобранных в пределах и за пределами рудного поля, существуют серьезные отличия. Так группы гидротермально-метасоматически измененных пород, которые распространены в пределах месторождения, сульфидизированные породы отличаются несколько повышенной магнитностью и поляризацией. Они же характеризуются большими значениями плотности. За пределами рудного поля отмечается некоторое снижение магнитной восприимчивости, явное снижение плотности на 0.1–0.2 г/см<sup>3</sup> и повышение в 2 раза поляризуемости при их значительно меньшей дифференциации. Это может говорить о том, что при формировании месторождения преобладали процессы, приведшие к неко-

**Рис. 3.** Геолого-геофизическая модель Павликовского рудного поля по петрофизическим параметрам гравитационных и магнитных данных. Псевдоплотностной разрез по параметру эффективной плотности (а), псевдомагнитный разрез по параметру эффективной намагниченности (б), разрез классификации по параметрам эффективной плотности и эффективной намагниченности (в), разрез по данным значений статистики метода обратных вероятностей F параметра эффективной плотности [15] (з), геолого-геофизический разрез (д).

1 – осадочные отложения (Р, Т), 2 – интрузивные образования (гранитоиды), 3 – области сжатия и уплотнения осадочной толщи динамо-метаморфической природы в зоне влияния Тенькинского глубинного разлома, 4 – зона Тенькинского глубинного разлома, 5 – Тенькинская металлогеническая зона, 6 – месторождение Павликовское, 7 – зоны регистрации асимметрии, эксцесса и дисперсии параметра эффективной плотности, 8 – рудные классы, выделяемые по геофизическим данным, 9 – перспективные участки.



торому увеличению содержания магнитных минералов – возросла доля сульфидов (в том числе пирротина), вместе с тем уменьшилось общее содержание графита. Петрофизические параметры (ПФП) образцов, отобранных с поверхности, в пределах рудного интервала показывают повышенные значения поляризуемости (до 6 %), магнитной восприимчивости ( $4\text{--}8 \cdot 10^{-3}$  Си) и относительно пониженные значения сопротивления ( $200\text{--}400$  Ом·м), а в границах безрудного обрамления пониженные значения поляризуемости (5–2 %), относительно повышенное сопротивление ( $400\text{--}800$  Ом·м) и близкие к нулевым магнитной восприимчивости [19, 20].

Таким образом, особенности рудного процесса, проявленного в пределах исследуемой территории, позволяют определить лишь основные аномалообразующие эффекты, определяющие положение потенциально рудовмещающих объектов, но не самих рудоносных зон. Реально физические поля фиксируют не само распределение золота, а области распространения гидротермально-метасоматических изменений пород.

В силу невозможности уверенного выделения потенциально золоторудных объектов по параметрам сопротивления и поляризации нами сделана попытка выделения перспективных зон на основе анализа амплитудно-частотных (АЧХ) и фазо-частотных (ФЧХ) характеристик по параметрам УЭС и ВП.

В пределах Павликовкого месторождения были выбраны рудные и безрудные (по данным опробования в горных выработках) интервалы, где были проведены исследования ВП на переменном токе в диапазоне частот от 0.3 до 78 Гц.

При этом выбор безрудных участков проводился таким образом, чтобы они имели аналогичные значения по параметрам сопротивления и поляризации, либо по одному из них с известными рудными интервалами. Таким образом, рудные и безрудные (вмещающие г.п.) участки гидротермально-метасоматически измененных пород были либо абсолютно похожи или близки по указанным характеристикам.

Выборка данных производилась с нескольких участков, охватывающих значительную часть рудного поля по нескольким (до 10 более) точек наблюдений на каждом.

Результаты исследований приведены на рисунке 6 в виде графиков зависимости сопротивления от частоты (АЧХ) и поляризуемости ( $\eta = -2.5\phi$ ) от частоты (ФЧХ). Как видно, безрудные интервалы характеризуются широкими диапазонами изменения сопротивления (от 200 до 3000 Ом·м) и поляризуемости (1.5–9.5 %), что объясняется различным литологическим составом вмещающих пород, а также типом и интенсивностью вторичных изменений. Электриче-

ские свойства рудных тел локализованы в достаточно узких диапазонах пониженного сопротивления ( $300\text{--}650$  Ом·м) и повышенной поляризуемости (10–12 %). Однако главной отличительной особенностью рудных тел от вмещающих пород, является угол наклона фазо-частотной характеристики. Хорошо заметно (по крайней мере, в диапазоне частот 0.3–10 Гц), что угловой коэффициент ФЧХ всех безрудных интервалов положительный, тогда как для всех рудных интервалов он имеет отрицательное значение. Известно [12, 13, 17], что такой тип ФЧХ характерен для углисто-графитизированных пород и зон углеродистого метасоматоза.

## ВЫВОДЫ

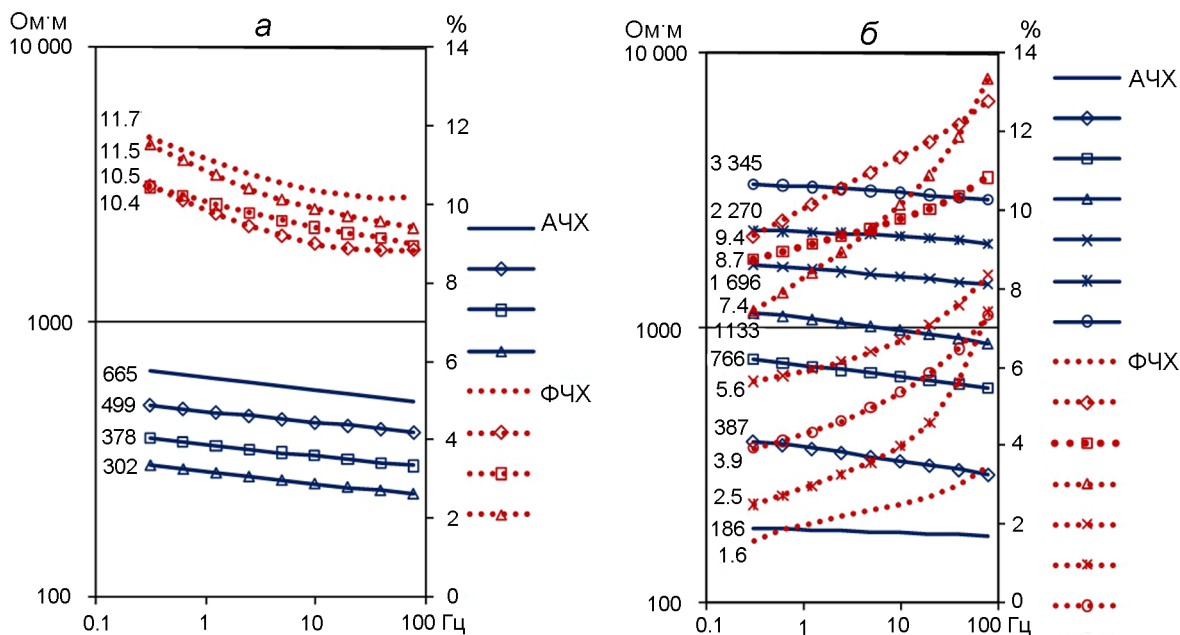
Исходя из вышеизложенных особенностей геолого-геофизической модели геологической среды ОРУ, факторы, контролирующие размещение золото-кварцевого оруденения, целесообразно сгруппировать от региональных к локальным, выделив в каждой группе основные геолого-геофизические признаки.

*Региональные факторы на уровне рудного узла.* В гравитационном поле Омчакский рудный узел (ОРУ) и его ближайшее окружение, составляющие фрагмент Тенькинской металлогенической зоны, приуроченные к главнейшему тектоническому фактору контроля оруденения – зоне Тенькинского глубинного разлома северо-западного простирания, фиксируются широкой зоной градиента, полосой локальных аномалий положительной и отрицательной асимметрии и интенсивных аномалий эксцесса поля. В локальной составляющей площадь ОРУ контролируется положительными аномалиями силы тяжести, которые обусловлены сжатием и уплотнением осадочной толщи в зоне влияния Тенькинского глубинного разлома.

В магнитном поле проявляются минерализованные разрывные нарушения, ориентированные в северо-западном направлении вдоль основной зоны рудо-контролирующих разломов.

В региональной радиогеохимической зональности рудные поля ОРУ находятся в зоне калий-ториевой специализации с локальным проявлением существенно калиевой доминанты, что характерно для значимых золоторудных объектов для всех золоторудных объектов Яно-Колымского металлогенического пояса.

*Локальные факторы на уровне рудного поля.* Данные признаки определяют положение рудных объектов внутри рудного узла. Горные породы прогнозируемого рудного поля характеризуются повышенным удельным сопротивлением, относительно повышенной плотностью и пониженными магнитными свойствами. Геологическая среда рудного поля отмечается



**Рис. 6.** Типичные амплитудно-частотные и соответствующие им фазо-частотные характеристики рудных тел (а) и вмещающих пород (б) Павликовского рудного поля. Индексы кривых – значения сопротивления и поляризации на частоте 0.3 Гц.

зонами аномальной асимметрии, эксцесса, дисперсии, а также областью значений ( $0.5 < F \leq 1.5$ ) статистики обратных вероятностей параметра эффективной плотности. Указанные факты объясняются литолого-магматическими факторами локализации оруденения.

*Локальные факторы на уровне месторождения.* Рудовмещающие области и зоны характеризуются аномалиями относительно пониженного УЭС и повышенными значениями параметра вызванной поляризации. Это отражает связь золоторудной минерализации с метаморфически и метасоматически измененными породами. Вкрест простирания рудного поля выделяются три метаморфические зоны: внешняя – биотит-пирротиновая, промежуточная – хлорит-марказитовая и внутренняя – мусковит-пиритовая. Последняя непосредственно переходит в ореол окорудных изменений (серицитовые, альбит-карбонат-кварцевые метасоматиты).

*Локальные факторы на уровне рудных тел.* Рудоносные зоны (рудные тела) имеют свои характерные фазо-частотные характеристики (ФЧХ) процесса ВП, которые значительно отличаются от фазо-частотных характеристик безрудных кварц-сульфидных зон и вмещающих метасоматитов.

Гидротермально-метасоматический процесс рудообразования, как правило, является многостадийным [2, 14]. Граничные РТ условия формирования рудоносных зон (рудных тел) определяют характерное,

присущее только для данного месторождения, термо-ЭДС рудных минералов, сопровождающих золоторудную минерализацию (взаимотношение электронной и дырочной проводимости), что обязательно проявляется в вариациях спада процесса ВП [4, 5, 7–12, 16] или фазо-частотных характеристиках.

В заключение следует отметить следующее.

1. Представленный комплекс работ способен решать задачи прогноза золотого оруденения в пределах Яно-Колымского металлогенического пояса.

2. На основании интерпретации комплекса геофизических данных предложены поисковые геолого-геофизические признаки золотого оруденения в иерархической последовательности рудный узел–рудное поле–рудовмещающая зона–рудное тело.

3. Одним из основных методических приемов интерпретации при определении поисковых признаков потенциально рудных тел (или обогащенных интервалов) является исследование частотных характеристик процесса ВП. Это один из путей диагностики рудных тел, который только намечен.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ворошин С.В., Еремин Р.А., Тюкова Е.Э., и др. Новые материалы по структуре и минералогии Омчакского рудного узла // Геология и минералогия рудных месторождений Северо-Востока СССР. Магадан: СВКНИИ ДВО АН СССР, 1989. С. 67–86.
2. Гончаров В.И., Ворошин С.В., Сидоров В.А. Наталкинское

- золоторудное месторождение. Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 2002. 250 с.
3. Гурин Г.В., Тарасов А.В., Ильин Ю.Т., Титов К.В. Спектральная характеристика вызванной поляризации вкрапленных руд // Вестн. СПбГУ. Сер. 7. 2013. Вып. 1. С. 16–30.
  4. Жаворонкова В.В., Кормильцев В.В. Поляризация минеральных электродов переменным током. Фазовые и амплитудные измерения вызванной поляризации на рудных месторождениях / Сб. науч. трудов. Свердловск: УФ АН СССР, 1973. С. 5–17.
  5. Ильина Е.К., Комаров В.А. Дифференциальная поляризуемость руд с проводящими включениями (на примере пилломелана) // Вопросы геофизики. СПбГУ, 1994. № 33. С. 165–169.
  6. Инструкция к использованию комплекса спектрально-корреляционного анализа данных «КОСКАД 3Dt». М.: Московский геологоразведочный университет, 2004. 64 с.
  7. Комаров В.А., Шубникова К.Г. О связи временных параметров вызванной поляризации с размерами поляризуемых тел // Методы разведочной геофизики. Тр. НПО «Руд-геофизика». Л., 1976. С. 109–114.
  8. Кормильцев В.В. Вызванная поляризация моделей и образцов горных пород на переменном токе / Фазовые и амплитудные измерения вызванной поляризации на рудных месторождениях / сб. науч. тр. / Свердловск: УФ АН СССР. 1973. С. 23–33.
  9. Кормильцев В.В. Переходные процессы при вызванной поляризации. М.: Наука, 1980. 112 с.
  10. Кормильцев В.В., Мезенцев А.Н. Электроразведка в поляризующихся средах. Свердловск, 1989. 125 с.
  11. Кузнецов В.М. Металлогеническое районирование территории Охотско-Колымского водораздела в свете закономерной делимости земной коры // Проблемы металлогении рудных районов Северо-Востока России / Сб. науч. трудов. Магадан, 2005. С. 60–77.
  12. Куликов В.А., Яковлев А.Г. Практическое применение временных (частотных) характеристик процесса вызванной поляризации для разделения аномалий от углефицированных пород и сульфидов // Геофизика. 2008. № 6. С. 55–60.
  13. Лемец В.И., Сарбаш В.Ф., Орлов Г.В., Мицкевич Т.Л., Кузьмин П.В., Мариненко В.А., Федосеев П.Ф. Методические рекомендации по применению станции ЭВП-203 при электроразведочных работах на стадии поисков месторождений полезных ископаемых. Алма-Ата: КазВИРГ, 1986.
  14. Омеляненко Б.И. Околорудные гидротермальные изменения пород. М., 1978. 215 с.
  15. Петров А.В. Методы многомерного дисперсионного анализа в алгоритмах комплексной интерпретации геофизических наблюдений // Геофизика. 1996. 1. С. 19–22.
  16. Рыжов А.А., Попов В.А. Некоторые вопросы интерпретации данных метода ВП в частотном варианте // Изв. ВУЗов. Геология и разведка. 1975. № 12. С. 154–160.
  17. Ткачев А.В., Хасанов М.М., Михалицина Т.И. Геолого-геофизическая интерпретация данных метода вызванной поляризации на золоторудных месторождениях Яно-Колымского орогенного пояса // Геология и геофизика. 2017. Т. 58, № 11. С. 1794–1804.
  18. Ханчук А.И. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России. В 2 т. Владивосток: Дальнаука, 2006.
  19. Шарафутдинов В.М. Региональный и локальный банки петрофизических параметров // Колыма. 2002. № 2. С. 16–20.
  20. Шарафутдинов В.М., Хасанов И.М. Геофизические характеристики Омчакского золоторудного узла и некоторые магнитоэлектрические аспекты локализации золотого оруденения // Геодинамика, магматизм и минералогия континентальных окраин Севера Пацифики. Магадан, 2003. Т. 3. С. 267.
  21. Berdichevsky M.N., Vanyan L.L., Koshurnikov A.V. Magnetotelluric sounding in the Baikal rift zone // Izvestiya – Physics of the Solid Earth. Maik Nauka/Interperiodica Publishing (Russian Federation). V 35. P. 793–814
  22. Rodi W., Mackie R.L. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion // Geophysics. 2001. V. 66. P. 174–187.
  23. Zisser N., Kemna A., Nover G. Relationship between low-frequency electrical properties and hydraulic permeability of low-permeability sandstones // Geophysics. 2010. V. 75, N 3. P. E131–E141.

*Рекомендована к печати В.Б. Каплуном*

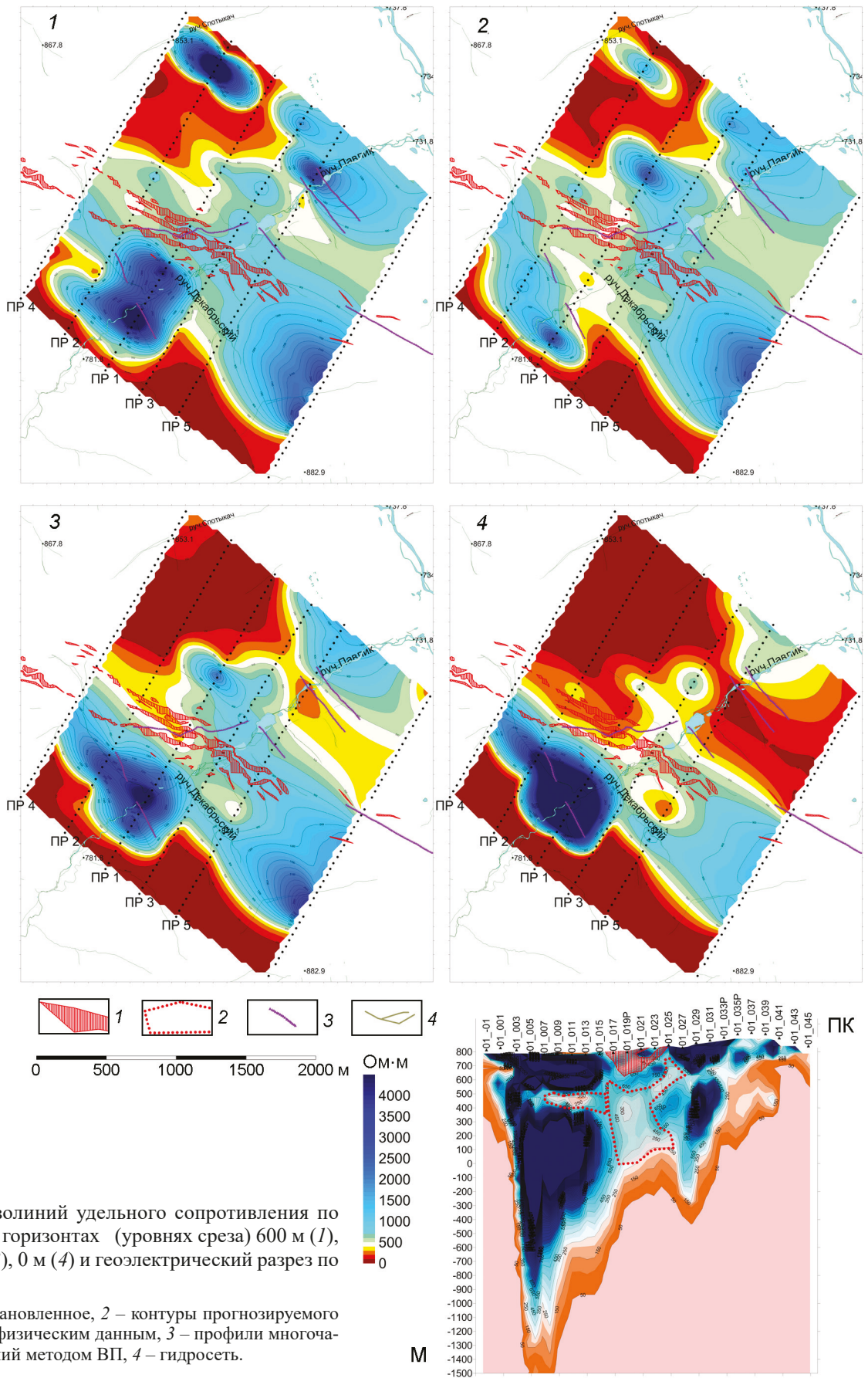
после доработки 22.06.2021 г.  
принята к печати 26.09.2021 г.

*I. M. Khasanov, A. V. Tkachev, A. V. Koshurnikov, A. P. Ganov*

### **Characteristics of geophysical fields of the Pavlikovskoe gold ore deposit (Yano-Kolyma metallogenic belt)**

The presented work provides the results of the analysis of the geophysical fields of the gold deposit, as well as some of their characteristic features. A set of geophysical studies and data processing techniques for solving the problems of gold mineralization forecast within the Yano-Kolyma metallogenic belt are presented. Based on the interpretation of the complex of geophysical data, geological and geophysical indications of gold mineralization are proposed in the following hierarchic sequence: ore cluster – ore field – mineralized zone – ore body. One of the main interpretation techniques in determining prospecting indicators of potential ore bodies (or high-grade intervals) is to study induced polarization frequency responses.

**Key words:** induced polarization method, induced polarization frequency responses, magnetotelluric sounding, gold-quartz mineralization, Yano-Kolymsky region, Magadan region.



**Рис. 4.** Планы изолиний удельного сопротивления по данным АМТЗ на горизонтах (уровнях среза) 600 м (1), 500 м (2), 300 м (3), 0 м (4) и геоэлектрический разрез по профилю 1 (5).

1 – рудное тело установленное, 2 – контуры прогнозируемого (на разрезе) по геофизическим данным, 3 – профили многочастотных исследований методом ВП, 4 – гидросеть.

М

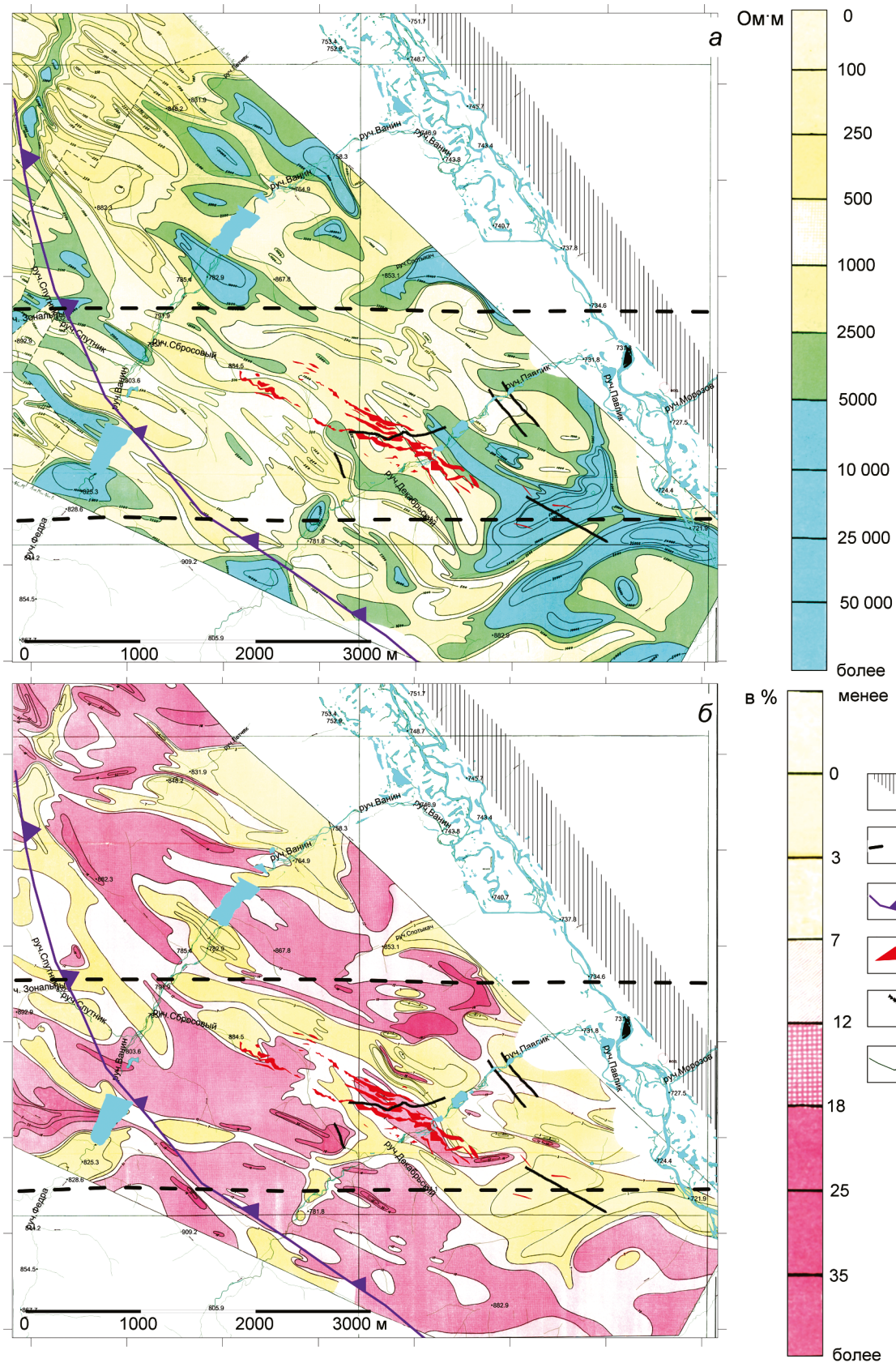


Рис. 5. Планы изолиний удельного сопротивления (а) и вызванной поляризации (б).

1 – зона Тенькинского глубинного разлома, 2 – субширотная зона, 3 – Омчакский рудный узел, 4 – рудные тела, 5 – профили многочастотных исследований методом ВП, 6 – гидросеть.