

## Опыт применения геофизических методов при поисках эпитермальных месторождений золота (на примере Малетойваямского золоторудного поля, Камчатка)

Г. В. Гурин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>«НПП ВИРГ-Рудгеофизика», 197348, г. Санкт-Петербург, ул. Аэродромная, д. 8, корп. А, оф. 244,  
e-mail: gurin-geo@mail.ru

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, 199034, г. Санкт-Петербург,  
Университетская наб., д. 7–9

Поступила в редакцию 16.07.2020 г., принята к печати 14.08.2020 г.

**Объект исследований.** Малетойваямское золоторудное поле (МРП) Северо-Камчатского района и расположенные в его пределах золоторудные объекты “high sulfidation” (HS-типа), относимые к новому геолого-промышленному типу эпитермальных месторождения на п-ове Камчатка. **Материалы и методы.** В статье рассматриваются результаты комплексных геофизических работ (электроразведка, магниторазведка, петрофизические исследования), выполненных в 2016–2017 гг. “НПП ВИРГ-Рудгеофизика” в центральной части МРП, включающего в себя рудопоявления золота HS-типа. **Результаты.** Показана эффективность применения электро- и магниторазведки для поиска эпитермальных месторождений золота HS-типа в пределах плохо обнаженных массивов вторичных кварцитов. По данным наземной магнитной съемки выделены фрагменты кольцевой структуры, разбивающие ее разрывные нарушения и массивы измененных пород в неогеновой вулканогенно-осадочной толще андезитового состава. На основе 3D инверсии данных магнитного поля дана оценка глубинного геологического строения МРП, форм, размеров и особенностей строения массивов измененных пород. Привлечение данных электроразведки методами сопротивления и вызванной поляризации позволило дифференцировать массивы вторичных кварцитов по составу (выявить элементы метасоматической зональности), уточнить геологическое строение золотоносных структур, выделить и проследить золотоносные тела монокварцитов в плане и разрезе. Полученные по результатам геофизических работ материалы позволили существенно изменить представления о геологическом строении центральной части МРП. **Выводы.** Применение геофизических методов для поисков эпитермальных месторождений золота HS-типа в пределах плохо обнаженных массивов вторичных кварцитов Камчатки позволяет устанавливать геолого-структурные особенности их строения, выделять рудоконтролирующие структуры и золотоносные тела монокварцитов, создавая основу для геологоразведочных работ.

**Ключевые слова:** эпитермальные месторождения золота, массивы вторичных кварцитов, золотоносные монокварциты, геофизические методы, петрофизические исследования, электроразведка, магниторазведка

## Geophysical prospecting for epithermal gold deposits (a case study from the Maletoyvayam gold ore field, Kamchatka Peninsula)

Grigoriy V. Gurin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>NPP VIRG-Rudgeofizika, 8A–244 Aerodromnaya st., St. Petersburg 197348, Russia, e-mail: gurin-geo@mail.ru

<sup>2</sup>St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, 7–9 Universitetskaya quay, St. Petersburg 199034, Russia

Received 16.07.2020, accepted 14.08.2020

**Research subject.** The high-sulfidation (HS-type) epithermal gold deposits of the Maletoyvayam ore field, which is located in the volcanic belts of the Kamchatka Peninsula. **Materials and methods.** The paper presents the results of geophysical and petrophysical studies carried out by “NPP VIRG-Rudgeofizika” (2016–2017 years) in the central part of the Maletoyvayam ore field hosting HS-type gold deposits. **Results.** The presented case study shows the potential of geophysical prospecting for HS-type epithermal gold deposits located within altered rock areas. On the basis of the conducted magnetic surveys, fragments of a ring structure broken by faults and the hydrothermally altered bodies within

**Для цитирования:** Гурин Г.В. (2021) Опыт применения геофизических методов при поисках эпитермальных месторождений золота (на примере Малетойваямского золоторудного поля, Камчатка). *Литосфера*, 21(1), 116–132. DOI: 10.24930/1681-9004-2021-21-1-116-132

**For citation:** Gurin G.V. (2021) Geophysical prospecting for epithermal gold deposits (a case study from the Maletoyvayam gold ore field, Kamchatka Peninsula). *Litosfera*, 21(1), 116–132. DOI: 10.24930/1681-9004-2021-21-1-116-132

the Neogene volcanogenic-sedimentary sequence of the andesite composition were identified. Using the 3D inversion of magnetic data, the shape, size and structure of the hydrothermally altered bodies were estimated. The electrical survey data allowed the hydrothermally altered areas to be differentiated in terms of composition. As a result, zoning of hydrothermally altered areas was conducted, and ore-bearing sites and gold-bearing bodies of monoquartzites in the plan and cross-section were determined. *Conclusions.* Geophysical techniques for prospecting HS-type epithermal gold deposits are effective in distinguishing important gold-related features within the altered zone thereby facilitating identification of specific drill targets.

**Keywords:** *epithermal gold deposits, hydrothermally altered rock, gold-bearing monoquartzites, geophysical methods, petrophysical studies, electrical prospecting, magnetic prospecting*

#### Acknowledgements

The author is grateful to the geologists of ООО “KamMed” for the geological information provided, to colleagues who took part in the fieldwork and discussions of their results, to the editor D.Yu. Demezhko and the reviewer for their comments and recommendations.

## ВВЕДЕНИЕ

Резкий рост цен на драгоценные металлы в начале 2000-х гг. сделал привлекательными для золотодобывающих компаний месторождения с бедными рудами (содержание Au 1–2 г/т), но большими запасами. К этой группе относятся месторождения золото-сульфидной (например, Сухой Лог (Иркутская обл.) и медно-порфировой формаций (Sillitoe, 2010), а также золото-серебряные эпитермальные “*high sulfidation*” (HS), или кислотно-сульфатного типа (Лепанто (Филиппины) (Hedenquist et al., 1998), Янакоча (Перу) (Teal, Benavides, 2010), Ель Индио (Чили) (Holley et al., 2016) и др.). Значительная доля эпитермальных Au-Ag-месторождений HS-типа приурочены к массивам измененных пород – кислотно-сульфатным образованиям (алунит-каолинит-кварцевые, гидрослюдисто-каолинит-кварцевые и др.), расположенным в молодых вулканогенно-осадочных поясах. Генетически эпитермальные Au-Ag-месторождений HS-типа связаны с медно-порфировыми системами. Они располагаются в зоне интенсивного кислотного выщелачивания и вскипания гидротерм, представленных кислотно-сульфатными образованиями (в последующем – массивами вторичных кварцитов). Ранее эти образования рассматривались в качестве околорудных метасоматитов или “надрудных шляп” медно-порфиновых систем, не содержащих промышленного оруденения (Волков и др., 2015).

Целенаправленные поиски Au-Ag-месторождений HS-типа в России проводятся с начала 2000-х гг. К настоящему времени выявлено всего несколько таких месторождений, из которых ведется добыча металла (Озерновское (п-ов Камчатка), Светлое (Хабаровский край), Утесное, Атаган (Магаданская обл.)). По этой причине перспективы открытия подобных месторождений в пределах молодых

вулканогенно-осадочных поясов Дальнего Востока России весьма высоки (Волков и др., 2015).

Геологическое строение эпитермальных Au-Ag-месторождений HS-типа имеет существенные различия. Их объединяет то, что они располагаются в пределах полей интенсивно измененных пород – массивов вторичных кварцитов – площадью до 10 км<sup>2</sup> и более (Sillitoe, 2010; Петренко, 1999), которые с разной степенью детальности отражаются в геофизических полях. Примеры решения поисковых и картировочных задач геофизическими методами на эпитермальных Au-Ag-месторождениях HS-типа в Новой Зеландии, Японии, Австралии, США и других районах мира многочисленны (Allis, 1990; Irvine, Smith, 1990; Locke et al., 2007; Kellett, Bromley, 2019). Обобщая результаты этих работ, можно выделить группу геофизических методов, обладающих наибольшей эффективностью: магнитная съемка (в наземном или аэровариантах), аэрогамма-спектрометрия (для хорошо обнаженных территорий), электроразведка методами кажущегося сопротивления (КС) и вызванной поляризации (ВП).

На Камчатке, в частности, известно большое количество массивов вторичных кварцитов, в пределах которых поисковые работы на золото, серебро и медь не проводились, несмотря на то что рудопроявления этих металлов установлены повсеместно. Такая ситуация сложилась в Северо-Камчатском сероносном районе, в пределах которого с конца 1950-х по 1970-е гг. геолого-разведочные работы были нацелены на поиски серы (Яроцкий, 2006). Позднее, в 2000-х гг., в его пределах выделяют рудные узлы (Малетойваямский, Ветровый) и участки, перспективные на выявление крупнообъемных эпитермальных золотосеребряных и медно-порфиновых месторождений (Петренко, 1999; Волчков, Звездов, 1997). Так, в пределах Малетойваямского рудного узла с 2007 г. про-

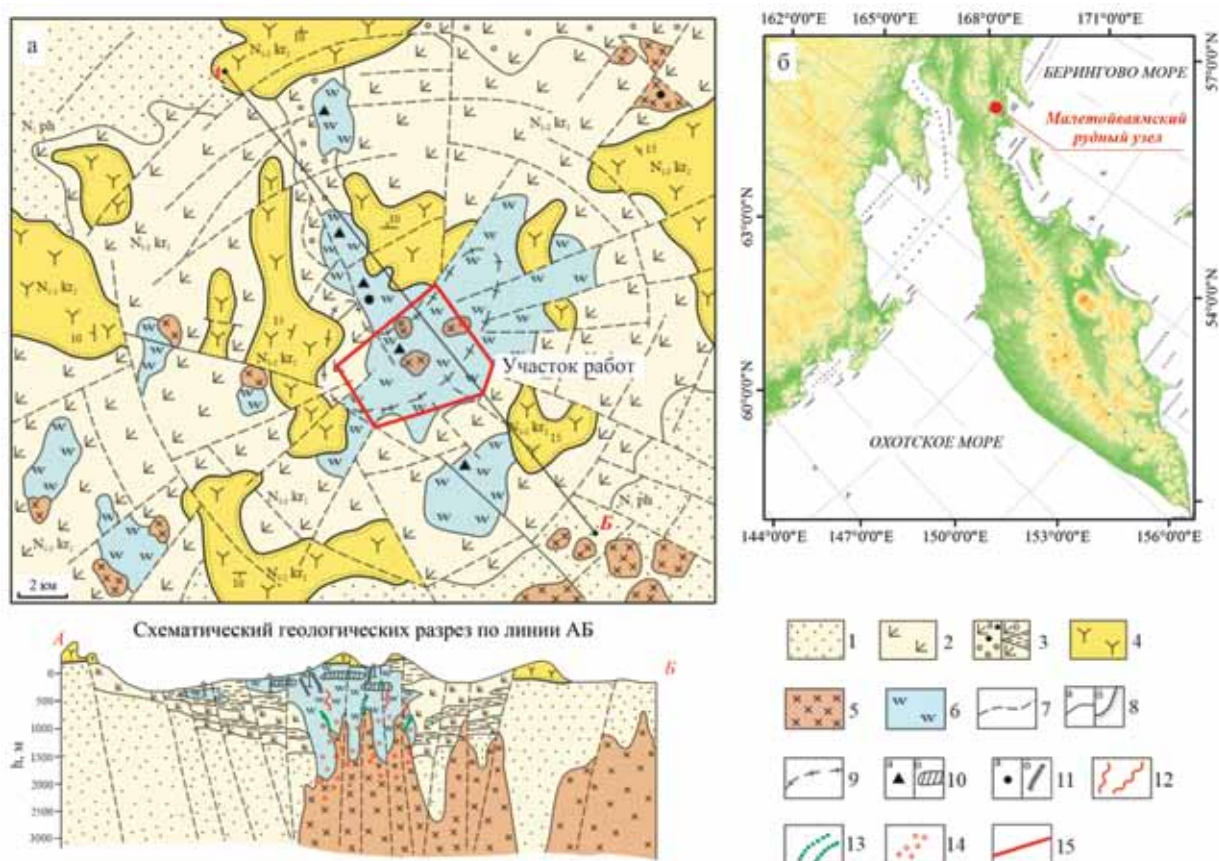
водятся комплексные поисково-разведочные работы (горно-буровые, геохимические, геофизические и др.). По результатам геолого-разведочных работ оценены запасы нескольких рудопоявлений золота HS-типа (Юбилейное, Гачинг, Северо-Западное), выявленных в рамках ГДП-200 в начале 2000-х гг. Эти рудопоявления явились основой выделения нового Малетойваямского золоторудного поля (МРП) на п-ове Камчатка.

Несмотря на значительный объем геолого-разведочных работ, проведенных в пределах МРП в разные годы, его изученность оказалась крайне неравномерной, что в значительной степени обусловлено плохой облаженностью территории. В целях геологического доизучения МРП в 2016–2017 гг. ООО «НПП ВИРГ-Рудгеофизика» проведены комплексные геофизические работы (электро-, магниторазведка, петрофизические исследования), результаты которых рассмотрены в настоящей статье.

## ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МАЛЕТОЙВАЯМСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО ПОЛЯ

МРП расположено в центральной части одноименного рудного узла Северо-Камчатского сероносного района (рис. 1, 2). В структурном плане оно находится в центральной части вулканотектонической структуры, представляющей собой крупный стратовулкан Корякско-Центрально-Камчатского неоген-четвертичного вулканоплутонического пояса, с расположенной в ее центре кальдерой обрушения (см. рис. 1). Субстрат стратовулкана сложен песчаниками, гравелитами, конгломератами с прослоями угленосных отложений, мергелей и известняков ранне-среднемиоценового возраста (Волчков, Звездов, 1997).

Собственно стратовулкан сложен раннемиоценовыми стратифицированными вулканогенно-осадочными образованиями (эффузивными, пирокла-



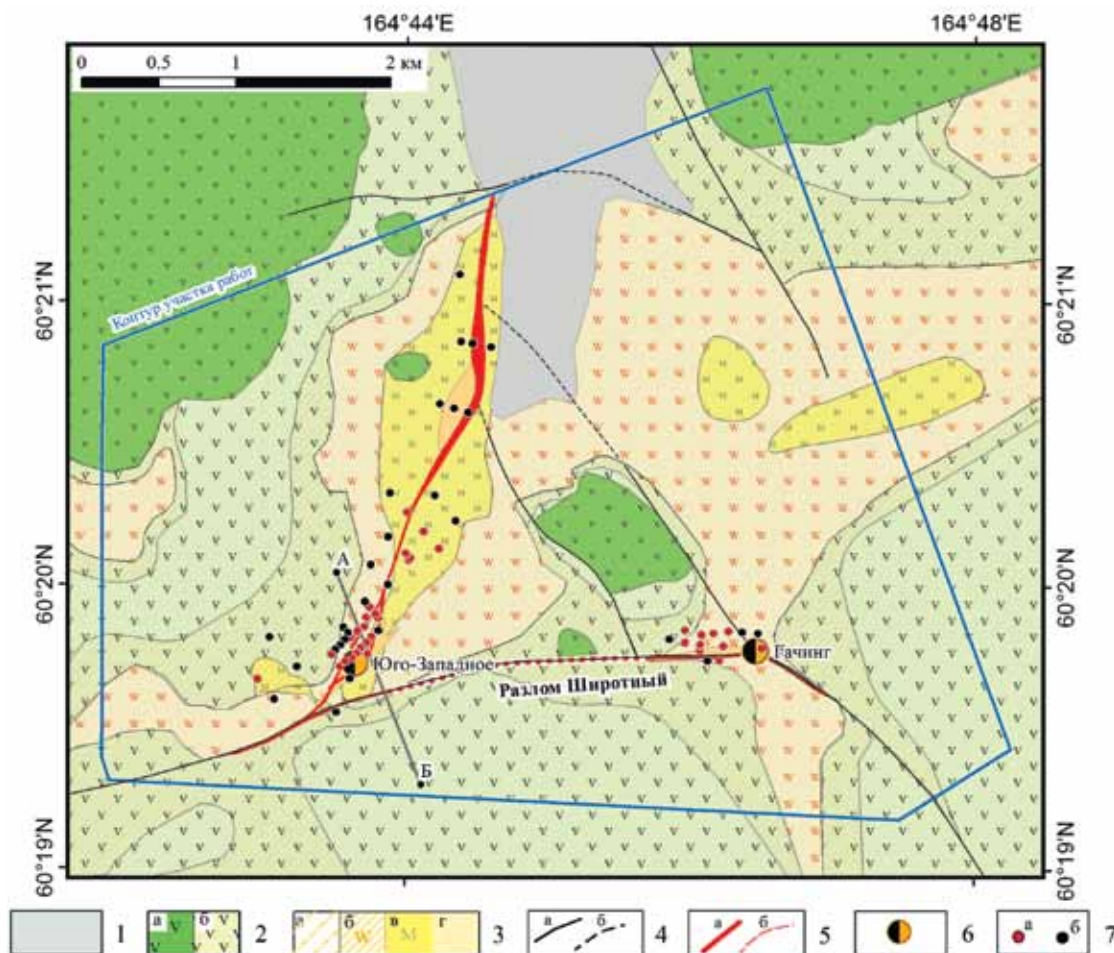
**Рис. 1.** Рудно-магматическая система Малетойваямского стратовулкана, по (Конов, Ляшенко, 1972; Волчкова, Звездова, 1997); а – геологическая карта и разрез, б – обзорная карта.

1 – пахачинская свита: песчаники, гравелиты, конгломераты с горизонтами известняков и углистыми прослоями; 2, 3 – нижняя толща корфовской свиты: 2 – лавы и преобладающие туфы андезитового состава, 3 – вулканомиктовые образования: на схеме (а), на разрезе (б); 4, 5 – верхняя толща корфовской свиты: 4 – лавы андезитового состава, 5 – суб-вулканические интрузивы диоритов и диоритовых порфиритов, комагматичные вулканитам нижней толщи корфовской свиты; 6 – гидротермально-метасоматически измененные породы (нерасчлененные); 7 – кольцевые и радиальные разломы; 8 – геологические границы согласного (а) и несогласного (б) залегания пород; 9 – граница аномалии силы тяжести, 10 – разломы; 11 – разломы; 12 – разломы; 13 – разломы; 14 – разломы; 15 – разломы.

превышающей 20 мГал; 10–14 – месторождения и рудопроявления: 10, 11 – установленные: 10 – самородной серы (а – на плане, б – в разрезе), 11 – медно-мышьяковые (энаргит-люцитонитовые с золотом и серебром (а – на плане, б – в разрезе). 12–14 – прогнозируемые (в разрезе): 12 – жильные золотосеребряные, 13 – жильные золотополисульфидные, 14 – золото-медно-порфировые; 15 – контур участка геофизических работ.

**Fig. 1.** Ore-magmatic system of the Maletovayam stratovolcano by (Konova, Lyashenko 1972; Volchkov, Zvezdov, 1997); а – geological map and geological cross-sections, б – location of the Maletovayam ore field.

1 – Pakhachinskaya formation: sandstones, gravelites, conglomerates with limestone horizons and carbonaceous interlayers; 2, 3 – lower strata of the Korfov formation: 2 – lavas and prevailing tufts of andesitic composition, 3 – volcanomict formations: on the scheme (а), on section (б); 4, 5 – upper strata of the Korfov formation: 4 – andesitic lavas, 5 – subvolcanic diorites and porphyry diorite intrusions; 6 – hydrothermally altered rocks (not divided); 7 – ring and radial faults; 8 – geological boundaries: concordant occurrence (а), discordant occurrence (б); 9 – the boundary of gravity anomaly more than 20 mGal; 10–14 – deposits and occurrences; 10, 11 – deposits: 10 – native sulfur: on the plan (а), on the cross-section (б), 11 – copper-arsenic (enargite-lucitonite with gold and silver: on the plan (а), on the cross-section (б); 12–14 – ore occurrences: 12 – gold-silver veins; 13 – gold-polysulfide gold veins; 14 – gold-copper-porphyry; 15 – the contour of geophysical work presented in this paper.



**Рис. 2.** Геологическая карта центральной части МРП, по (Коновы, Ляшенко, 1972; Корнеев и др., 2011).

1 – аллювиальные отложения; 2 – вулканогенно-осадочные образования: верхне- (а) и нижневетроваямской (б) подсвит; 3 – гидротермально-метасоматически измененные породы: а – пропилиты, б – вторичные кварциты, в – монокварциты, г – золотоносные монокварциты; 4 – разрывные нарушения: а – установленные, б – предполагаемые; 5 – стержневые золотоносные структуры: а – установленные, б – предполагаемые; 6 – рудопроявления золота HS-типа; 7 – поисково-разведочные скважины: а – с золотоносными интервалами, б – без них.

**Fig. 2.** Geological map of the central part of the Maletovayam ore field by (Konova, Lyashenko, 1972; Korneev et al., 2011).

1 – alluvial sediments; 2 – volcanic-sedimentary formations: the Upper Vetrovayam sub-formations (а) and the Lower Vetrovayam (б) sub-formations; 3 – hydrothermal-metasomatically altered rocks: а – propylites, б – secondary quartzites, в – monoquartzites, г – gold-bearing monoquartzites; 4 – faults: а – established, б – supposed; 5 – axial gold-bearing structures: а – established, б – supposed; 6 – HS-type gold occurrences; 7 – exploration wells: а – with gold-bearing intervals, б – without gold-bearing intervals.



стическими и туфогенно-осадочными породами преимущественно андезитового состава), в различной степени измененными гидротермально-метасоматическими процессами.

МРП включает три золоторудных объекта ранга мелкого месторождения золота HS-типа, выявленных в пределах рудопроявлений золота Юго-Западное, Гачинг и Юбилейное, несколько рудопроявлений люцит-энаргитовой и наложенной медно-мышьяковой сульфосолевой минерализации, а также рудопроявления меди (Tolstykh et al., 2018; Волчков, Звездов, 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: 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% и более).

В пределах МРП расположены массивы измененных пород (вторичных кварцитов) с хорошо выраженной горизонтальной и вертикальной зональностью (см. рис. 1, 2), типичной для месторождений HS-типа (от периферии к центру (рис. 3)): пропилиты, серицит-кварцевые, каолинит-кварцевые и алунит-кварцевые вторичные кварциты; монокварциты сливные и пористые.

Местонахождение, форма и размеры массивов вторичных кварцитов определяются тектоническими факторами. В центральной части МРП выделены два крупных линейно-вытянутых массива окварцованных пород и несколько дайкообразных тел золотоносных монокварцитов (см. рис. 2). Вытянутая форма массивов, а также приуроченность дайкообразных тел золотоносных монокварцитов к разрывным нарушениям позволили предположить наличие двух крупных рудоконтролирующих зон северного и широтного простирания – “стержневых золотоносных структур” МРП (использована аналогия с Au-Ag месторождением Лепанто (Филиппины) (Hedenquist et al., 1998), на котором одноименный региональный разлом является рудоконтролирующей и рудофокусирующей структурой). Пространственное положение предполагаемых “стержневых структур” предопределило размещение канав и буровых скважин (см. рис. 2).

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основой настоящей статьи являются материалы, полученные в ходе комплексных геофизических работ, выполненных в 2016–2017 гг. ООО “НПП ВИРГ-Рудгеофизика” в центральной части МРП и сопровождающие их петрофизические исследования.

## Геофизические работы

Комплекс геофизических методов включал в себя: 1) наземную магнитную съемку масштаба 1 : 5000; 2) электропрофилирование методами кажущегося сопротивления (ЭП–КС) и вызванной поляризации (ЭП–ВП); электротомографию методом ВП по серии профилей.

Наземная магнитная съемка масштаба 1 : 5000 проведена по сети  $50 \times 5$  м. Для измерения модуля вектора индукции магнитного поля при осуществлении рядовой съемки и в качестве вариационной станции использовались протонные магнитометры GMS-19T. Расчет значений приращения модуля вектора индукции аномального магнитного поля проводился по следующей формуле:

$$\Delta T_a = T_{\text{изм}} - \delta T_{\text{вар}} - T_{\text{норм}}, \quad (1)$$

где  $T_{\text{изм}}$  – измеренное значение магнитного поля;  $\delta T_{\text{вар}} = T_{\text{вар}} - T_{\text{ср.сут}}$  – поправка за вариации магнитного поля;  $T_{\text{ср.сут}}$  – среднесуточное значение магнитного поля;  $T_{\text{норм}}$  – нормальное магнитное поле Земли (использована модель IGRF).

Электропрофилирование методом кажущегося сопротивления (ЭП–КС) на переменном токе частотой 4.88 Гц проведено с установкой срединного градиента по сети  $50 \times 20$  м (длина питающей линии (AB) – 5.9 км, длина приемной линии (MN) – 40 м). Измерения выполнялись с помощью генератора ВП-1000 (мощностью 1 кВт), измерителей ERA-MAX и МЭРИ-24.

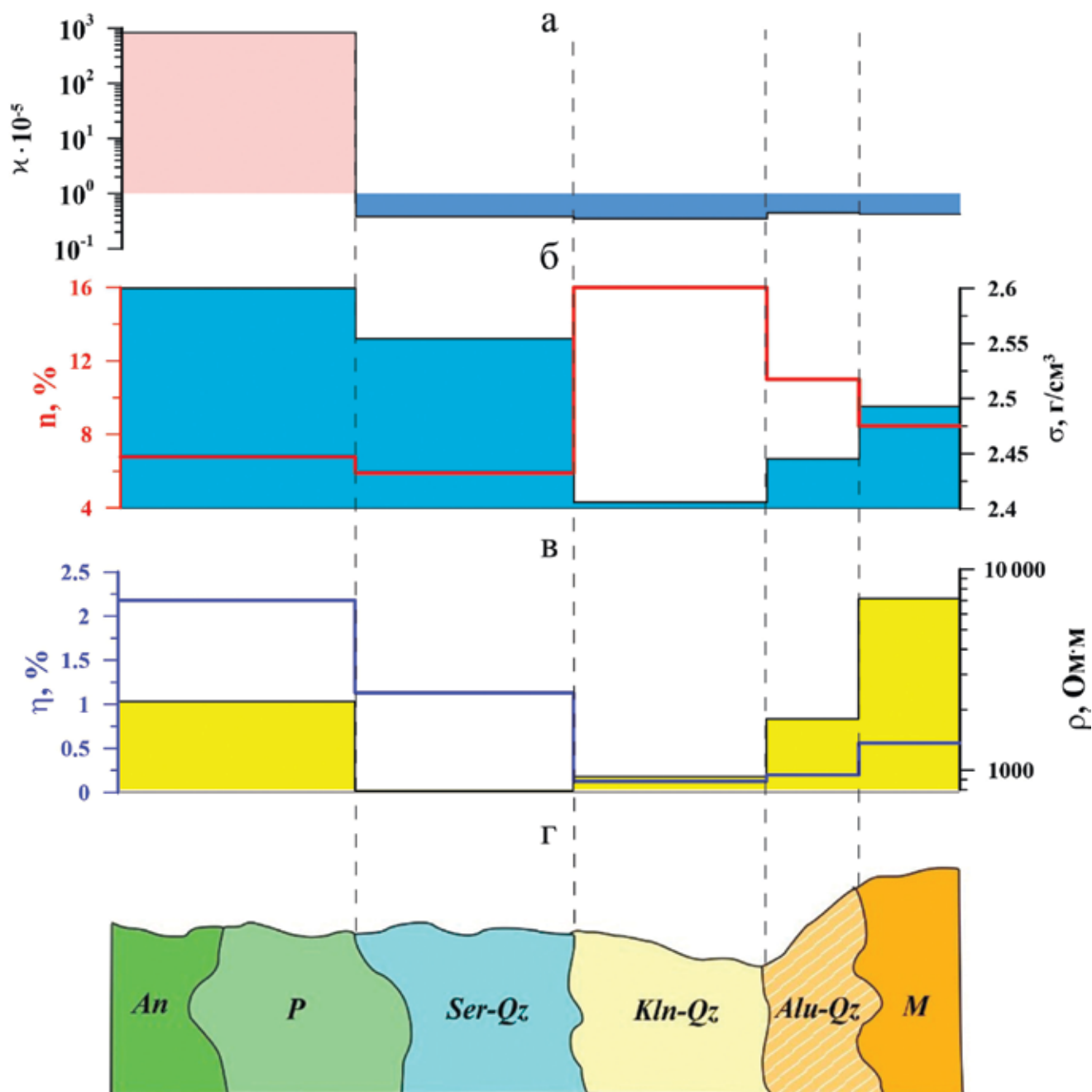
Электроразведка методом ВП проведена в площадном (электропрофилирование) и профильном (электротомография) вариантах. Работы выполнялись комплектом аппаратуры АИЭ-2 (генератор ВП-1000 (мощностью 1 кВт), измеритель ВП-МПП)). Измерения проведены во временной области. Длительность импульсов тока и пауз между ними составляла 1 с.

Электропрофилирование методом ВП масштаба 1 : 5000 проведено по сети  $50 \times 20$  м с установкой срединного градиента попланшетно (длина AB – 1–2 км, MN – 40 м).

Электротомография методом ВП выполнена по методике точечных электрических зондирования. Использована трехэлектродная электроразведочная установка со следующими параметрами: MN = 20 м; удаленный питающий электрод располагался в створе профиля на расстоянии не менее 700 м от его ближайшего конца; максимальное удаление MN от ближайшего токового электрода (в обе стороны) – 610 м; шаг перемещения подвижного токового электрода вдоль профиля – 100 м.

По результатам электроразведочных работ числялись кажущееся удельное электрическое сопротивление ( $\rho_k$ ) и кажущаяся поляризуемость ( $\eta_k$ ):

$$\rho_k = K \frac{U}{I}, \quad (2)$$



**Рис. 3.** Обобщенная схема метасоматической зональности массивов вторичных кварцитов Малетойваямского рудного узла и их петрофизическая характеристика.

Графики медианного значения петрофизических параметров для каждой группы пород МРП: а – магнитная восприимчивость ( $\chi$ ); б – плотность ( $\sigma$ ) и пористость ( $n$ ); в – поляризуемость ( $\eta$ ) и удельное электрическое сопротивление ( $\rho$ ); г – схема обобщенной метасоматической колонки МРП ( $M$  – монокварциты,  $Alu-Qz$  – алуниит-кварцевые вторичные кварциты,  $Kln-Qz$  – же каолинит-кварцевые кварциты;  $Ser-Qz$  – серицит-кварцевые метасоматиты,  $P$  – пропилиты,  $An$  – андезиты).

**Fig. 3.** Generalized scheme of metasomatic zoning of hydrothermally altered rocks areas of the central part of the Maletovayam ore field and their petrophysical characteristic.

Graphs of median values petrophysical parameters for rocks of the Maletovayam ore field: а – magnetic susceptibility ( $\chi$ ), б – density ( $\sigma$ ) and porosity ( $n$ ); в – polarizability ( $\eta$ ) and electrical resistivity ( $\rho$ ); г – generalized metasomatic column scheme of the Maletovayam gold field ( $M$  – monoquartzite,  $Alu-Qz$  – alunite-quartz and  $Kln-Qz$  – kaolinite-quartz quartzites,  $Ser-Qz$  – sericite-quartz metasomatites,  $P$  – propylite,  $An$  – andesite).

$$\eta_k = \frac{\sum_i \eta_i \Delta \ln(t_i)}{\sum_i \Delta \ln(t_i)} \quad (3)$$

где  $K$  – геометрический коэффициент электроразведочной установки;  $U$  – напряжение, измеренное в приемной линии (MN);  $I$  – сила тока в питающей линии (AB);  $\eta_i$  и  $t_i$  – поляризуемость и время, прошедшее после выключения импульса тока, в  $i$ -м временном окне;  $N$  – количество временных окон.

Обработка данных ЭТ–ВП проводилась в программе ZondRes2D v.5, которая позволяет восстанавливать разрезы распределения удельного электрического сопротивления (УЭС) и поляризуемости. Решение обратной задачи выполнялось в рамках гладкой 2D-модели с учетом двумерного рельефа местности.

### Петрофизические исследования

Комплексные геофизические работы сопровождались петрофизическими исследованиями. Изучение петрофизических свойств пород (плотности, пористости, удельного электрического сопротивления, поляризуемости, магнитной восприимчивости) проведено на коллекции из 108 образцов, отобранных из керна поисково-разведочных скважин, пройденных в разные годы. Коллекция включает в себя образцы пород из всех зон обобщенной метасоматической колонки массивов вторичных кварцитов МРП (см. рис. 3).

*Определение плотности и пористости образцов* проведено методом гидростатического взвешивания по стандартной методике. Для измерения массы образцов использованы весы 4-го класса точности ВЛКТ-500.

*Удельное электрическое сопротивление и поляризуемость образцов* определялись с помощью четырехэлектродной установки на полностью водонасыщенных (под вакуумом) образцах. Измерения проведены серийным измерителем АИЭ-2 и лабораторным генератором малых токов во временной области. Методика измерений и использованное оборудование детально описаны в работе (Gurin et al., 2013). Расчет поляризуемости и УЭС образцов выполнен по формулам (2), (3).

*Измерения магнитной восприимчивости* осуществлены портативным капнаметром КТ-10.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### Петрофизические исследования

В обобщенном виде результаты петрофизических исследований представлены на рис. 3.

По магнитным свойствам среди пород МРП выделяются два класса: магнитные (неизменные андезиты и их пропилитизированные разности) и немагнитные вторичные кварциты различного состава (от каолинит-кварцевых до монокварци-

тов). При этом разделить породы в пределах второй группы по магнитной восприимчивости невозможно. Таким образом, по данным магнитной съемки можно различать лишь измененные породы от неизменных.

По плотностным и электрическим свойствам породы МРП дифференцированы лучше. В первую очередь это связано с тем, что УЭС и плотность пород зависят от их пористости, которая сильно изменяется при переходе от неизменных андезитов к алунит-кварцевым или каолинит-кварцевым породам (см. рис. 3). По УЭС вторичные кварциты хорошо различаются (в частности, монокварциты отделяются от каолинит-кварцевых и серицит-кварцевых метасоматитов, а также андезитов и пропилитов).

По поляризуемости породы МРП дифференцированы хуже. Установлено уменьшение поляризуемости с возрастанием интенсивности изменения пород (для пород, не содержащих сульфиды). В то же время поляризуемость пород связана прямо пропорциональной зависимостью с объемным содержанием сульфидов, что позволяет уверенно выделять сульфидизированные разности как в пропилитах, так и во вторичных кварцитах. Таким образом, по данным электроразведки можно различать породы по составу – интенсивности изменения.

Обобщая результаты петрофизических исследований, по мере увеличения интенсивности изменения пород можно установить следующие зависимости:

- магнитная восприимчивость уменьшается ввиду разрушения акцессорного магнетита и темноцветных минералов;

- УЭС может как увеличиваться при процессах окварцевания, так и уменьшаться при повышении доли глинистых минералов в породах и/или увеличении их пористости;

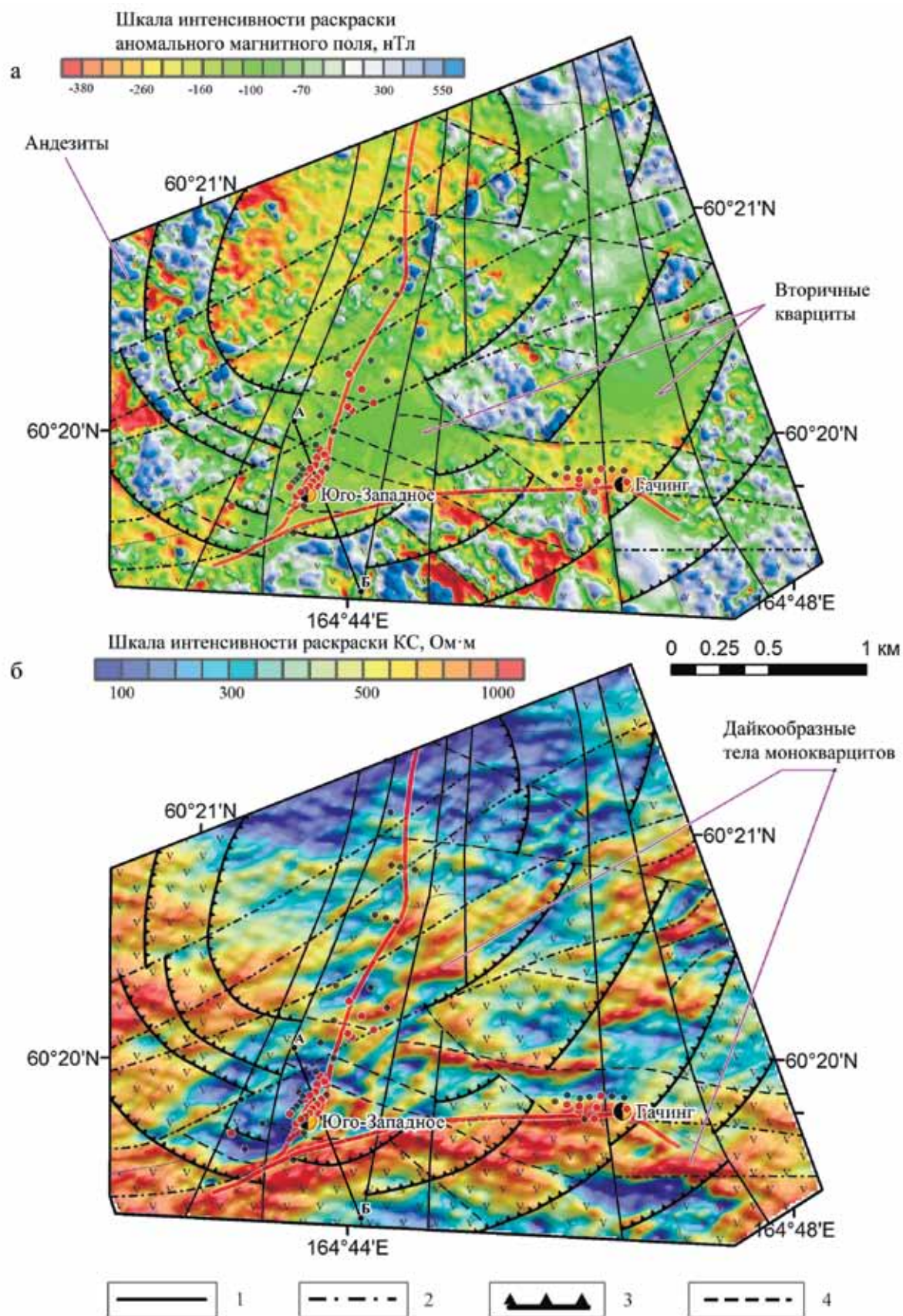
- поляризуемость пород без сульфидов (“фоновые значения”) уменьшается, а пород с сульфидами – возрастает по мере увеличения их объемного содержания;

- плотность пород снижается за счет повышения пористости пород и замещения меланократовых минералов (возрастания доли кремнезема).

Установленные связи петрофизических параметров с вещественным составом пород хорошо соответствуют ранее опубликованным данным (Allis, 1990; Irvine, Smith, 1990; Locke et al., 2007). Результаты петрофизических исследований явились основой для геологической интерпретации геофизических материалов, рассмотренных в последующих подразделах.

### Наземная магнитная съемка

На рис. 4а представлена карта аномального магнитного поля ( $\Delta T_a$ ) центральной части МРП. В магнитном поле дугообразными аномалиями выделяется фрагмент кольцевой структуры, разбитой си-



**Рис. 4.** Карты аномального магнитного поля (а) и кажущегося сопротивления (по данным ЭП-КС) (б) центральной части МПП с элементами интерпретации.



Здесь и на рис. 5 линия АБ – профиль ЭТ–ВП (результаты см. на рис. 6). Разрывные нарушения: 1 – северной ориентировки, 2 – субширотной, 3 – кольцевые, 4 – второстепенные.

**Fig. 4.** Anomalous magnetic field map (a) and apparent electrical resistivity map (б) of the central part of the Maletoyvayam ore field with elements of interpretation.

Here and in Fig. 5 AB line – electrical induced polarization tomography profile (see results on the Fig. 6). The faults: 1 – north orientation, 2 – sublatitudinal, 3 – ring, 4 – secondary.

стемами разнонаправленных разрывных нарушений (северной, субширотной и северо-западной ориентировки), большая часть которых не отражена на геологической карте (рис. 5). Выделенная кольцевая структура и периклинальное залегание пород (установленное по геологическим данным) указывают на приуроченность центральной части МРП к жерловой части Малетойвямского палеовулкана, что хорошо согласуется с имеющимися геологическими представлениями (см. рис. 1).

Интенсивно измененные породы (вторичные кварциты, аргиллизиты и др.) обычно слабомагнитны или немагнитны (см. рис. 3). По этой причине массивы вторичных кварцитов среди вулканогенно-осадочных образований ветроваямской свиты в магнитном поле отражаются отрицательными аномалиями интенсивностью до 300 нТл. Другой особенностью аномалий магнитного поля, обусловленных массивами измененных пород, является их наложенный характер. Обычно они разрушают и размывают “структуру” магнитного поля (см. рис. 4а). По совокупности отмеченных признаков вулканогенно-осадочные образования ветроваямской свиты в пределах МРП разделены на измененные и неизменные (см. рис. 5). Более детальное расчленение пород по составу на основе данных магнитной съемки провести не получается, так как они слабомагнитны (см. рис. 3).

### Электропрофилирование методом КС

На рис. 4б представлена карта кажущегося сопротивления центральной части МРП (по данным ЭП–КС масштаба 1 : 10 000). По электрическим свойствам породы в пределах МРП хорошо дифференцированы (см. рис. 3). Вулканогенно-осадочные образования ветроваямской свиты с преобладанием покровов лав выделяются областями повышенных значений КС (в южной и северо-западных частях участка работ), а с преобладанием туфов – пониженных (в северной и центральной частях участка). Несмотря на это, разделять вулканиды по составу на основе данных ЭП–КС сложно, так как они в различной степени изменены гидротермально-метасоматическими процессами (интенсивность изменения пород влияет на их УЭС (см. рис. 3)). Только совместное использование данных магниторазведки (выделение областей измененных пород) и ЭП–КС дало возможность разделить измененные породы по со-

ставу – уточнить строение и элементы метасоматической зональности массивов вторичных кварцитов МРП (см. рис. 5). Среди интенсивно измененных немагнитных пород выделены две разности вторичных кварцитов (см. рис. 3): глинистые (монтмориллонитовые, алунитовые и др.) и окварцованные (монокварциты, окварцованные вторичные кварциты различного состава).

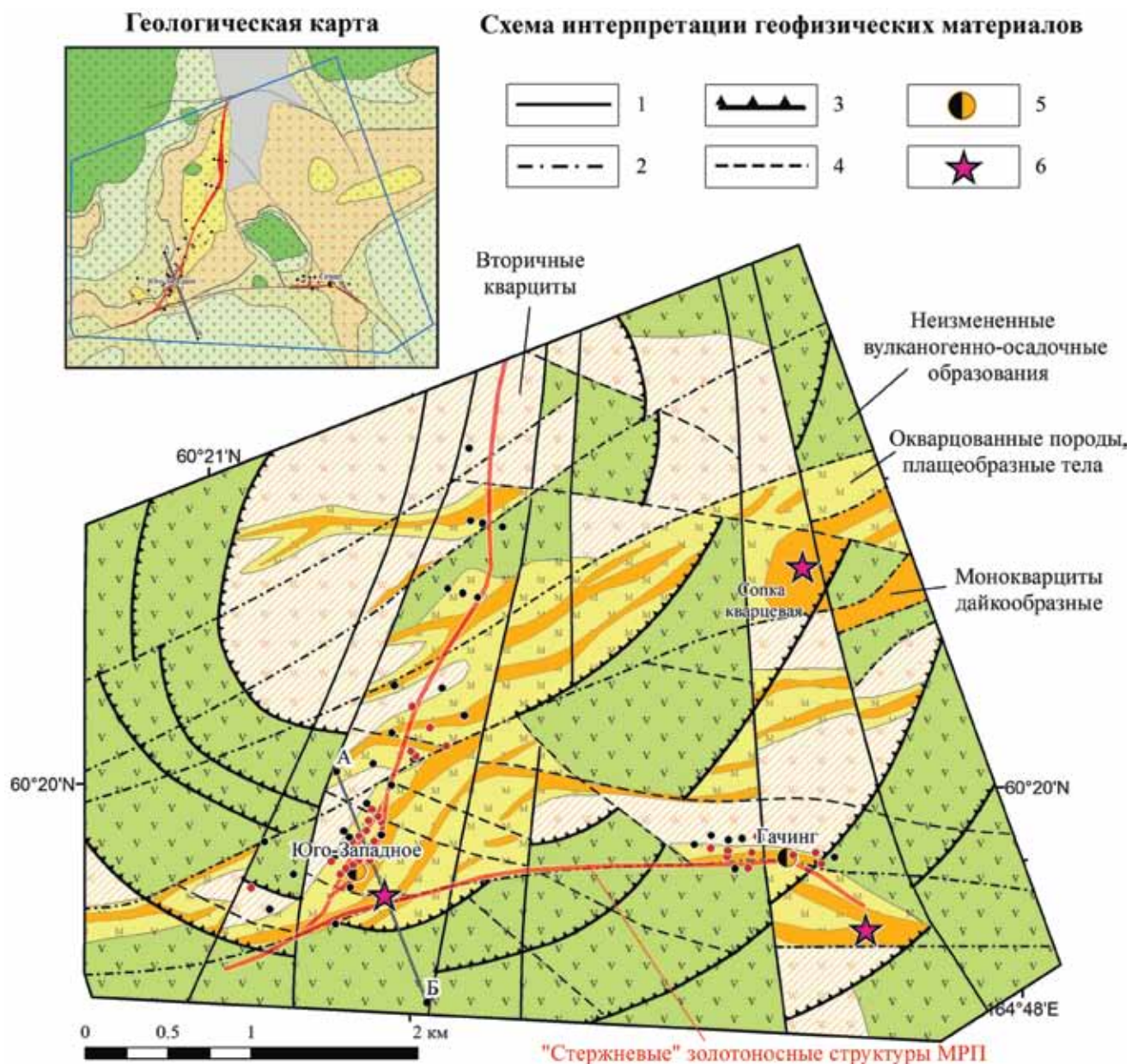
Глинистые разности вторичных кварцитов отражаются аномалиями пониженных значений кажущегося сопротивления (50–100 Ом·м), а окварцованные разности – повышенных (более 300 Ом·м). По морфологии образующих аномалии тел окварцованные вторичные кварциты подразделены на два типа (см. рис. 5): “площадные”, или пластообразные (объемное окварцевание пород), и крутопадающие дайкообразные тела – залеченные разрывные нарушения и трещины – подводящие каналы.

Тела окварцованных пород “площадного” типа по геофизическим данным выделены в центральной и юго-западных частях МРП. Они объединены в единую зону окварцевания шириной около 500–600 м, вытягивающуюся в субширотном направлении через весь участок работ на расстояние более 5 км.

Выделенные по данным электроразведки дайкообразные тела монокварцитов расположены преимущественно в центральной части участка работ (см. рис. 5). Они образуют подобие “жилиной” зоны субширотной ориентировки, в которую можно объединить до 80% от общего количества выделенных тел.

Таким образом, по данным ЭП–КС выдержанных рудоконтролирующих структур и массива окварцованных пород северного простирания, предполагаемых по геологическим наблюдениям (см. рис. 2, 5), не установлено. Вместо этого выделена зона окварцевания субширотного направления, включающая серию субпараллельных дайкообразных тел, большая часть которых не отражена на геологической карте, что обусловлено плохой обнаженностью МРП.

Практически все разрывные нарушения, выделенные по данным магниторазведки (см. рис. 4а), отражаются и по данным ЭП–КС (см. рис. 4б). Разломы, залеченные телами монокварцитов, выделяются линейно вытянутыми аномалиями высоких значений кажущегося сопротивления (>400 Ом·м), а в остальных случаях – пониженных значений (<100 Ом·м).



**Рис. 5.** Геологическое строение центральной части МРП по геофизическим данным.

Разрывные нарушения: 1–4 – см. рис. 4; 5 – мелкие месторождения золота; 6 – центры областей разгрузки гидротерм.

**Fig. 5.** Geological structure scheme of the central part of the Maletoyvayam ore field based on the geophysical data.

1–4 – see Fig. 4; 5 – small gold deposits; 6 – centers of hydrotherm unloading.

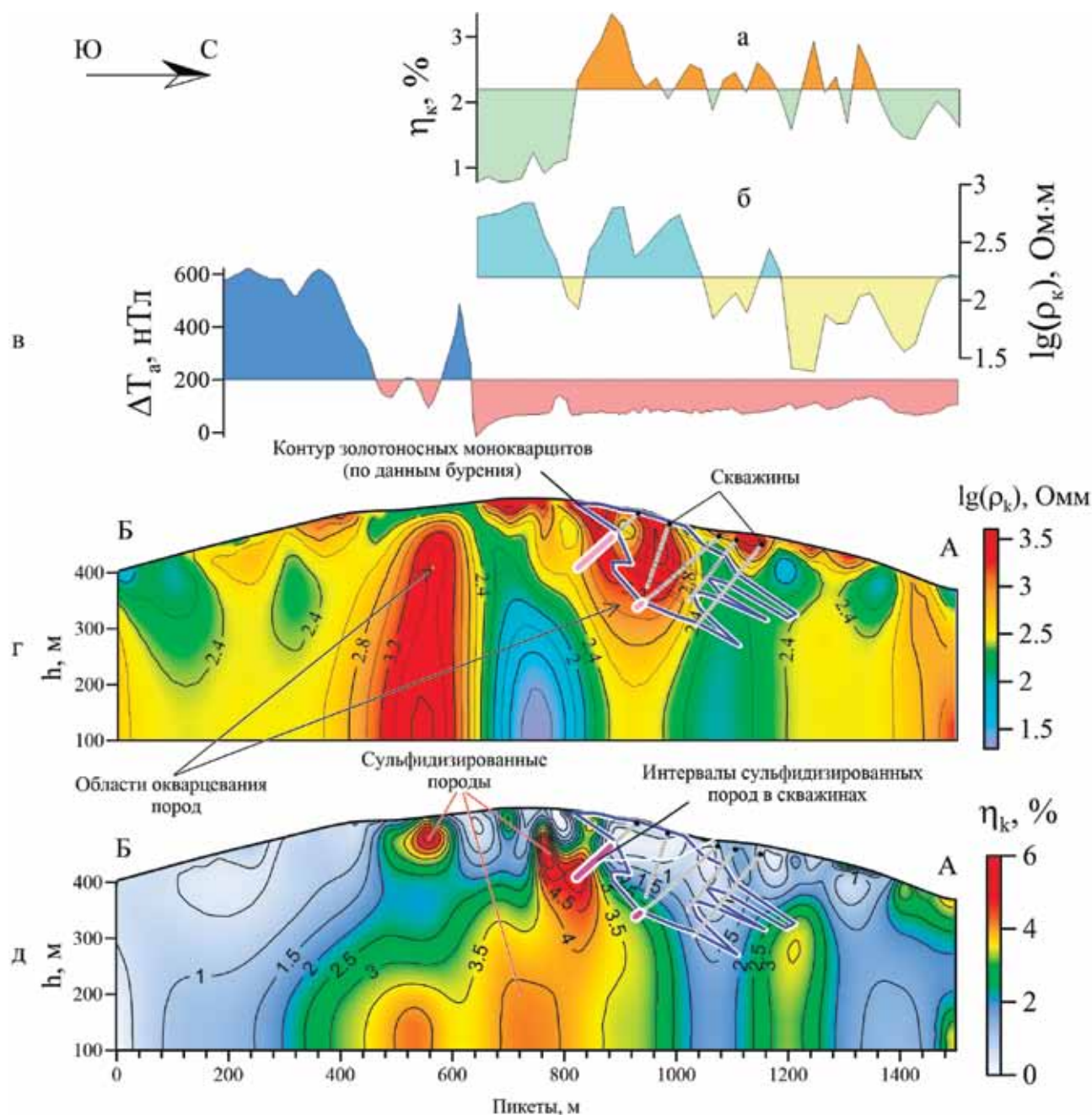
### Электроразведка методом ВП

На рис. 6 представлены результаты геофизических работ вдоль опорного профиля АБ, пересекающего золоторудные тела и рудоконтролирующую структуру рудопоявления золота Юго-Западное – объекта-эталона МРП.

На рис. 6а, б изображены графики кажущегося сопротивления и кажущейся поляризуемости по данным ЭП–ВП вдоль опорного профиля АБ. По

данным ЭП–ВП интенсивными аномалиями повышенных значений кажущегося сопротивления (см. рис. 6б) выделяются тела монокварцитов и окварцованных пород, а аномалиями повышенной кажущейся поляризуемости (см. рис. 6а) – минерализованные тела монокварцитов.

На рис. 6г, д представлены геоэлектрические разрезы кажущегося сопротивления и поляризуемости, построенные по данным ЭТ–ВП, отражающие основные особенности строения золотонос-



**Рис. 6.** Результаты геофизических работ по профилю АБ (рудопоявление золота Юго-Западное).

Графики кажущейся поляризуемости (а), кажущегося сопротивления (по данным ЭП–ВП) (б), аномального магнитного поля (в); геоэлектрические разрезы распределения (г) удельного электрического сопротивления, поляризуемости (д) (по данным ЭТ–ВП). Пространственное положение профиля АБ представлено на рис. 4, 5, 7.

**Fig. 6.** Geophysical data on the AB profile (the North-West gold occurrence).

Graphs of apparent polarizability (a) and apparent electrical resistivity (б), anomalous magnetic field (в); cross-sections of electrical resistivity (г) and polarizability (д). AB profile see on Fig. 4, 5, 7.

ных зон МРП. По этой причине их можно рассматривать в качестве опорных разрезов. На разрезах УЭС (см. рис. 6г) областями высоких и повышенных значений в центральной части профиля выделяются

тела монокварцитов и окварцованных пород, а в южной части – неизменные андезиты, над которыми установлена интенсивная аномалия магнитного поля (см. рис. 6в).



Глинистые разности вторичных кварцитов на геоэлектрических разрезах (см. рис. 6г, д) выделяются как отдельные слои и линзы пониженного УЭС и поляризуемости, а сульфидизированные породы – повышенными и высокими значениями поляризуемости (более 3%). Часть золоторудных тел МРП приурочена к монокварцитам, которые хорошо выделяются по данным электроразведки. Однако собственно золоторудные тела на геоэлектрических разрезах не отражаются.

Сульфидизированные породы в пределах МРП формируют тела трех типов: субгоризонтальные линзообразные (располагаются в подошвенной части массивов окварцованных пород); субвертикальные линзообразные, или дайкообразные (приурочены к минерализованным зонам дробления и сульфидизированным монокварцитам); объемно сульфидизированных пород (часто не ограничены по глубине). Следует учитывать, что сульфиды в пределах МРП отлагались в пред-, пост- и синрудные этапы. Последнее существенно затрудняет геологическую интерпретацию данных электроразведки методом ВП.

Геологическая природа выделенных по данным ЭТ–ВП аномалий подтверждена бурением (см. рис. 6г): интервалы повышенной сульфидизации пород попадают в области с повышенной и высокой поляризуемостью, а окварцованные породы и монокварциты – в области с повышенным и высоким УЭС (см. рис. 6г).

В пределах эталонных объектов (рудопоявлений золота Гачинг, Юго-Западное) и участков предполагаемого продолжения золотоносных структур МРП в целях их детального изучения проведены электроразведочные работы методом ВП (рис 7, 8): ЭП–ВП масштаба 1 : 5000 и ЭТ–ВП по серии профилей.

По данным ЭП–ВП, большинство выявленных сульфидизированных тел монокварцитов имеет преимущественно северо-восточное простирание, реже – субширотное (см. рис. 4, 7). Избирательная сульфидизация тел монокварцитов, вероятно, обусловлена их приуроченностью к неоднократно подновляемым “долгоживущим” структурам (разломам), в пределах которых располагаются промышленные золотоносные тела (см. рис. 7а, г).

Объемно сульфидизированные породы располагаются на периферии массивов окварцованных пород. Для центральной части МРП установлена зональность, типичная для медно-порфировых месторождений (Sillitoe, 2010): в центре кварцевое “ядро”, на периферии – сульфидизированные породы и глинистые разности вторичных кварцитов. Последнее может косвенным образом подтверждать наличие медно-порфировой системы на глубине (см. рис. 1), предсказываемой в работе (Волчков, Звездов, 1997).

## ОБСУЖДЕНИЕ

Несмотря на значительный объем геолого-разведочных работ, проведенных в пределах МРП, его геологическое строение (структура, метасоматическая зональность и др.) все еще изучено плохо, что в значительной степени обусловлено низкой облаженностью территории. Именно слабая геологическая изученность центральной части МРП стала причиной того, что часть поисково-разведочных скважин и канав были пройдены за пределами или на флангах потенциально золотоносных зон и тел. Последнее существенно снизило эффективность геолого-разведочных работ, оценки запасов золота для центральной части МРП и привело к остановке поисково-оценочных работ (в настоящий момент геолого-разведочные работы полностью прекращены).

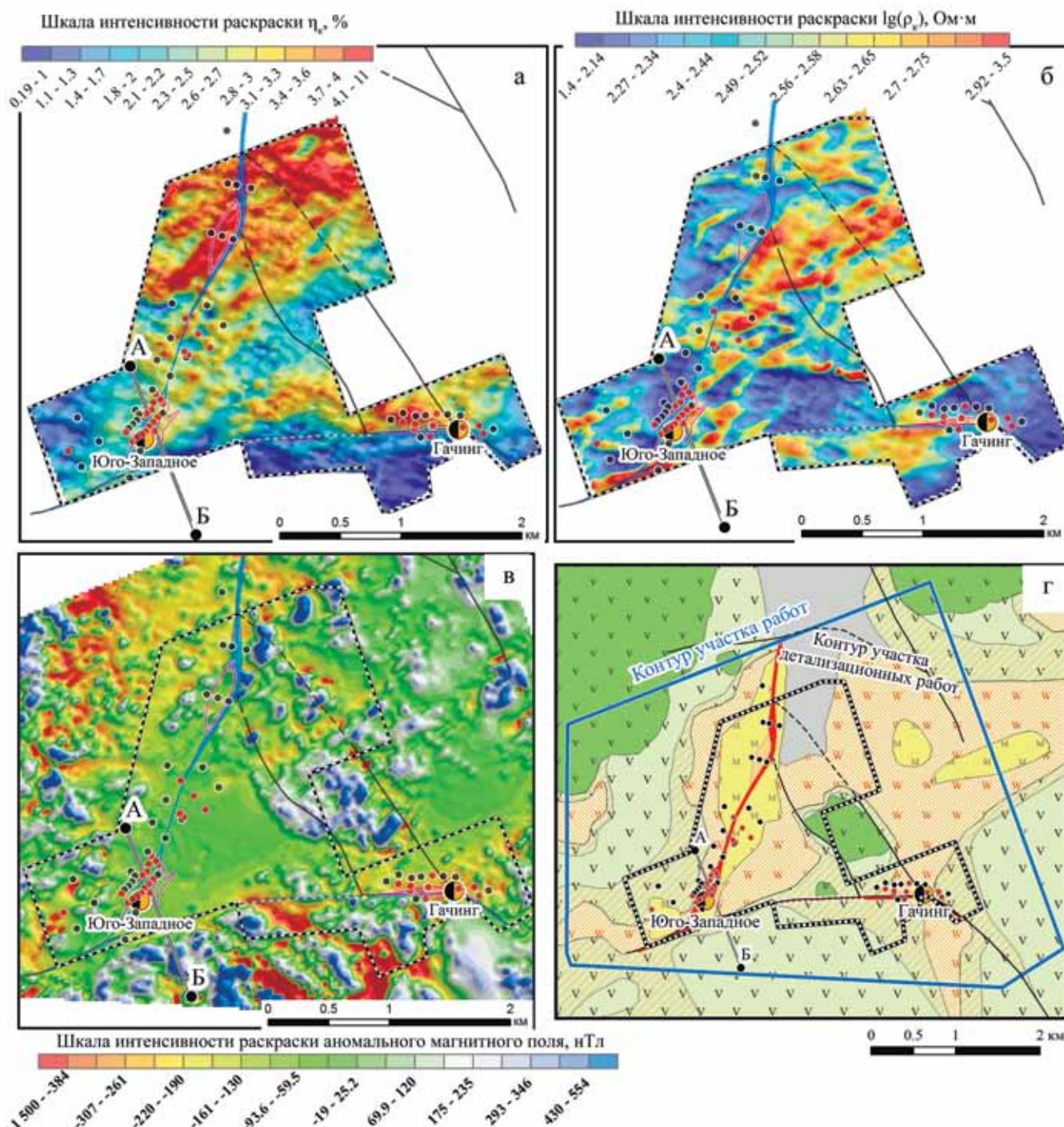
Для уточнения глубинного строения центральной части МРП выполнена 3D-инверсия аномального магнитного поля (использована программа MAG3D, [www.mirageosience.com](http://www.mirageosience.com)) – восстановлена 3D-модель распределения магнитной восприимчивости ( $\chi$ ) в нижнем полупространстве до глубин 2.5 км (далее просто магнитная 3D-модель). Полученная магнитная 3D-модель с вырезанными блоками разного размера представлена на рис. 8.

Нижняя часть магнитной 3D-модели – “фундамент Малетойваямского стратовулкана” – характеризуется областями пониженных значений  $\chi$  ( $10^{-5}$ – $10^{-6}$  (СИ)), что объясняется терригенно-карбонатным составом пород (пахачской и корфовской свит), подстилающих вулканогенно-осадочные образования. Предполагаемой “интрузии под вулканом” (Волчков, Звездов, 1997) в центральной части МРП по данным магнитной съемки не установлено (штоки гранодиоритового состава выделены в 5–7 км северо-восточнее участка работ).

В верхней части магнитной 3D-модели повышенными и высокими значениями  $\chi$  ( $10^{-2}$ – $10^{-3}$  (СИ)) выделяются магнитные (неизменные) разности вулканогенно-осадочных образований ветроваямской свиты, а пониженными (до  $10^{-4}$ – $10^{-6}$  (СИ)) – немагнитные интенсивно измененные породы (вторичные кварциты). Кроме того, в магнитной 3D-модели достаточно четко проявлена субгоризонтальная граница (наклон около 20–30° на северо-восток) между породами фундамента и вулканогенно-осадочными отложениями. Установлено увеличение мощности вулканитов с запада на восток от 400–500 до 1000 м.

На эпitherмальных Au-Ag месторождениях HS-типа (например, Лепанто (Филиппины) (Hedenquist et al., 1998), Янакоча (Перу) (Teal, Benavides, 2010)) золотоносные тела располагаются в пределах “центров интенсивной разгрузки” палеогидротерм, которым отвечают крупные массивы монокварцитов (см. рис. 5). В пределах МРП золотоносные те-





**Рис. 7.** Результаты площадных геофизических работ в пределах рудопоявления золота Северо-Западное.

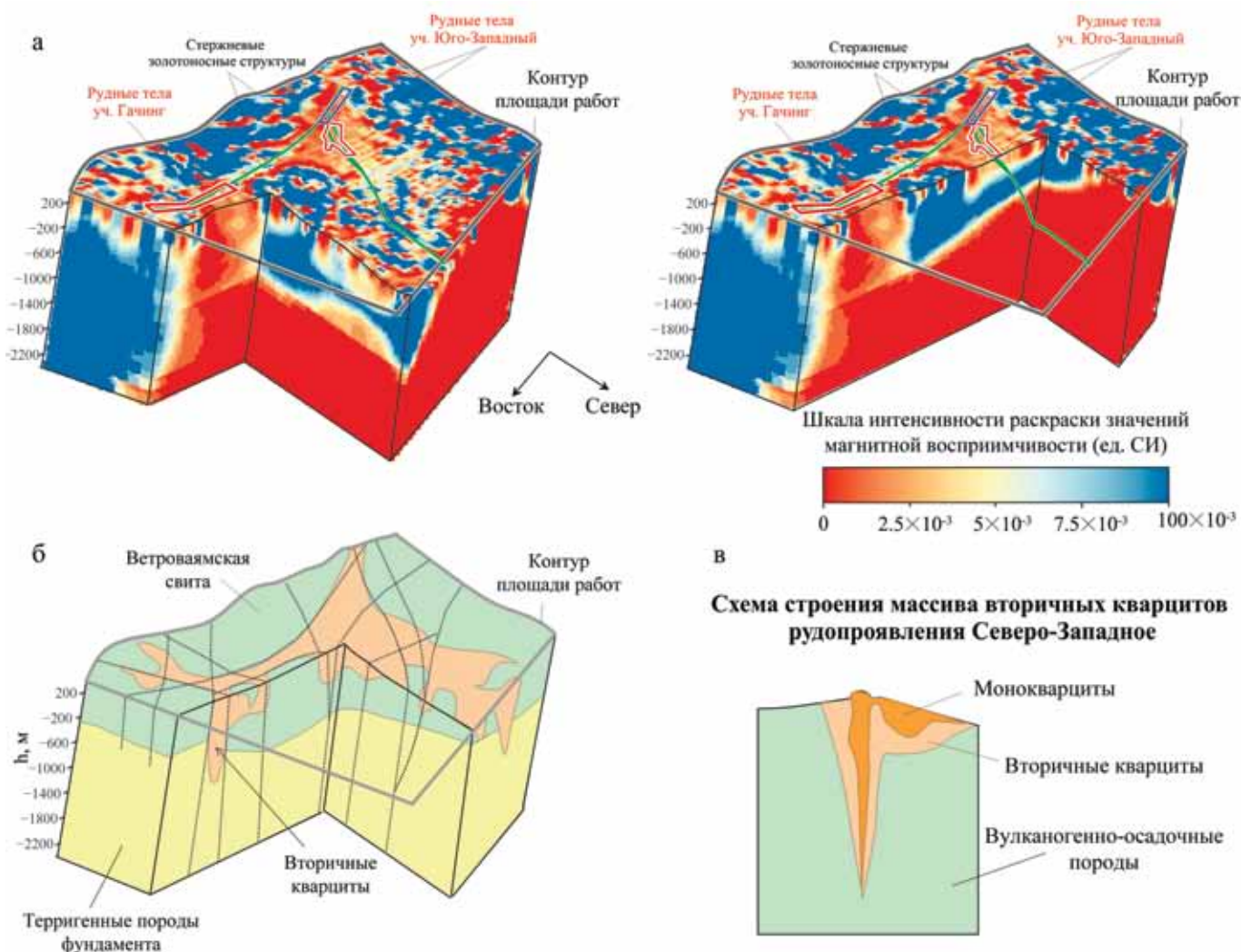
Карты кажущейся поляризуемости (а), кажущегося сопротивления (б) (по данным ЭП-ВП), аномального магнитного поля (в); геологическая карта (г). Условные обозначения – см. рис. 2, 5.

**Fig. 7.** The results of the geophysical survey on the North-West gold occurrence.

The maps of induced-polarization profiling data (a), apparent electric resistance (б), anomalous magnetic field (в), simplified geologic map based on geophysical data (г). Other symbols show in the legend Fig. 2, 5.

ла рудопоявлений Гачинг и Юго-Западное также расположены в пределах крупных массивов монокварцитов. По имеющимся геолого-геофизическим

данным, еще один “центр интенсивной разгрузки” палеогидротерм установлен в восточной части участка работ (сопка Кварцевая (см. рис. 5)). Геоло-



**Рис. 8.** 3D-модели ж (а) и построенная на их основе схематическая геологическая 3D-модель центральной части МРП (б).

**Fig. 8.** 3D models ж (a) and schematic 3D geological model (б) of the central part of the Maletovayam ore field (based on 3D model ж).

гическая изученность этого участка МРП низкая. По геофизическим данным, выделенные тела монокварцитов имеют дайко- и штокообразную форму (вероятно, измененный штот гранодиоритов) со слабо развитым ореолом окварцованных пород. Отмеченная особенность указывает на значительное экранирование палеогидротерм трещинами, вмещающими тела монокварцитов, а также на низкую проницаемость вмещающих пород (преобладание лав в разрезе). Несмотря на это, в пределах участка сопка Кварцевая высока вероятность выявления промышленного золотого оруденения HS-типа.

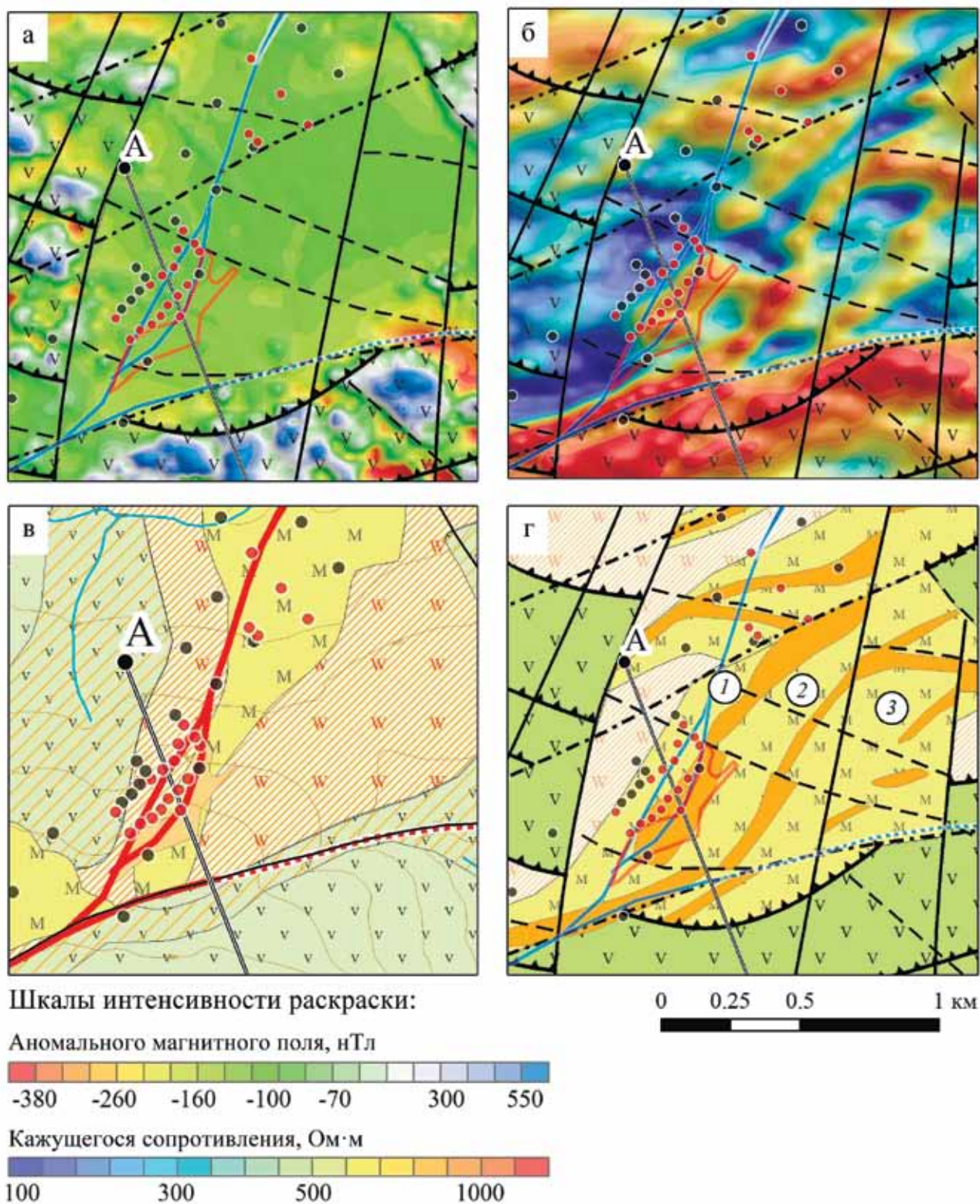
В пределах рудопоявления золота Юго-Западное массив вторичных кварцитов (область пониженных значений ж), по данным магниторазведки, подстилается неизменными вулканогенно-осадочными образованиями ветровянской сви-

ты (ограничен на глубину), что позволяет оценить особенности его строения (см. рис. 8в): субпластовая форма, субгоризонтальное положение (языкообразная форма), средняя мощность измененных пород 300 м.

Отмеченные особенности строения массива вторичных кварцитов рудопоявления Юго-Западное позволяют полагать, что изменения пород шли преимущественно по слоям более проницаемых туфов, подстилаемых и перекрытых покровами андезитов, выступавших в роли флюидоупора. Таким образом, четко проявлен ведущий контроль литологического (физико-механического) фактора при формировании массивов вторичных кварцитов в пределах МРП.

В северном направлении мощность массива измененных пород уменьшается, а количество "ксе-





**Рис. 9.** Результаты детализационных геофизических работ в центральной части МРП.

Карты аномального магнитного поля (а), кажущегося сопротивления (б), геологическая карта (в), схема интерпретации геофизических материалов (г). Условные обозначения – см. рис. 2, 5.

**Fig. 9.** Geophysical data on the central part of the Maletoyvayam gold field.

The maps of anomalous magnetic field (a), apparent electrical resistivity (б), geological map (в) and diagram of interpretation of geophysical materials (г). Other symbols are see in the legend of Fig. 2, 5.

нолитов” – блоков слабоизмененных андезитов – увеличивается (см. рис. 8а). При этом происходит смена типа изменения пород с “массивного” на “рассеянный”, когда изменения сосредоточены вдоль разрывных нарушений. Последнее указывает на то, что разгрузка палеогидротерм шла с юга на север от разлома Широкий, который являлся одним из основных “подводящих каналов” МРП (см. рис. 5). Косвенным образом это предположение подтверждается тем, что разлом Широкий на протяжении 5 км (протягивается вдоль всей площади участка работ) вмещает мощные дайкообразные тела монокварцитов (см. рис. 5).

Таким образом, тектонический фактор также играет важную роль в формировании и размещении массивов вторичных кварцитов в пределах МРП.

Обобщая полученные геофизические материалы, можно утверждать, что массивы окварцованных пород в пределах золотоносных структур центральной части МРП имеют грибообразную форму (несколько подводящих каналов – дайкообразных тел монокварцитов (см. рис. 6, 8)), что подтверждает ведущую роль литологического фактора (экранирование гидротермальных растворов) при их формировании.

По данным электроразведки в пределах рассматриваемого массива вторичных кварцитов рудопроявления золота Юго-Западное выделены три кулисно расположенных тела дайкообразных монокварцитов северо-восточной ориентировки (рис. 9б, г) вместо одного, отмеченного на геологической карте (см. рис. 9в). Схематичность геологической карты в значительной степени обусловлена плохой обнаженностью рудопроявления. Все три тела дайкообразных монокварцитов располагаются в пределах одной золотоносной структуры, в северной части которой установлены промышленные золоторудные тела.

Северная часть первого тела монокварцитов (нумерация с запада на восток (см. рис. 9г)) совпадает с главным золоторудным телом рудопроявления Юго-Западное, прослеженным скважинами и канавами в северо-восточном направлении на 500 м (см. рис. 9в). По данным электропрофилирования, тело золотоносных монокварцитов протягивается еще на 700 м в северо-восточном направлении с небольшим смещением в плане (около 100 м на запад) и разворотом на восток, а затем обрывается разломом восток-северо-восточного направления (см. рис. 9в, г).

Таким образом, геофизические работы показали, что главной причиной, по которой золотоносные монокварциты не прослежены по простиранию на основе геолого-разведочных работ, является неверное расположение поисково-разведочных скважин, заданных в целях изучения предполагаемой “стержневой золотоносной структуры” МРП северного простирания.

Второе и третье тела монокварцитов не отражены на геологической карте и ранее не изучались. Выделенные тела и контролирующие их структуры прослежены по геофизическим данным в северо-восточном направлении на 1.0–1.5 км (см. рис. 5, 9г). Они располагаются субпараллельно основному золотоносному телу монокварцитов рудопроявления Северо-Западное. По геолого-структурной обстановке можно полагать, что выделенные тела монокварцитов также окажутся золотоносными.

Таким образом, на основе данных ЭП–КС показано, что рудопроявление Северо-Западное, несмотря на поисково-разведочные работы, остается слабоизученным. Доизучение выделенных тел монокварцитов может существенно изменить прогнозы в сторону увеличения запасов золота в пределах рассмотренного участка площади МРП.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эпитермальные месторождения золота HS-типа являются контрастными по петрофизическим свойствам объектами, хорошо отражающимися в геофизических полях. Рассмотренный пример применения электро- и магниторазведки для поиска месторождений золота HS-типа в пределах массивов вторичных кварцитов МРП показывает высокую геологическую эффективность геофизических методов. По геофизическим данным уточнено геологическое строение центральной части МРП, расположенных в ее пределах массивов вторичных кварцитов и золотоносных структур, определены элементы метасоматической зональности МРП, выделены потенциально перспективные на выявление золоторудной минерализации участки. Результаты показывают, что проведение поисковых геофизических работ при поисках эпитермальных месторождений золота HS-типа в пределах плохо обнаженных массивов вторичных кварцитов позволяют не только уточнять их геологическое строение, но и вести целенаправленные поиски.

## Благодарности

Автор выражает благодарность геологам ООО “Кам-Медь” за предоставленную геологическую информацию, коллегам, участвовавшим в полевых работах и обсуждениях их результатов, а также редактору Д.Ю. Де-межко и рецензенту за высказанные замечания и рекомендации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Волков А.В., Савва Н.Е., Сидоров А.А., Колова Е.Е., Чижова И.А., Алексеев В.Ю. (2015) Эпитермальное золотосеребряное месторождение Атаган и перспективы выявления минерализации высокосульфидированного типа на Северо-Востоке России. *Геология рудн. месторождений*, 57(1), 25-47.



- Волчков А.Г., Звездов В.С. (1997) Природа проявлений медно-мышьяковой минерализации Малетойваямского стратовулкана. *Руды и металлы*, **5**, 44-52.
- Корнеев А.В., Воскресенский К.И., Амелин С.А. (2011) Информационный отчет о результатах поисково-оценочных работ в пределах Малетойваямской площади в 2007-2010 гг., 127 с. г. Петропавловск-Камчатский, Геолфонд.
- Ляшенко Л.Л., Михайлова Г.Н. (1972) Отчет о результатах поисково-разведочных работ в пределах Малетойваямского сернорудного узла. 151 с. г. Петропавловск-Камчатский, Геолфонд.
- Петренко И.Д. (1999) Золотосеребряные формации Камчатки. СПб.: ВСЕГЕИ, 115 с.
- Яроцкий Г.П. (2006) Геолого-геофизические закономерности размещения вулканических серных месторождений Тихоокеанского рудного пояса (Корякия–Камчатка–Курилы–Япония). Петропавловск-Камчатский, Кам ГУ им. Витуса Беринга, 138 с.
- Allis R.G. (1990) Geophysical anomalies over epithermal systems. *J. Geochem. Explor.*, **36**, 339-374.
- Gurin G., Tarasov A., Ilyin Yu., Titov K. (2013) Time domain spectral induced polarization of disseminated electronic conductors: laboratory data analysis through the Debye decomposition approach. *J. Appl. Geophys.*, **98**, 44-53.
- Hedenquist J.W., Arribas A., Reynolds T.J. (1998) Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system; Far Southeast-Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippines. *Econ. Geol.*, **93**(4), 373-404.
- Holley E.A., Bissig T., Monecke T. (2016) The Veladero High-Sulfidation Epithermal Gold Deposit, El Indio-Pascua Belt, Argentina: Geochronology of Alunite and Jarosite. *Econ. Geol.*, **111**, 311-330.
- Irvine R.J., Smith M.J. (1990) Geophysical exploration for epithermal gold deposits. *J. Geochem. Exploration*, **36**, 375-412.
- Kellett R.L., Bromley C.J. (2019) Geophysical signatures of New Zealand epithermal Au-Ag deposits, and methods for new exploration. *New Zel. J. Geol. Geophys.*, **62**(4), 442-460.
- Locke C., Cassidy J., Harris M., Kirkby A., Mauk J., Tomlinson A., Rowland J., Smith N. (2007) Geophysical characteristics of the southern Coromandel Volcanic Zone, New Zealand, and associated epithermal deposits. *ASEG Extended Abstr. Western Australia*, 1-5.
- Lyashenko L.L., Mikhailova G.N. (1972) Отчет о результатах поисково-разведочных работ в пределах Малетойваямского сернорудного узла. [Report on the results of prospecting and exploration work within the Maletovayam sulfur ore node] 151 p. Petropavlovsk-Kamchatskiy, Geolfond. (In Russian, unpublished)
- Petrenko I.D. (1999) *Zoloto-serebryanye formatsii Kamchatki* [Au-Ag formations of Kamchatka]. St.Petersburg, VSEGEI Publ., 115 p. (In Russian)
- Sillitoe R.H. (2010) Porphyry Copper System. *Econ. Geol.*, **105**, 3-41.
- Teal L., Benavides A. (2010) History and Geologic Overview of the Yanacocha Mining District, Cajamarca, Peru. *Econ. Geol.*, **105**(7), 1173-1190.
- Tolstykh N., Vymazalová A., Tuhý M., Shapovalova M. (2018) Conditions of formation of Au-Se-Te mineralization in the Gaching ore occurrence (Maletovayam ore field), Kamchatka, Russia. *Mineral. Mag.*, **82**(3), 649-674.
- Volchkov A.G., Zvezdov V.S. (1997) The nature of manifestations of copper-arsenic mineralization of the Maletovayamskii stratovolcano. *Rudy i metally*, (5), 44-52. (In Russian)
- Volkov A.V., Savva N.E., Sidorov A.A., Kolova E.E., Chizhova I.A., Alekseev V.Yu. (2015) Epithermal Au-Ag deposit Atagan and perspectives of display of high-sulfide mineralisation on North-East of Russia. *Geologiya Rudn. Mestorozd.*, **57**(1), 25-47. (In Russian)
- Yarotskiy G.P. (2006) *Geologo-geofizicheskie zakonomernosti razmeshcheniya vulkanicheskikh sernykh mestorozhdenii Tihookeanskogo rudnogo poyasa (Koryakiya – Kamchatka – Kurily – Yaponiya)* [Geol-Geophysic regularity of volcanic sulphur deposits distribution in Pacific ore belt (Koryakia – Kamchatka – Kuril Islands – Japan)]. Petropavlovsk-Kamchatskii, Kam. St. Univ. Publ., 138 p. (In Russian)

## REFERENCES