



РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТНО-МЕТОДИЧЕСКИХ РАБОТ НА МАЛЕТОЙВАЯМСКОМ ЗОЛОТОРУДНОМ ПОЛЕ (п-ов Камчатка)

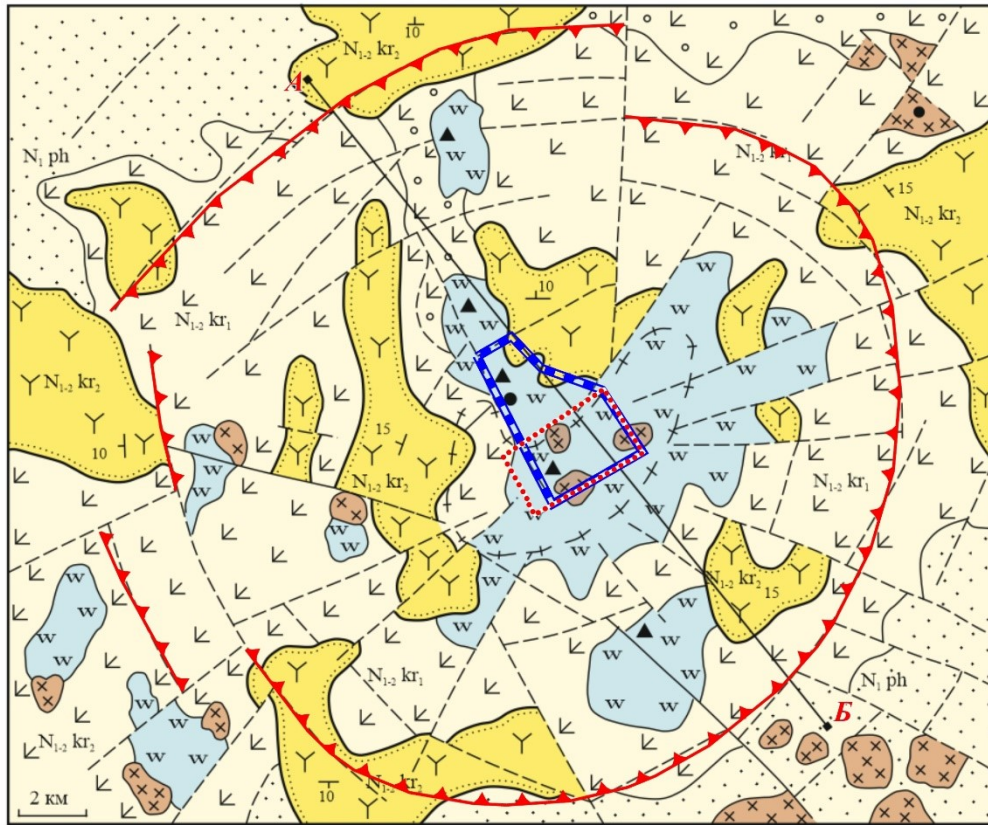
Рассмотрены результаты опытно-методических геофизических работ, выполненных в 2016 году ОАО «Карамкенская геолого-геофизическая экспедиция» совместно с ООО «НПП ВИРГ-Рудгеофизика» в пределах Малетойваямского золоторудного поля. Основной объем работ проведен в пределах «эталонных» объектов — поисковых участков, характеризующихся высокой геологической изученностью. Для решения поисковых задач ООО «НПП ВИРГ-Рудгеофизика» выполнены электроразведочные работы методом вызванной поляризации.

Цель опытно-методических работ: выбор оптимального поискового комплекса геофизических методов для поисков золотоносных тел монокварцитов, а также картирования рудоконтролирующих структур и элементов метасоматической зональности в пределах полей вторичных кварцитов.

Краткая геологическая характеристика Малетойваямского рудного узла и одноименного золоторудного поля

Малетойваямский рудный узел расположен в центральной части вулканотектонической структуры, представляющей собой крупный стратовулкан Корякско-Центрально-Камчатского неоген-четвертичного вулканоплутонического пояса, с расположенной в ее центре кальдерой обрушения диаметром до 30 км (Рис. 1). Субстрат стратовулкана сложен песчаниками, гравелитами, конгломератами с прослоями угленосных отложений, мергелей и известняков, входящих в ранне-среднемиоценовую пахачинскую и корфскую свиты [Волчков, Звездов, 1997]. Собственно стратовулкан сложен стратифицированными образованиями ветроваямской свиты, представленными в различной степени измененными гидротермально-метасоматическим процессами, эффузивными, пирокластическими и туфогенно-осадочными породами андезитового состава (Рис. 1). В пределах Малетойваямского рудного узла широко развиты эффузивные, экструзивные и субвулканические тела андезит-дацитового состава, а также небольшие (до 500×1000 м) штоки диоритовых порфириров.

В пределах Малетойваямского рудного узла, выявлены и оценены запасы золотого оруденения алуни-кварцевого («*high sulfidation*») типа, сформированного, вероятно, в ходе становления медно-порфировой рудно-магматической системы [Волчков, Звездов, 1997]. Промышленные золотоносные тела разведаны на трех участках (рудопроявлениях), расположенных в центральной части Малетойваямского рудного узла. Это позволило предшественникам выделить Малетойваямское золоторудное поле, включающее эти участки и их окрестности.



Схематический геологический разрез по линии АБ

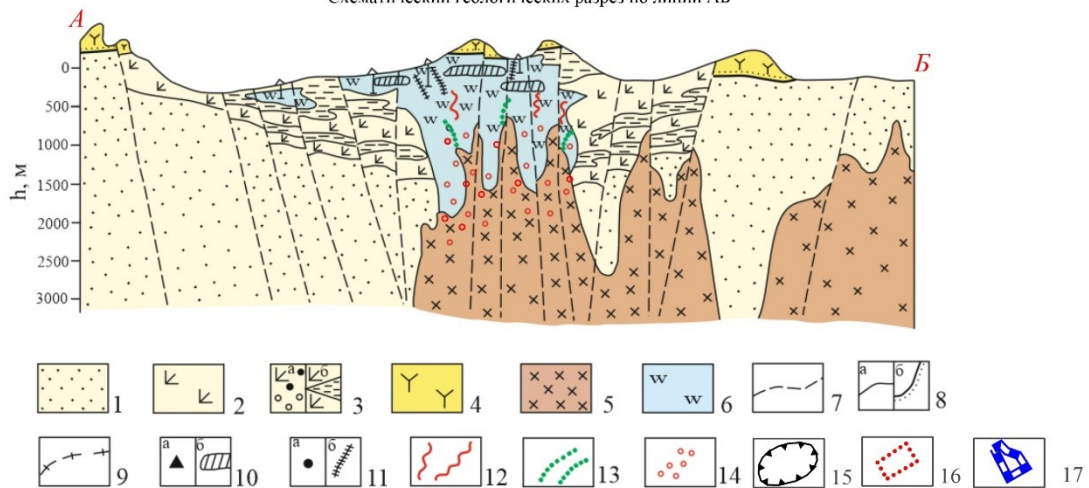


Рис. 1. Рудно-магматическая система Малотойваямского стратовулкана (по материалам: А. Г. Волчкова, В. С. Звезда (1997); А. Е. Конова, Л. Л. Ляшенко (1974)).

1 – пахачинская свита: песчаники, гравелиты, конгломераты с горизонтами известняков и углистыми прослоями; нижняя толща корфовской свиты: 2 – лавы и преобладающие туфы андезитового состава; 3 – вулканомиктовые образования: на схеме (а), на разрезе (б); верхняя толща корфовской свиты: 4 – лавы андезитового состава; 5 – субвулканические интрузивы диоритов и диоритовых порфиритов, коагматичные вулканитам нижней толщи корфовской свиты; 6 – гидротермально-метасоматически измененные породы (нерасчлененные); 7 – кольцевые и радиальные разломы; 8 – геологические границы: согласно (а) и несогласно (б) залегания пород; 9 – граница аномалии силы тяжести, превышающей 20 мГал; месторождения и рудопроявления: установленные: 10 – самородной серы (а – на плане; б – в разрезе), 11 – медно-мышьяковые (энаргит-люционитовые с золотом и серебром (а – на плане; б – в разрезе)); прогнозируемые (в разрезе): 12 – жильные золото-серебряные, 13 – жильные золото-полисульфидные, 14 – золото-медно-порфировое; 15 – схематический контур кальдеры обрушения; 16 – контур участка геофизических работ (см. Рис. 2); 17 – контур Малотойваямского золоторудного поля (граница проведена условно).

Пространственно оно расположено в пределах полосы измененных пород (пропилитов и пропилитизированных пород, в пределах которых локализуются участки развития разнообразных вторичных кварцитов), шириной до 10 км протягивающейся на расстояние 35 км с ЮЗ на СВ (Рис. 1).

Местонахождение, форма и размеры полей вторичных кварцитов определяются литологическим (физико-механическими составами пород) и тектоническим факторами.

Гидротермально-метасоматически измененные породы развиты, преимущественно, по вулканогенным образованиям нижневетроваямской подсвиты. В строении полей измененных пород выделяется горизонтальная и вертикальная зональность, типичная для месторождений кварц-алунитового типа (от периферии к центру): пропилитизированные породы и пропилиты; серицит-кварцевые метасоматиты; каолинит-кварцевые вторичные кварциты; алунит-кварцевые вторичные кварциты; монокварциты сливные и пористые.

Золотое оруденение Малетойваямского рудного поля отнесено к алунит-кварцевому типу. Однако в его пределах также встречены рудопроявления люционит-энаргитовой и наложенной медно-мышьяковой сульфосолевой минерализации, характерной для верхних частей медно-порфировых систем [Sillitoe, 2010; Звездов, Волчков, 1997].

Большая часть выделенных золотоносных тел — это мощные минерализованные залежи пластовой формы в монокварцитах, реже в алунитовых и пирит-алунитовых вторичных кварцитах. Вещественный состав золоторудных тел достаточно простой — это кварц, алунит и каолинит. Рудные минералы представлены пиритом, лимонитом и энаргитом, количество которых в среднем не превышает 1 – 2 % от объема породы (иногда достигает 5 – 10 %).

Петрофизические свойства пород золото-серебряных месторождений алунит-кварцевого типа

Особенности геологического строения эпитермальных золото-серебряных месторождений алунит-кварцевого типа существенно различны. Однако их объединяет то, что они располагаются в пределах полей интенсивно измененных пород площадью до 10 км² и более [Sillitoe, 1999; Петренко, 1999], которые с разной степенью детальности отражаются в геофизических полях. Согласно обобщениям результатов работ, выполненных на эпитермальных золото-серебряных месторождениях, преобразование пород агрессивными растворами в ходе кислотного выщелачивания неизбежно приводит к значительному изменению их петрофизических свойств [Morrell et al., 2007; Locke A. et al., 2007; Allis, 1990; Irvine, Smith, 1990]. Рассматривая в качестве протолита андезиты, можно полагать, что по мере увеличения интенсивности изменения пород:

- магнитная восприимчивость и остаточная намагниченность уменьшатся ввиду разрушения акцессорного магнетита и темноцветных минералов;
- содержание калия увеличится за счет появления минералов богатых калием (в основном калиевых слюд), что приведет к увеличению природной радиоактивности пород;

- удельное электрическое сопротивление ($УЭС$) может как увеличиваться при процессах окварцевания, так и уменьшаться при повышении количества глинистых минералов и/или увеличении пористости пород;
- поляризуемость пород может увеличиваться или уменьшаться в зависимости от типа изменений и состава наложенной минерализации; увеличение поляризуемости происходит по нескольким причинам, за счет повышения доли глинистых минералов в породе или появления сульфидов металлов (пирита, борнита, энаргита и др.); уменьшение поляризуемости обычно происходит за счет окварцевания пород;
- плотность пород чаще всего уменьшается, но может и увеличиться (например, за счет их сульфидизации).

Однако, интенсивность изменения пород в геофизических полях отражается неоднозначно. Несмотря на это, на эпитермальных золото-серебряных месторождениях алунит-кварцевого типа по геофизическим данным успешно решаются поисковые задачи. Наибольшей эффективностью обладают методы кажущегося сопротивления и вызванной поляризации (ВП), особенно на тех месторождениях, где золото-серебряная минерализация приурочена к телам монокварцитов [Locke A. et al., 2007; Allis, 1990; Irvine, Smith, 1990]. Они обладают высоким $УЭС$ и уверенно выделяются локальными аномалиями повышенных (сотни – тысячи Ом·м) значений кажущегося удельного электрического сопротивления (ρ_k), а окружающие их породы, содержащие повышенное количество глинистых минералов, — пониженными значениями (десятки Ом·м).

В магнитном поле тела монокварцитов и окварцованные породы не отражаются, потому что они окружены ореолом немагнитных интенсивно измененных пород.

Интенсивность аномалий поляризуемости чаще всего также не имеет четкой связи с интенсивностью изменения пород. Это обусловлено тем, что сульфиды — основной источник ВП пород — могут отлагаться в пред-, пост- или синрудные этапы и не иметь четкой связи с золото-серебряной минерализацией. Кроме того, промышленные рудные тела обычно приурочены к монокварцитам, содержащим незначительное количество сульфидов (1 – 2 %).

Результаты работ и их обсуждение

Анализ данных магнитных съемок, выполненных в разные годы (Рис. 2а) в центральной части Малетойваямского золоторудного поля, показал, что магниторазведка позволяет решать преимущественно картировочные задачи. Для выделения особенностей аномального магнитного поля, отражающих элементы геологического строения участков работ, использовались его различные трансформанты. Среди них наиболее информативными оказались: пересчеты поля вверх на разные высоты (Рис. 2б), его локальные составляющие, тилт-трансформация, горизонтальные градиенты и дисперсия магнитного поля в «скользящем окне» (Рис. 2в).

Интенсивные гидротермально-метасоматические преобразования пород уменьшают их магнитную восприимчивость и намагниченность до нуля. По этой причине в магнитном поле они выделяются площадными отрицательными магнитными аномалиями (Рис. 2а, г). Однако в общем случае интенсивность магнитного поля не является достаточным критерием для выделения областей измененных пород. Это обусловлено тем, что она также зависит и от других факторов.

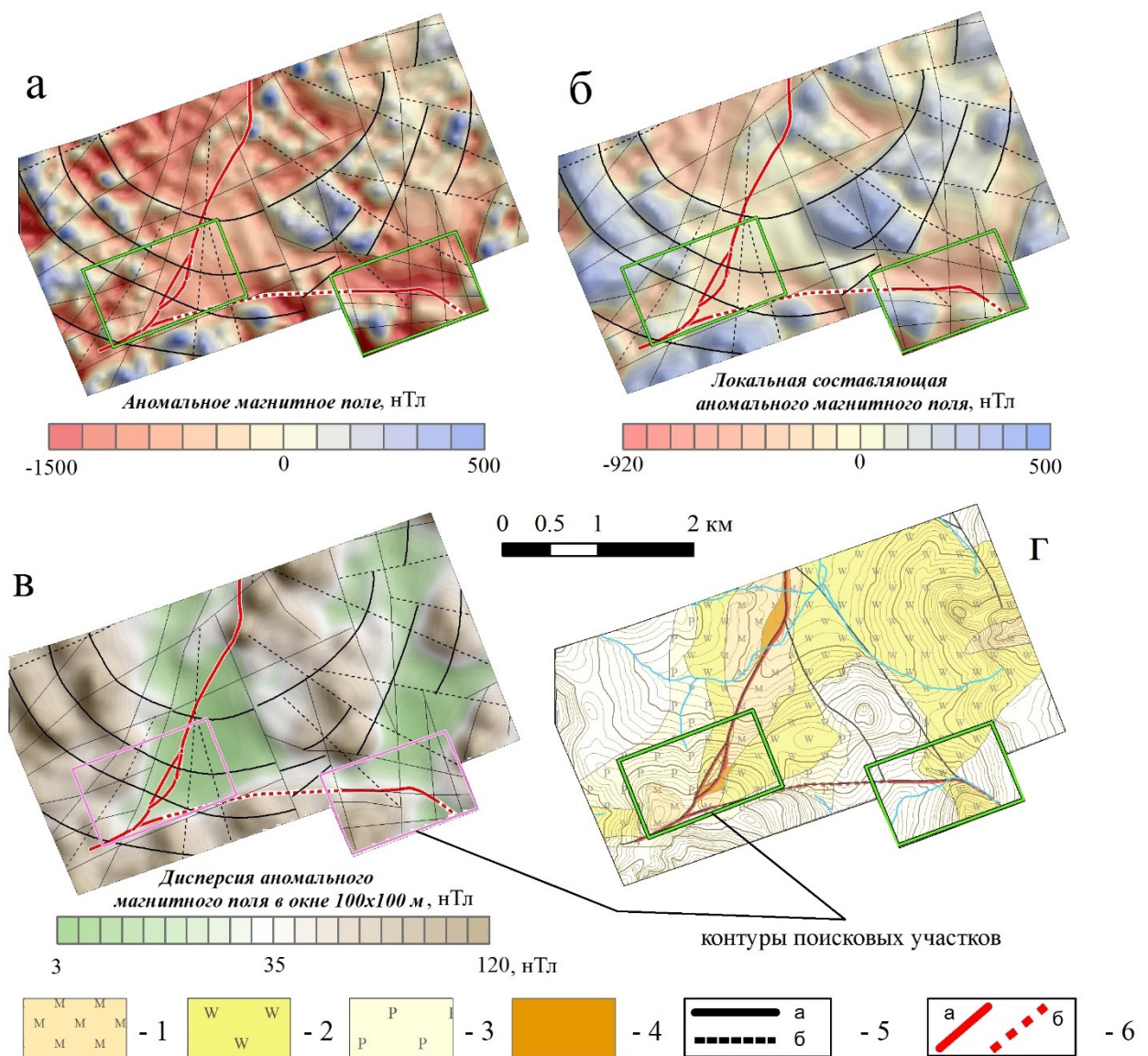


Рис. 2. Аномальное магнитное поле (а) и его трансформанты (б, в).

а – аномальное магнитное поле, *б* – локальная составляющая аномального магнитного поля (разница между ΔT_a пересчитанным на высоту 100 и 500 м над поверхностью земли), *в* – дисперсия ΔT_a в окне 100×100 м, *г* – схема гидротермально-метасоматической зональности (по геологическим данным).

Условные обозначения. Гидротермально-метасоматически измененные породы: 1 – монакварциты, 2 – вторичные кварциты, 3 – пропилиты, 4 – золотоносные тела монакварцитов; 5 – разрывные нарушения, выделенные по данным магнитной съемки: *а* – кольцевые; *б* – радиальные; *б* – стержневые золотоносные структуры: *а* – достоверные, *б* – предполагаемые.

Например, на некоторых участках интенсивно измененные породы перекрыты («экранированы») пропилитизированными породами и/или более магнитными образованиями верхневетроваямской подсвиты. На таких участках их картирование по данным магнитной съемки невозможно. Кроме того, магнитное поле в вулканогенно-осадочной толще, породы в которой не подвержены интенсивным преобразованиям, чаще всего обладает высокой изрезанностью (дисперсностью), обусловленной как неоднородным намагничиванием пород, так и неоднородным строением самой толщи. Однако интенсивное преобразование пород гидротермально-метасоматическими процессами приводит к нивелированию их магнитных свойств, что отражается в сглаженном характере магнитного поля (изрезанность исчезает (см. Рис. 2а, Рис. 3в)). При этом участки с

сглаженным (спокойным) магнитным полем выделяются в виде изометричных или вытянутых областей, разрушающих его общую «структуру» (Рис. 2а, в). По этой причине их называют областями «распада структуры» магнитного поля и используют для картирования измененных пород [Morrell et al., 2007; Allis, 1990; Irvine, Smith, 1990].

Для выделения областей распада магнитного поля обычно используют горизонтальный градиент или дисперсию ΔT_a в «скользящем окне» (ΔT_D). Сопоставление схемы измененных пород (Рис. 2г) с картой псевдорельефа ΔT_D , рассчитанной в «скользящем окне» 100×100 м (Рис. 2в), показывает, что ядерные части полей вторичных кварцитов, к которым приурочены тела монокварцитов, выделяются областями слабодисперсного магнитного поля ($\Delta T_D > 15$ нТл). Отмеченные особенности отражения измененных пород в магнитном поле позволяют картировать их в плане. Это дает возможность картировать элементы метасоматической зональности в пределах полей вторичных кварцитов.

В магнитном поле также отчетливо выделяется сложная сеть разломов: кольцевые, радиальные, а также разрывные нарушения СВ, СЗ и широтной ориентировки (Рис. 2). Анализ структуры магнитного поля позволяет полагать, что в пределах Малетойваямского золоторудного поля проявлена интенсивная блоковая тектоника с «клавишной структурой». Кроме того, в центральной части Малетойваямского рудного узла дугообразными аномалиями магнитного поля отчетливо выделяется фрагмент кольцевой структуры и формирующие ее кольцевые разломы. Наличие кольцевой структуры может указывать на приуроченность Малетойваямского золоторудного поля к жерловой части палеовулкана.

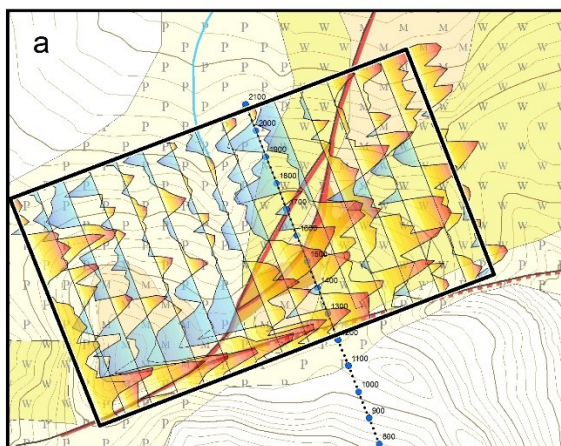
Совместный анализ данных электроразведки методом ВП и магнитной съемки в пределах поисковых участков позволил выделить разрывные нарушения, а также элементы метасоматической зональности (см. например, Рис. 3д).

Аномалиями повышенных значений ρ_k выделились тела окварцованных пород¹ двух типов: площадные (линзообразные, мощностью до 300–400 м) и дайкообразные (крутопадающие, маломощные 20–40 м). Области окварцованных пород площадного типа, выделяются аномалиями повышенных значений $\rho_k > 200$ Ом·м. В пределах рассматриваемого поискового участка аномалия повышенных значений ρ_k имеет форму расходящегося веера, раскрывающегося в СВ направлении (Рис. 3а, д). Пространственно она приурочена к ядерной (стержневой) зоне массива вторичных кварцитов. По данным ЭТ в разрезе выделенное тело окварцованных пород имеет линзообразную форму (погружение в СЗ направлении) и сложное строение — включает три дайкообразных тела монокварцитов (входящих в группу тел СВ простирания). По данным ЭТ они образуют сходящийся книзу веер, вероятно, маркирующий трещины, контролирующие область циркуляции и растекания растворов (Рис. 4).

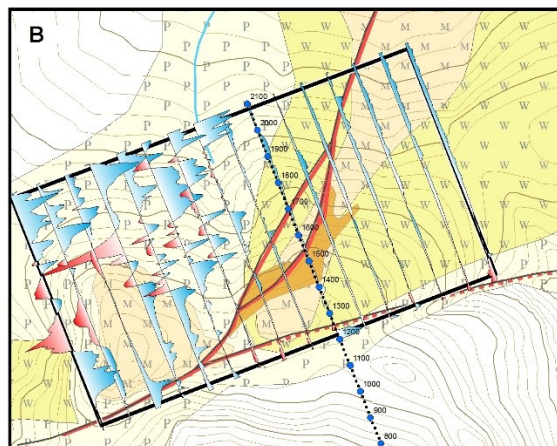
Тела дайкообразного типа (массивных монокварцитов) выделяются локальными линейно-вытянутыми аномалиями повышенных значений ρ_k интенсивностью до 1000 Ом·м. Мощность тел изменчива от 20 до 100 м.

¹ Под окварцованными породами понимаются не только монокварциты, но и другие типы гидротермально-метасоматически измененных пород, содержащих значительную долю кварца. Например, определенные разности вторичных кварцитов, аргиллизитов, кварц-пирит-гидрослюдистых метасоматитов и т.п.

Карта графиков кажущегося удельного электрического сопротивления



Карта графиков аномального магнитного поля



Карта графиков кажущейся поляризуемости

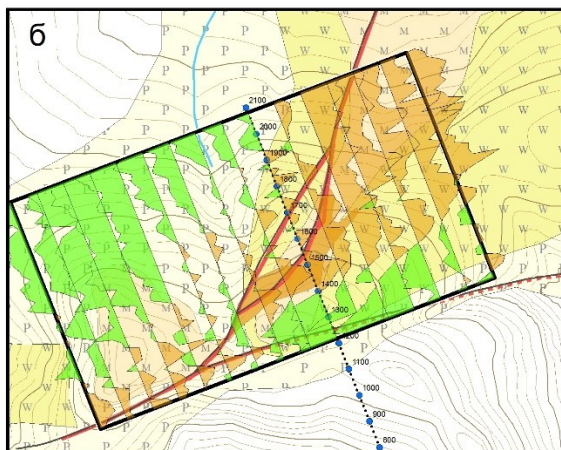
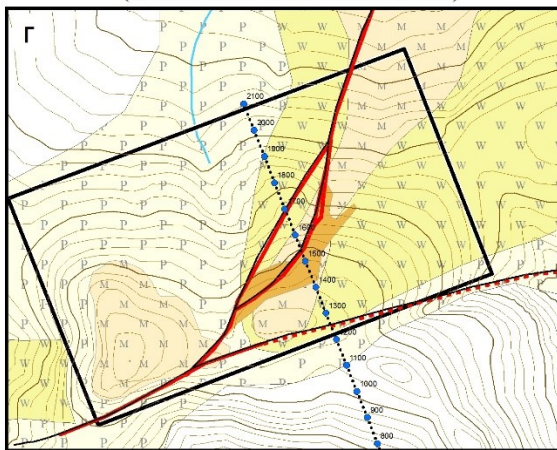


Схема гидротермально-измененных пород (по геологическим данным)



Условные обозначения

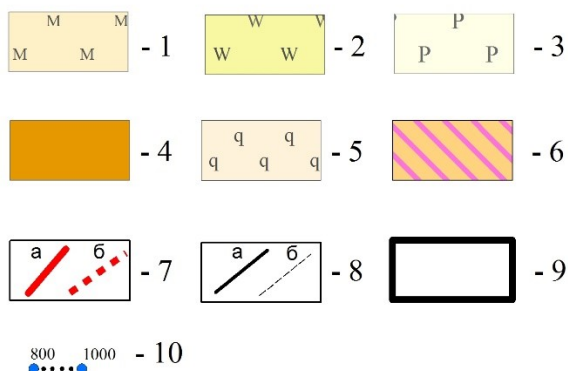
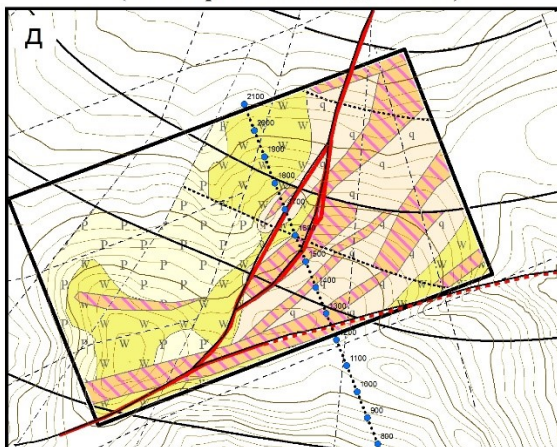


Схема гидротермально-измененных пород (по геофизическим данным)



0 250 500 1,000 м

Рис. 3. Результаты электропрофилирования методом ВП с установкой СГ (а, б) и магнитной съемки (в) на одном из поисковых участков Малетойваймского золоторудного поля.

Гидротермально-метасоматически измененные породы: 1 – монокварциты, 2 – вторичные кварциты, 3 – пропилиты, 4 – золотоносные тела монокварцитов; Окварцованные породы: 5 – объемное окварцевание, 6 – дайкоподобные тела; 7 – стержневые золотоносные структуры: а – установленные, б – предполагаемые; 8 – разрывные нарушения: а – основные, б – второстепенные; 9 – контур поискового участка; 10 – профиль электромографии (см. Рис. 4).

По геофизическим данным выделяются дайкообразные тела двух направлений: СВ и широтного. Тела СВ простирания имеют кулисообразное расположение с левосторонним смещением осей, которое, вероятно, обусловлено наличием разрывных нарушений СЗ направления, осложненных вертикальными и/или горизонтальными («шарнирными») смещениями блоков. Кулисообразное расположение тел позволяет предполагать, что движения по кольцевым разломам происходили после формирования тел вторичных кварцитов (Рис. 3а, д).

Дайкообразные тела СВ простирания формируют две субпараллельные зоны. Первая зона пространственно совпадает с телом золотоносных монокварцитов (Рис. 3г, д). Вторая зона не отражена на геологической карте, что позволяет отнести ее к потенциально рудоносной и рекомендовать постановку заверочных горных или буровых работ.

Кроме того, вдоль широтного разлома на расстояние более 1 км прослежено протяженное крутопадающее тело монокварцитов широтной ориентировки, которое в восточной части рассматриваемого поискового участка сочленяется с группой дайкообразных тел СВ ориентировки. Судя по пространственному положению оно маркирует подводящий канал, а тела СВ ориентировки — область «растекания» гидротермальных растворов (при определяющей роли структурных и литологических факторов).

Область окварцованных пород площадного типа, выделяющаяся аномалией повышенных значений кажущейся поляризуемости (η_k) интенсивностью 1.5 – 2 %, содержит повышенное количество сульфидов и глинистых минералов. В ее пределах отчетливо видны локальные аномалии высокой интенсивности $\eta_k > 2.5 - 3 \%$, которые, вероятно, отвечают участкам более интенсивной сульфидизации пород (последнее подтверждается документацией керн скважин (см. Рис. 4е)).

Породы, различающиеся степенью гидротермально-метасоматических изменений, также хорошо разделяются по удельному электрическому сопротивлению (ρ). На разрезах распределения ρ окварцованные породы выделяются изометричными областями высокого $\rho > 500$ Ом·м, вторичные кварциты низкой степени окварцевания — пониженного ρ от 20 до 100 Ом·м, а слабоизмененные пропилитизированные породы — повышенного ρ от 150 до 350 Ом·м. На разрезе распределения ρ также видно, что под телом окварцованных пород областью пониженных значений ρ (20 – 100 Ом·м) отчетливо выделились вторичные кварциты низкой степени окварцевания, приуроченные к крутопадающим разрывным нарушениям различной ориентировки.

Кроме того, по данным ЭТ на контакте вторичных кварцитов с неизмененными породами нижневетроваямской подсвиты субвертикальной столбообразной областью повышенных значений ρ и η выделяется слепое тело монокварцитов, над которым установлена отрицательная локальная аномалия ΔT_a (Рис. 4в). Для выявления его рудоносности рекомендовано пробурить поисковую скважину.

Области сульфидизации пород на разрезах распределения η выделяются повышенными и высокими значениями $\eta > 3 \%$. Геологическая природа этих аномалий подтверждается данными бурения (интервалы повышенной сульфидизации пород, установленные по данным бурения, попадают в области с повышенной и высокой поляризуемостью (Рис. 4)).

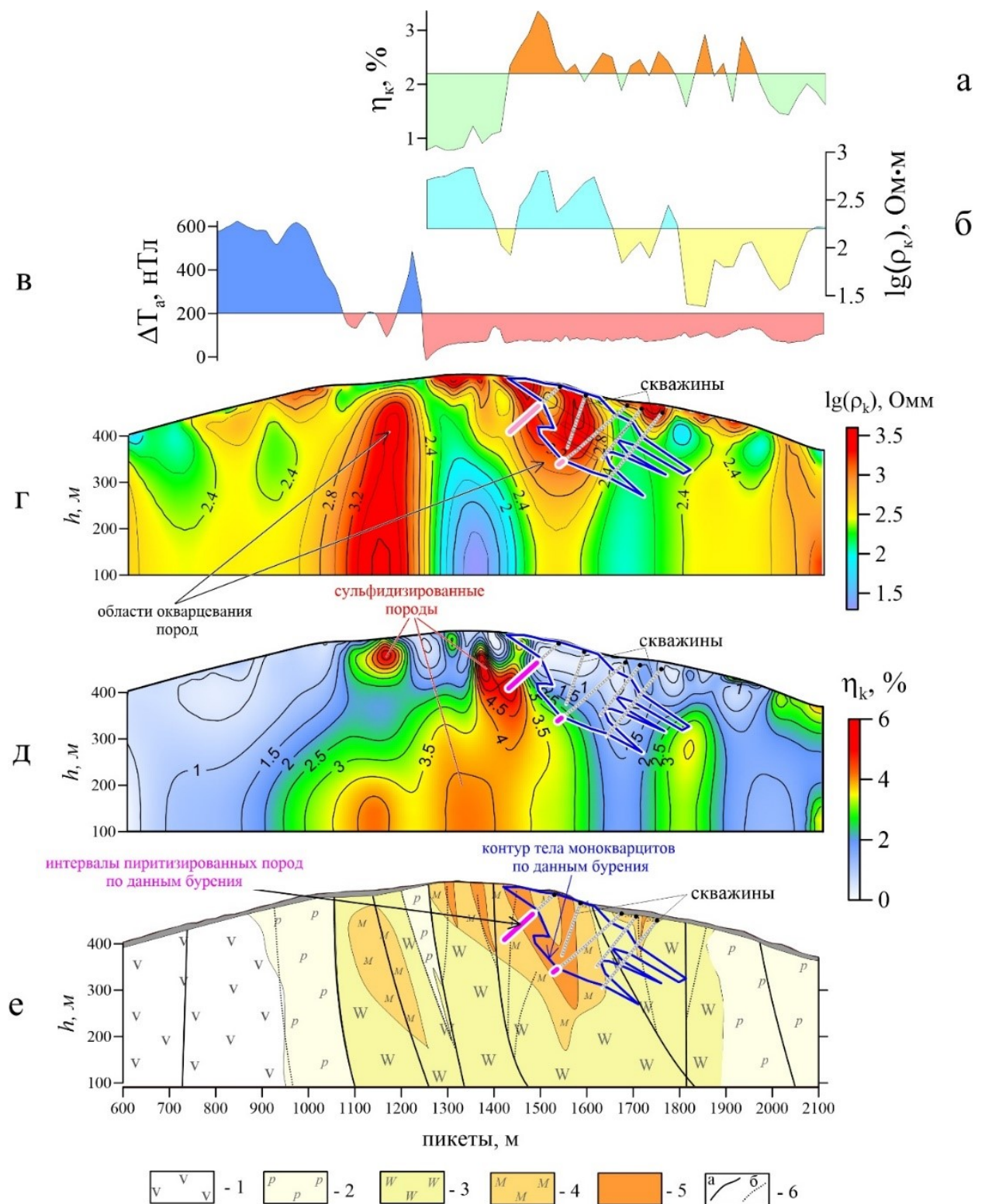


Рис. 4. Результаты электротомографии методом ВП по профилю 1.

Графики: кажущейся поляризуемости (а), кажущегося удельного электрического сопротивления (б) и аномального магнитного поля (в). Геоэлектрические разрезы: г – разрез распределения удельного электрического сопротивления, д – разрез распределения поляризуемости. е – геолого-геофизический разрез. Условные обозначения: 1 – андезиты ветроваямской подсытки, Гидротермально-метасоматически измененные породы: 3 – пропилиты, 2 – вторичные кварциты, 1 – монокварциты, 4 – кварцевые тела дайкообразной формы; б – разрывные нарушения: а – основные, б – второстепенные. Пространственное положение профиля электротомографии приведено на Рис. 3.

Особенностью рассмотренного поискового участка является увеличение сульфидизации пород с глубиной, что может косвенным образом указывать на возможное наличие медно-порфировой системы на глубине (в качестве благоприятного признака можно отметить наличие штока диорит-порфиров в ЮВ части участка).

По форме аномалий поляризуемости можно предполагать, что основной объем сульфидов отлагался после того, как были сформированы тела монокварцитов, которые выступали в роли экрана (флюидоупора). На это указывает чашеобразная форма областей, обладающих повышенной поляризуемостью, а также их расположение в периферической части тела окварцованных пород. Однако на некоторых участках (в нижней части тел монокварцитов) области повышенных значений ρ и η перекрываются, что может указывать на отложение сульфидов по разломам (трещинам) секущим тела монокварцитов (отлагалась после их формирования).

Следует принимать во внимание также то, что в пределах Малетойваямского рудного поля разведано одноименное месторождение и многочисленные проявления серы. При этом серные рудные тела характеризуются повышенным ρ , а сами руды, содержат до 15 % сульфидов (следовательно, будут характеризоваться повышенной поляризуемостью). Таким образом, при поисках золоторудных тел в пределах полей вторичных кварцитов Малетойваямского золоторудного поля сульфидизированные породы могут не иметь прямой связи с золото-серебряной минерализацией (иметь другой генезис) и формировать «ложные» аномалии.

Однако анализ геолого-геофизических данных показал, что все известные золоторудные тела расположены в пределах аномалий с повышенными и высокими значениями η_k . Кроме того, сульфиды, вероятно, отлагались после того как были сформированы тела монокварцитов (пост- или синрудный этапы). При этом, не исключено, что золото и сульфидная минерализация отлагались в близкий временной период. В этом случае аномалии повышенной поляризуемости и отвечающие им минерализованные зоны, могут быть индикатором проявления «рудного» процесса (участков разгрузки палеогидротерм) и являться хорошим поисковым критерием.

Заключение

Анализ геолого-геофизических материалов показал, что предложенный комплекс геофизических методов обладает хорошей поисковой эффективностью. Золотоносные тела монокварцитов уверенно картируются по данным электроразведки методом ВП в плане (ВП-СГ) и разрезе (ЭТ).

На основе выполненных опытно-методических работ можно рекомендовать следующий поисковый комплекс геофизических методов: электропрофилирование методом ВП масштаба 1:10 000 по сети 100×20 м, электротомография по отдельным профилям и магнитная съемка масштаба 1:5 000 по сети 50×5 м. Кроме того, необходимо учитывать то, что на некоторых участках условия заземлений для электроразведки методом ВП могут оказаться неприемлемыми. Для этого случая предусмотрена замена метода ВП на метод сопротивления, не требующего заземления электродов приемных линий — бесконтактное электропрофилирование (БИЭП) и радиоманнитотеллурические зондирования с контролируемым источником (РМТ-К).

Список литературы

Волчков А. Г. Звездов В. С. Природа проявлений медно-мышьяковой минерализации Малетойваямского стратовулкана // Руды и металлы, №5, 1997, С. 44–52.

Петренко И. Д. Золото-серебряные формации Камчатки. Петропавловск-Камчатский. 1999. 116 с.

Инструкция по электроразведке. М.: «Недра», 1984. 232 с.

Allis R. G. Geophysical anomalies over epithermal systems // *Journal of Geochemical Exploration*. Vol. 36, 1990, P. 339 – 374.

Irvine R. J. and Smith M. J. Geophysical exploration for epithermal gold deposits // *Journal of Geochemical Exploration*, Vol. 36, 1990, P. 375 – 412.

Locke A. et al. Geophysical characteristics of the southern Coromandel Volcanic Zone, New Zealand, and associated epithermal deposits // *ASEG 2007 – Perth, Western Australi*. P. 1 – 5.

Morrell A. E., Locke C. A., Cassidy J., Mauk J. L. Geophysical Characteristics of Adularia-Sericite Epithermal Gold-Silver Deposits in the Waihi-Waitekauri Region, New Zealand // *Economic Geology*, Vol. 106, 2001, P. 1031 – 1041.

Oldenburg D. W., Li Y. Estimating depth of investigation in dc and IP surveys. // *Geophysics*. 1999, Vol. 64, P. 403 – 416.

Sillitoe R. H. Styles of High-Sulphidation Gold, Silver and Copper Mineralisation in Porphyry and Epithermal Environments // *Pacrim 1999 Proceedings, Bali, Indonesia; The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Melbourne*, P. 29 – 45.

Sillitoe R. H. Porphyry Copper System // *Economic Geology*, 2010, Vol. 105, P. 3–41.