



ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОД, МЕТАСОМАТИТОВ И РУД НА МЕСТОРОЖДЕНИИ ЗОЛОТА ТУНАНЦА, ЭКВАДОР

Х.П. МЕДИНА^{1,*}, П.А. ИГНАТОВ¹, А.А. ИВАНОВ¹, И.В. ВИКЕНТЬЕВ²

¹ ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»
23, ул. Миклухо-Маклая, г. Москва 117997, Россия

² Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (ИГЕМ РАН)
35, Старомонетный пер., Москва 119017 Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Кордильера-дель-Кондор на юго-востоке Эквадора вмещает несколько золоторудных месторождений, включая эпитермальное золотоносное месторождение Тунанца и неразведанные перспективные участки. Кроме того, связь между физическими свойствами, гидротермальными изменениями и золоторудной минерализацией остается слабоизученной, что может ограничивать интерпретацию данных геофизических исследований в этом регионе. Впервые в данном исследовании представлены результаты анализа избранных физических свойств образцов с месторождения Тунанца.

Цель: определить физические свойства неизмененных горных пород, метасоматитов и руд месторождения золота Тунанца для выявления их соотношений и локализации оруденения.

Материалы и методы. Использованы геологические материалы, результаты документации поверхностных выходов и подземных выработок; петрографические и минераграфические исследования 86 прозрачных шлифов и 10 аншлифов. Выполнен анализ 315 образцов: плотности, магнитной восприимчивости и удельного электрического сопротивления; осуществлена картографическая интерполяция изменений физических свойств с использованием метода кригинга в геоинформационной среде QGIS.

Результаты. Метасоматиты и руды проявляются в увеличении плотности и резком снижении магнитной восприимчивости при переходе от пропилитов к рудному телу. Интерполяция изменений физических свойств отражает рудную зону в виде совмещенной аномалии высокой плотности и низкой магнитной восприимчивости, окруженной проводящим и внешним магнитным ореолом.

Заключение. Установлена связь между физическими параметрами фреатомагматических брекчий с метасоматитами и локализованной в них золоторудной минерализацией, что следует использовать в качестве инструмента при поисках эпитермальных и порфириновых месторождений при интерпретации геофизических данных.

Ключевые слова: брекчиевая трубка, золото, эпитермальные месторождения, Кордильера-дель-Кондор, физические свойства, кригинг, магнитная восприимчивость

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Медина Х.П., Игнатов П.А., Иванов А.А., Викентьев И.В. Физические свойства пород, метасоматитов и руд на месторождении золота Тунанца, Эквадор. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2026;68(1):50—62. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2026-68-1-50-62> EDN: [XPGNMN](https://edn.ru/XPGNMN)

Статья поступила в редакцию 25.01.2026

Принята к публикации 20.03.2026

Опубликована 30.04.2026

* Автор, ответственный за переписку

PHYSICAL PROPERTIES OF ROCKS, METASOMATITES, AND ORES AT THE TUNANTZA GOLD DEPOSIT, ECUADOR

JUAN P. MEDINA^{1*}, PETR A. IGNATOV¹, ANDREY A. IVANOV¹, ILYA V. VIKENTYEV²

¹ *Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting
23, Mikluho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia*

² *Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences
35, Staromonetny lane, Moscow, 119017 Russia*

ABSTRACT

Background. The Cordillera del Condor in southeastern Ecuador hosts several gold deposits, including the Tunantza epithermal gold deposit and unexplored prospects. Furthermore, the relationship between physical properties and hydrothermal alteration assemblages as well as gold mineralization remains poorly studied, which can limit the interpretation of geophysical exploration data in this region. For the first time, this study presents the results of the analysis of selected physical properties of samples from the Tunantza deposit.

Aim. To evaluate the physical properties of rocks from the Tunantza gold deposit, establish their relationships with metasomatic facies, and identify mineralization zones.

Materials and methods. Geological materials and data obtained from the documentation of surface outcrops and underground workings were used. Petrographic analysis was carried out on 96 thin sections (86 standard and 10 polished sections). In total, 315 samples were analyzed to determine density, magnetic susceptibility, and specific electrical resistivity. Spatial interpolation was performed using the kriging method in QGIS.

Results. The influence of metasomatism and the presence of the ore body on physical properties is manifested by an increase in density and a marked decrease in magnetic susceptibility from the propylitic zone toward the ore body. Interpolation models indicate that the ore zone forms as a composite anomaly characterized by high density and low magnetic susceptibility, surrounded by a conductive halo and an external magnetic halo.

Conclusion. The results obtained demonstrate a relationship between breccia properties, metasomatic facies, and the distribution of mineralized zones. These findings can be applied in the prospecting of epithermal and porphyry deposits, as well as in the interpretation of geophysical data.

Keywords: breccia-pipe, gold, epithermal, Cordillera del Condor, physical properties, kriging, magnetic susceptibility

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

Financial disclosure: no financial support was provided for this study.

For citation: Medina J.P., Ignatov P.A., Ivanov A.A., Vikentyev I.V. Physical properties of rocks, metasomatites, and ores at the Tunantza gold deposit, Ecuador. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration.* 2026;68(1):50—62. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2026-68-1-50-62> EDN: [XPGNMN](https://xpgnmn.org)

Manuscript received 25 January 2026

Accepted 20 March 2026

Published 30 April 2026

* Corresponding author

Эпитермальные месторождения представляют собой значительные источники золота, включая крупные месторождения мирового класса, связанные с фреатомагматическими и гидротермальными брекчиевыми трубками, такие как месторождение Акупан (Филиппины) с добычей более 200 тонн золота [12] и Крипл-Крик

(США) с извлечением более 810 тонн золота [16], Ладолам (Папуа — Новая Гвинея) с более чем 1400 тоннами золота [7]. Все они связаны с Тихоокеанским рудным поясом, включая мелко-среднее по запасам месторождение Тунанца. Оно также локализовано во фреатомагматической брекчиевой трубке [2, 3].

В основе интерпретации геофизических данных при поисках рудных месторождений как эффективного инструмента лежит определение физических свойств пород, метасоматитов и руд по образцам. Для эпитермальных и порфировых месторождений золота важное значение также имеет характерная метасоматическая зональность [1, 10, 20]. Кроме того, ферромагнитные минералы, такие как магнетит и пирротин, могут быть широко распространены в золоторудных месторождениях, даже входя в состав руд [5, 19] или являясь частью вмещающих пород глубинных зон, связанных с порфирами [1, 19, 20], что влияет на изменения магнитной восприимчивости пород. К этому надо добавить существенную корреляцию между данными магнитометрии и гидротермальной метасоматической зональностью [6, 9, 14], а также увеличение плотности в перспективных зонах. Однако каталог данных по геофизическим свойствам пород, аномалиям и изменениям в анализе пространственного распределения весьма ограничен, что подчеркивает важность разработки исследований, позволяющих установить эти свойства для пород, связанных с золоторудными месторождениями, такими как Тунанца. Результаты таких исследований следует учитывать при интерпретации полевых геолого-геофизических данных на этапе поисково-оценочных работ.

Материалы и методы

Исследование основано на данных геолого-структурного анализа и изучения более чем 500 образцов пород, руд и метасоматитов, отобранных из поверхностных обнажений и более чем 3000 м задокументированных эксплуатационных, разведочных и поверхностных выработок месторождения золота Тунанца.

Петрографические и минералогические исследования включали макроскопическое изучение 315 образцов с месторождения Тунанца.

Оптическая микроскопия. Изучено 96 образцов, из которых 47 прозрачных шлифов и 10 аншлифов соответствовали фрагментам руды и пробам из обогащенной зоны; остальные 39 прозрачных шлифов относились к породам и метасоматитам. Исследования проводились на микроскопе Axioscore-5, оборудованном цифровой камерой и компьютером с программным обеспечением SIAMS на кафедре геологии месторождений полезных ископаемых геологоразведочного факультета Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе (РГГРУ — МГРИ).

Физические параметры. Проанализировано 335 образцов, получены данные по плотности, магнитной восприимчивости и удельному электрическому сопротивлению. Анализы выполнены с использованием гидростатических весов, каппаметра Model KT-5 серия 7088 и Terrmometer E6-3. Исследование проводилось на кафедре геофизики геофизического факультета Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе (РГГРУ — МГРИ).

Анализ пространственного распределения физических параметров (плотности, магнитной восприимчивости и удельного электрического сопротивления) на исследуемой площади выполнен с использованием плагина Smartmap 1.5 для QGIS и метода интерполяции кригинга. Согласно [8, 21], данный метод соответствует условиям настоящего исследования, поскольку данные характеризуются пространственной автокорреляцией, а сеть опробования является неоднородной: расстояние между пробами варьирует от 1 до 200 м. Анализируемая площадь соответствует полигону 1000 x 600 м, который плане включает крутопадающее тело брекчий, включает минерализованную зону месторождения и простирается до зон контакта брекчий с вмещающими породами, основана на данных 80 отобранных, проверенных и очищенных проб, со схожим размером, высокой целостностью и без признаков гипергенных изменений.

Результаты исследований

Золоторудное месторождение Тунанца, ранее известное как Пиунца, разрабатываемое по лицензии горного общества «Питука II», расположено на юге Эквадора, в провинции Самора-Чинчипе, в 9 км к юго-востоку от города Самора (78°53' в.д., 4°07' ю.ш.), в Кордильере-дель-Кондор. Район месторождения входит регион рифтогенеза пермотриасового возраста [17]. В этом же регионе находятся эпитермальное месторождение Фрутадель-Норте, с запасами 9,91 млн унций золота и 15,0 млн унций серебра [17], медно-порфировый объект Мирадор с ресурсами 609 млн метрических тонн при содержании 0,58% Cu, 3,2 млн унций золота и 22 млн унций серебра [11], скарновое месторождение Намбиха и другие практически не изученные золотоносные зоны, к ним относятся и месторождение Тунанца.

Месторождение Тунанца представляет собой мелко-среднезернистое эпитермальное месторождение, расположенное внутри полимиктовой брекчиевой трубки фреатомагматического

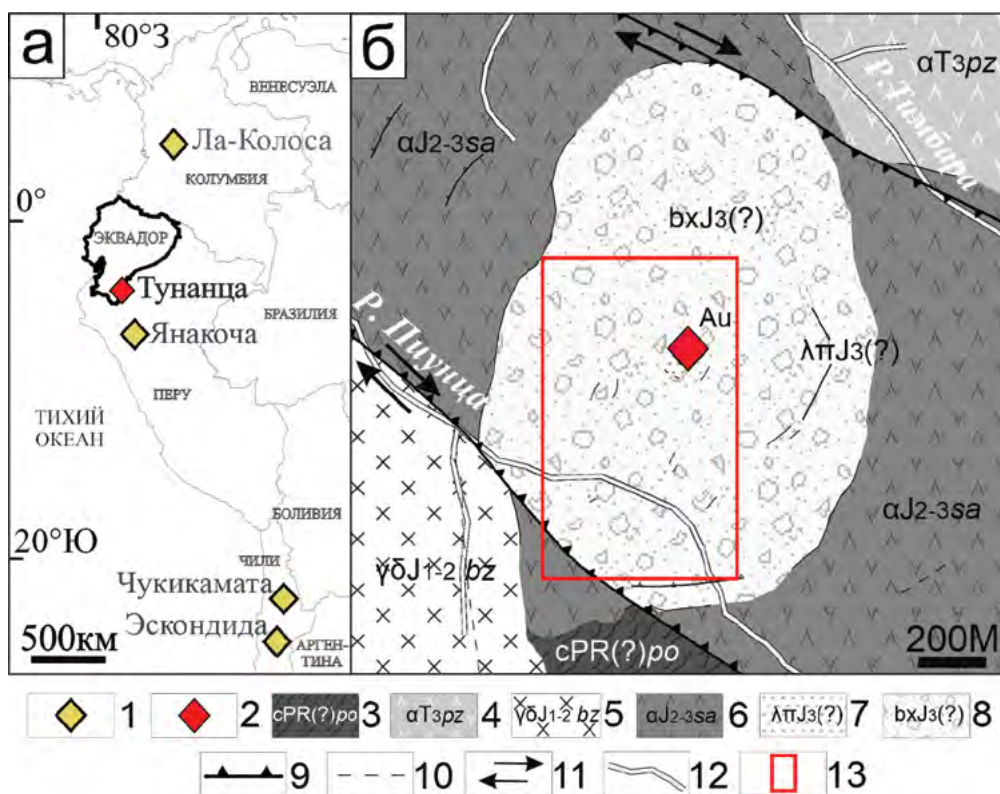


Рис. 1. Региональное расположение некоторых из основных золото-медных месторождений Южной Америки и месторождения золота Туананца (а); геологическая схема золоторудного месторождения Туананца [4] (б). 1 — рудные месторождения; 2 — месторождение Туананца; 3 — сланцы и гнейсы, формация «План-дель-Осо»; 4 — порфировые андезиты, формация Пиунца; 5 — гранодиориты батолита Самора; 6 — афанитовые андезиты, формация Ла Сакеа; 7 — риолитовый кварц-полевошпатовый порфир; 8 — фреатоматматические брекчи; 9 — сдвиг; 10 — предполагаемый разлом; 11 — направление сдвига; 12 — речная сеть; 13 — исследованный участок

Fig. 1. Regional location of some of the main gold and copper deposits of South America and the Tunantza gold deposit (a); geological scheme of the Tunantza gold deposit [4] (b). 1 — ore deposits; 2 — Tunantza deposit; 3 — shales and gneisses, «Plan del Oso» formation; 4 — porphyritic andesites, Piuntza formation; 5 — granodiorites of the Zamora batholith; 6 — aphanite andesites, La Saquea formation; 7 — rhyolitic quartz-feldspar porphyry; 8 — phreatomagmatic breccias; 9 — strike-slip fault; 10 — inferred fault; 11 — slip direction; 12 — river network; 13 — study area

происхождения [2, 4], которая прорывает гранитные породы батолита Самора (рис. 1). К югу от рудного поля расположены гнейсы и сланцы формации План-дель-Осо предположительно неопротерозойско-палеозойского возраста [15], слагающие останцы кровли над батолитом. На севере обнажаются порфировые андезиты, входящие в состав основания триасовой формации Пиунца [15]; они находятся в контакте с батолитом и также образуют останцы кровли над ним. На северо-западе и юго-востоке наблюдаются афировые андезиты, залегающие несогласно на формации Пиунца, обрамляющие брекчиевый массив и входящие в состав формации Ла-Сакеа.

Самора батолит простирается на 200 км в северо-северо-восточном направлении при ширине 50 км и является частью юрского известково-щелочного вулканического пояса. Батолит состоит из двух различных интрузивных комплексов: 1 — ранний плутон преимущественно однородного состава, сложенный главным образом среднезернистыми гранодиоритами, которые обнажаются к юго-западу от рудного поля в контакте с брекчиями [4]; 2 — поздний комплекс в виде субвулканических интрузий, даек и штоками, образующими купольные структуры среднего или кислого состава, которые пересекают батолит в различных местах [11, 17]. Именно они выделяются своей связью

с зонами медно-золотой минерализации [11]. Породы последнего типа относятся к риолитовым кварц-полевошпатовым порфирам, присутствующим в составе брекчии в виде обломков и неправильных блоков размером более 5 м; они представляют собой реликты гипабиссального тела, внедрившегося в plutonic породы Самора ба-толита до образования брекчии [2, 4].

Брекчии образуют неправильной формы массив с диаметром на поверхности примерно 1,4 км. Контактные поверхности круто падают к центру, что указывает на трубчатую, сужающуюся с глубиной форму. Они представлены преимущественно матриксными брекчиями, содержащими хаотично распределенные обломки разного размера. Их пересекают гидротермальные брекчии в виде субвертикальных прожилков и жил, беспорядочно распределенных в брекчиевом теле. На основании комплекса диагностических признаков эти брекчии относятся к фреатомагматическим [2, 4].

Золоторудные зоны представлены двумя формами: первая — минерализованные брекчии с сульфидным цементом, образующие неправильные субвертикальные удлиненные блоки поперечником около 20 м; вторая — тонкие зигзагообразные кварц-сульфидные жилы мощностью около 2 см, с почти вертикальным падением, протяженностью до 30 м, расположенные радиально относительно первой формы. В целом минерализация локализована в центральной части брекчиевого тела. Рудные минералы включают пирит, сфалерит, галенит, халькопирит, арсенопирит и, в меньших количествах, другие сульфиды, которые в совокупности составляют более 60%. Нерудные минералы представлены кварцем и поздними карбонатами [2].

Брекчии, вмещающие месторождение Тунанца, являются полимиктовыми и содержат хаотично распределенные обломки разного размера, включающие: риолитовый порфир, базальт, андезит, гранодиорит, черный сланец, гнейс, роговик, андезитовые туфы и, в меньшей степени, другие породы, размер которых слишком мал для точной идентификации. Изучение брекчий месторождения Тунанца позволило определить количественное содержание обломков разного состава (табл. 1). Заметно преобладает кварц-полевошпатовый риолитовый порфир, за которым следуют базальт и андезит.

Метасоматиты. В рудном поле месторождения Тунанца установлена последовательность метасоматических изменений: пропилиты, кварц-серцитовые и каолинит-алунитовые образования, что отражает эволюцию гидротермальных растворов

Таблица 1. Процентный состав обломков брекчий месторождения Тунанца

Table 1. Percentage composition of clasts forming the breccias from the Tunantza deposit

Порода	%
Кварц-полевошпатовый риолитовый порфир	20–60
Базальт	5–20
Андезит	5–20
Гранодиорит	<5–10
Черный сланец	<5
Гнейс	<5
Роговик	<5
Андезитовый туф	<5
Другие (не диагностированы)	<15

от условий, близких к нейтральным, к более кислым. Оптическая микроскопия позволила исключить присутствие ферромагнитных минералов в руде, а также идентифицировать магнетит, широко распространенный в базальте и в микрообломках брекчий, принадлежащих к пропилитам. В кварц-серцитовых и каолинит-алунитовых метасоматах в обломках брекчий наблюдается присутствие пирита и сидерита.

Физические свойства пород месторождения Тунанца, представленных обломками брекчий, имеют различные значения для каждого типа породы (табл. 2).

Плотность изменяется от 2,44 до 2,75 г/см³ для пород и резко возрастает до 3,63 г/см³ для руд, что подчеркивает явный контраст между вмещающими породами и минерализованным телом. Магнитная восприимчивость сильно варьирует от 0,08×10⁻³ СИ для руды и роговиков до 5,05×10⁻³ СИ для базальта. Кварц-полевошпатовый риолитовый порфир имеет умеренные значения около 2,4×10⁻³ СИ, как и гранодиорит. Средние значения удельного электрического сопротивления в большинстве пород, как правило, превышают 1×10⁶ Ом·м. Рудные образцы и сланцы имеют значения на порядок ниже 0,14×10⁶ Ом·м.

Значения физических свойств брекчий варьируют в зависимости от степени их метасоматического изменения и присутствия рудных минералов (табл. 3).

Средняя плотность пропилитизированных брекчий составила 2,46 г/см³, а охваченных кварц-серцитовым метасоматозом — 2,52 г/см³ и каолинит-алунитовым — 2,51 г/см³, что заметно выше. Надо отметить значительное увеличение плотности для брекчий с присутствием сульфидов со средними значениями, достигающими 2,64 г/см³,

Таблица 2. Средние значения свойств типичных пород месторождения Туананца
Table 2. Average values of properties of typical rocks of the Tunantza deposit

Порода	ρ , г/см ³	χ , СИ, $\times 10^{-3}$	ρ_e , Ом·м, $\times 10^6$	Количество образцов
Кварц-полевошпатовый риолитовый порфир	2,44	2,44	1,16	38
Базальт	2,47	5,05	0,45	10
Андезит	2,64	1,08	1,01	13
Гранодиорит	2,62	2,42	1,20	3
Гнейс	2,75	0,20	1,24	4
Андезитовый туф	2,52	0,60	1,21	5
Черный сланец	2,75	0,17	0,14	1
Роговик	2,63	0,08	1,09	1
Руда	3,63	0,08	0,00	3
Брекчия	2,54	1,03	0,88	116
Другие (брекчии в которых один обломок занимает >50% объема образца, контактовые зоны)	2,52	2,26	0,95	141

Примечание: ρ — плотность; χ — магнитная восприимчивость; ρ_e — электрическое сопротивление.
 Note: ρ — density; χ — magnetic susceptibility; ρ_e — electrical resistivity.

Таблица 3. Средние значения плотности, магнитной восприимчивости и удельного электрического сопротивления
 брекчий в зависимости от типа метасоматизма и наличия рудных минералов
Table 3. Average values of density, magnetic susceptibility, and electrical resistivity of breccias according
 to the type of metasomatism and presence of ore minerals

Код	Тип	ρ , г/см ³	χ , СИ, $\times 10^{-3}$	ρ_e , Ом·м, $\times 10^6$	Количество образцов	
1	Не измененные*	2,53	2,15	1,00	194	
2	Метасоматизм	Пропилит	2,46	1,62	0,63	18
3		Кварц-серицит	2,52	0,89	0,57	17
4		каолинит-алунитовые	2,51	0,25	1,16	36
5.1		С рассеянными сульфидами в матрице	2,52	0,23	0,96	18
5.2	С прожилками из массивных сульфидов	2,64	0,18	0,57	27	

Примечание: * средние значения, оцененные на основе процентного содержания обломков из таблицы 1 и значений физических свойств каждой породы, приведенных в таблице 2.
 ρ — плотность; χ — магнитная восприимчивость; ρ_e — электрическое сопротивление.
 Note: * Average values estimated from the percentage of clasts in Table 1 and the physical property values of each rock type given in Table 2.
 ρ — density; χ — magnetic susceptibility; ρ_e — electrical resistivity.

что обусловлено присутствием тяжелых рудных минералов пирита, галенита и сфалерита.

Магнитная восприимчивость отражает четкую нисходящую тенденцию: от значений, соответствующих неизменным брекчиям, $2,15 \times 10^{-3}$ СИ, которые прогрессивно снижаются при пропилитовом метасоматозе до $1,62 \times 10^{-3}$ СИ, далее до $0,89 \times 10^{-3}$ СИ при кварц-серицитовом изменении, достигая минимальных значений при као-

линит-алунитовом метасоматозе $0,25 \times 10^{-3}$ СИ и в брекчиях с сульфидами, $(0,18-0,25) \times 10^{-3}$ СИ.

Удельное электрическое сопротивление брекчий имеет различные значения. У неизменного типа наблюдаются высокие средние значения $1,00 \times 10^6$ Ом·м, которые снижаются для пропилитов и кварц-серицитовых метасоматитов до $0,57 \times 10^6$ и $0,63 \times 10^6$ Ом·м соответственно. Брекчии, подверженные каолинит-алунитовым

Таблица 4. Коэффициент корреляции Пирсона физических свойств брекчий
Table 4. Pearson correlation coefficient of physical properties of breccias

	ρ , г/см ³	χ , СИ, $\times 10^{-3}$	ρ_e , Ом·м, $\times 10^6$	Количество проб
ρ , г/см ³	1,00	-0,63	-0,33	61
χ , СИ, $\times 10^{-3}$	-0,63	1,00	-0,48	79
ρ_e , Ом·м, $\times 10^6$	-0,33	-0,48	1,00	54

Примечание: ρ — плотность; χ — магнитная восприимчивость; ρ_e — электрическое сопротивление.
Note: ρ — density; χ — magnetic susceptibility; ρ_e — electrical resistivity.

Таблица 5. Средние значения плотности, магнитной восприимчивости и удельного электрического сопротивления кварц-полевошпатового риолитового порфира в зависимости от типа метасоматизма и наличия рудных минералов
Table 5. Average values of density, magnetic susceptibility, and electrical resistivity of quartz-feldspar riolitic porphyry according to the type of metasomatism and presence of ore minerals

Код	Тип	ρ , г/см ³	χ , СИ $\times 10^{-3}$	ρ_e , Ом·м $\times 10^6$	Количество образцов	
1	Не измененная	2,47	4,94	1,08	5	
2	Метасоматизм	Пропилит	2,45	0,68	0,25	7
3		Кварц-серицитовые	2,42	0,11	2,00	11
4		Каолинит-алунитовые	2,52	0,05	0,35	8
5.3		С сульфидами в прожилках (рассеянные)	2,49	0,12	0,01	7

Примечание: ρ — плотность; χ — магнитная восприимчивость; ρ_e — электрическое сопротивление.
Note: ρ — density; χ — magnetic susceptibility; ρ_e — electrical resistivity.

изменениям, демонстрируют увеличение сопротивления до $1,16 \times 10^6$ Ом·м. Брекчии с сульфидами обладают самым низким сопротивлением, $0,57 \times 10^6$ Ом·м, что обеспечивает уникальные характеристики, связанные с обогащенной золотом зоной. Рассчитаны коэффициенты корреляции Пирсона разных физических свойств брекчий (табл. 4).

Корреляция между плотностью и магнитной восприимчивостью брекчий является средней или отрицательной, $r = -0,63$, что интерпретируется как общая тенденция к уменьшению магнитной восприимчивости при увеличении плотности. Корреляция между магнитной восприимчивостью и удельным сопротивлением является отрицательной, $r = -0,48$, вероятно, вследствие варибельности значений удельного электрического сопротивления, как и корреляция между плотностью и удельным сопротивлением, которая является отрицательной, $r = -0,33$, демонстрируя слабую корреляционную зависимость.

Поскольку, как правило, в брекчиях преобладают кварц-полевошпатовые риолитовые порфиры, целесообразно рассмотреть вариации изменений их физических свойств. Они варьируют в зависимости

от степени их метасоматического изменения и присутствия рудных минералов (табл. 5).

Плотность варьирует в диапазоне от 2,42 до 2,52 г/см³. При пропилитовом метасоматозе среднее значение составляет 2,45 г/см³, которое незначительно снижается до 2,42 г/см³ при кварц-серицитовом изменении, а затем возрастает до 2,52 г/см³ для каолинит-алунитового метасоматоза.

Магнитная восприимчивость отражает нисходящую тенденцию: от очень высоких значений, соответствующих неизменным образцам $4,94 \times 10^{-3}$ СИ, которые резко снижаются в пропилитах до $0,68 \times 10^{-3}$ СИ, далее до $0,11 \times 10^{-3}$ СИ в кварц-серицитовых метасоматитах, достигая минимальных значений в породах, охваченных каолинит-алуниновым изменением $0,05 \times 10^{-3}$ СИ. В образцах с сульфидами наблюдается незначительное увеличение до $0,12 \times 10^{-3}$ СИ.

Удельное электрическое сопротивление демонстрирует сложную и контрастную картину в диапазоне от $0,01 \times 10^6$ до $2,00 \times 10^6$ Ом·м. В неизменных образцах средние значения высокие, $1,08 \times 10^6$ Ом·м, которые снижаются при пропилитах до $0,25 \times 10^6$ Ом·м.

Таблица 6. Коэффициент корреляции Пирсона физических свойств кварц-полевошпатового риолитового порфира

Table 6. Pearson correlation coefficient of the physical properties of quartz-feldspar riolitic porphyry

	ρ , г/см ³	χ , СИ, $\times 10^{-3}$	ρ_e , Ом·м, $\times 10^6$	Количество проб
ρ , г/см ³	1,00	-0,09	-0,71	19
χ , СИ, $\times 10^{-3}$	-0,09	1,00	0,20	32
ρ_e , Ом·м, $\times 10^6$	-0,71	0,20	1,00	28

Примечание: ρ — плотность; χ — магнитная восприимчивость; ρ_e — электрическое сопротивление.
 Note: ρ — density; χ — magnetic susceptibility; ρ_e — electrical resistivity.

В кварц-серицитовых метасоматитах сопротивление возрастает до $2,00 \times 10^6$ Ом·м, а в образцах с каолинит-алунитовыми изменениями вновь снижается до $0,35 \times 10^6$ Ом·м. Образцы с сульфидами обладают самым низким сопротивлением, $0,01 \times 10^6$ Ом·м, создавая электрический контраст.

Коэффициенты корреляции Пирсона для значений физических свойств, различно измененных кварц-полевошпатовых риолитовых порфиров представлены в таблице 6.

Корреляции между плотностью и магнитной восприимчивостью практически нет, $r = -0,09$. Практически то же надо отметить для корреляции между магнитной восприимчивостью и удельным электрическим сопротивлением, $r = 0,20$. Однако коэффициент корреляции между плотностью и удельным электрическим сопротивлением является сильной отрицательной, $r = -0,71$, что интерпретируется как связь между увеличением плотности и уменьшением сопротивления.

Распределение метасоматитов и руд с различными физическими свойствами проанализировано в плане и по рельефу участка месторождения Тунанца (рис. 2).

Пространственный анализ выполнен с использованием метода кригинга в геоинформационной среде QGIS. Анализ пространственного распределения плотности показывает прогрессивное увеличение значений в рудной зоне, где величина достигает диапазона между 2,60 и 2,70 г/см³. На разрезе наблюдается пик значений, связанный с массовым присутствием сульфидов. В отличие от этого, в зонах, наиболее удаленных от рудного тела, соответствующих периферийным участкам и пропилитам, плотность значительно ниже в диапазоне 2,40–2,45 г/см³. Отсутствие прямой связи между вариациями значений плотности и границей между пропилитовой и кварц-серицитовой зонами позволяет предположить, что этот переход может быть размытым и постепенным. Данная особенность указывает на то, что изменения значений плотности в меньшей

степени связаны с конкретным типом метасоматоза и в большей — с присутствием рудных минералов, которое не ограничивается разными метасоматитами.

Анализ пространственного распределения значений магнитной восприимчивости показывает значительное снижение в рудных зонах с величинами от 0,00 до $0,25 \times 10^{-3}$ СИ, что проявляется как отрицательная аномалия на разрезе, эквивалентная магнитной аномалии, связанной с рудной зоной, лишённой ферромагнитных минералов. Значения прогрессивно увеличиваются в направлении к внешним частям кварц-серицитовой метасоматической зоны, достигая $2,00 \times 10^{-3}$ СИ. Этот рост продолжается и сохраняется в диапазоне $(2-4) \times 10^{-3}$ СИ в зоне пропилитов. Аномальные зоны со значениями выше 4×10^{-3} СИ связаны с присутствием базальтовых даек и блоков кварц-полевошпатового риолитового порфира. Выявленная закономерность демонстрирует связь между типом метасоматоза и магнитной восприимчивостью, указывая, что магнитная восприимчивость является хорошим маркером для поиска минерализованных зон и околорудных метасоматических ореолов.

Анализ пространственного распределения удельного электрического сопротивления показывает сложное пространственное зонирование. В области рудного тела значения находятся в диапазоне $(0,50-0,75) \times 10^6$ Ом·м. Они формируют поверхность, простирающуюся до определённых участков за пределами границы кварц-серицитовой зоны. Далее значения снижаются ниже $<0,50 \times 10^6$ Ом·м в пропилитовой зоне и западной части кварц-серицитовой зоны, после чего на внешних участках постепенно возрастают, достигая диапазона $(2,00-3,00) \times 10^6$ Ом·м в областях, наиболее удаленных от рудного тела. Такое сочетание значений проявляется на разрезе, построенном по результатам анализа, в виде пологого поднятия, соответствующего рудной зоне, что предполагает наличие неконтрастной аномалии в ореоле пониженного сопротивления.

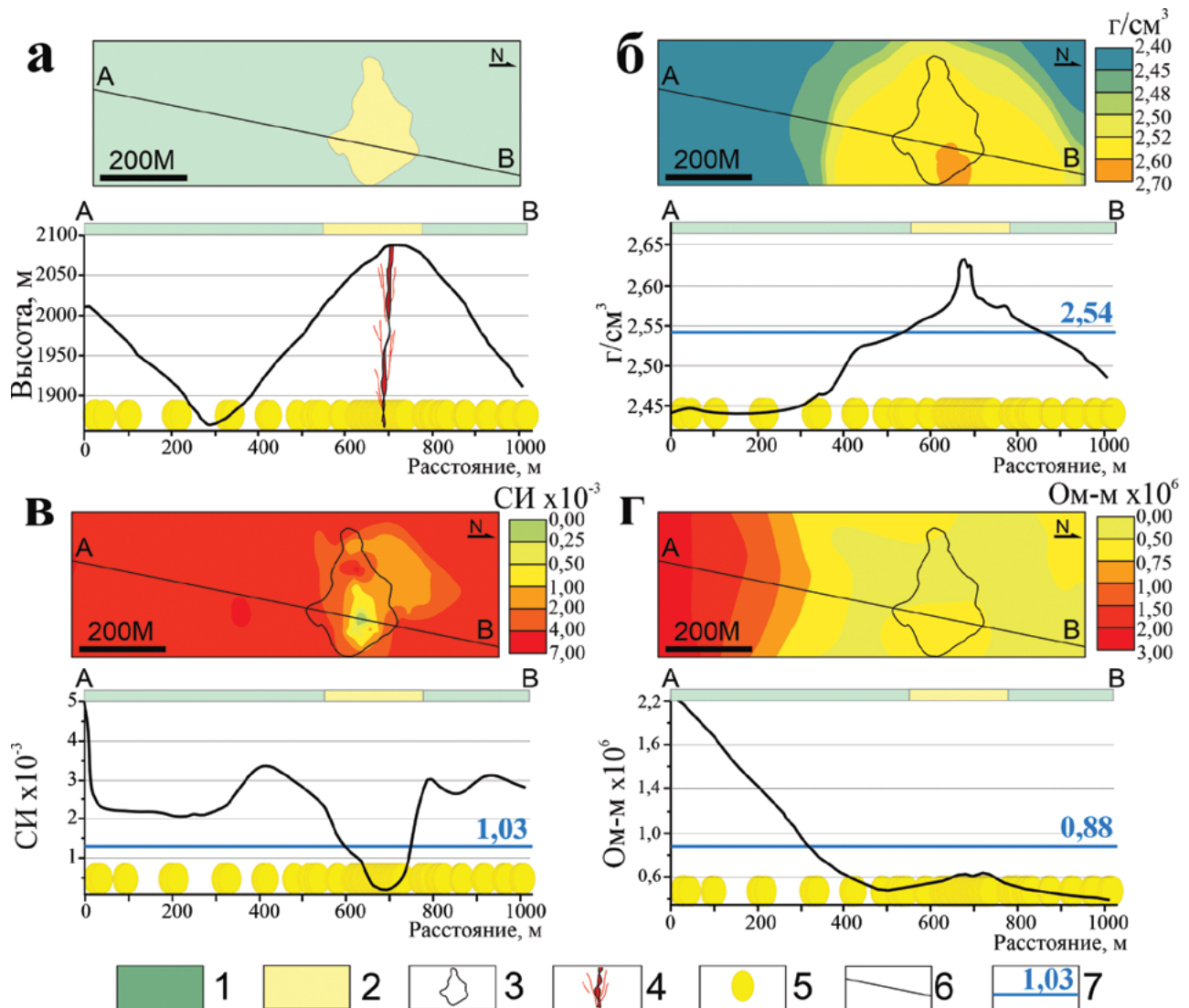


Рис. 2. Распределение в плане метасоматитов и руд с разными физическими свойствами и в элементах рельефа участка месторождения Тунанца: а — распространение метасоматитов, рельеф и положение рудного тела; б — плотность; в — магнитная восприимчивость; г — удельное электрическое сопротивление. 1–2 — метасоматиты: 1 — пропилиты; 2 — кварц-серцитовые; 3 — граница кварц-серцитовых метасоматитов; 4 — круто падающее рудное тело; 5 — точки отбора проб, спроектированные на горизонтальную плоскость; 6 — линия разреза; 7 — среднее значение

Fig. 2. Interpolation models of the physical properties of rocks from the Tunantza deposit: а — metasomatites distribution, topography, and ore body location; б — density; в — magnetic susceptibility; г — electrical resistivity. 1–2 — Metasomatites: 1 — propylitic; 2 — quartz-sericitic; 3 — quartz-sericite metasomatite boundary; 4 — ore; 5 — sampling point projected onto the horizontal plane; 6 — cross-section line; 7 — mean value

Обсуждение результатов

Определение физических свойств неизмененных пород, метасоматитов и руд, их пространственное распределение относительно рудного тела позволило установить определенные закономерности на месторождении золота Тунанца.

Для каждого типа породы определены базовые значения физических свойств, отражающие неоднородность плотности, ключевые особенности магнитной восприимчивости: высокие значения у базальта, средние — у кварц-полевошпатового риолитового порфира и гранодиорита, а также низкое удельное сопротивление руд.

Установлено значительное влияние на изменения физических свойств метасоматических изменений и количества рудных минералов в рудовмещающих фреатомагматических брекчиях (см. табл. 3) и риолитового порфира (см. табл. 5). Плотность увеличивается, в то время как магнитная восприимчивость имеет тенденцию к снижению от пропицитов через кварц-серцитовые метасоматиты к рудному телу. Удельное электрическое сопротивление демонстрирует сложные вариации. Коэффициенты корреляции Пирсона (табл. 4, 6) показывают взаимосвязи: для брекчий плотность и магнитная восприимчивость имеют умеренную отрицательную корреляцию ($r = -0,63$), тогда как для порфира между плотностью и удельным электрическим сопротивлением наблюдается сильная отрицательная корреляция ($r = -0,71$). Это предполагает различные рудоконтролирующие признаки. В брекчиях присутствие рудных сульфидов ассоциировано с увеличением плотности, что совпадает со снижением магнитной восприимчивости, и, вероятно, является результатом метасоматического замещения ферромагнитных минералов, таких как магнетит, присутствующий в обломках брекчий, возможно, на пирит или сидерит [13, 18]. Напротив, в порфире увеличение плотности, связанное с присутствием рудных сульфидов, коррелирует со снижением удельного сопротивления, а не с магнитной восприимчивостью, возможно, из-за того, что в этом типе породы не наблюдалось присутствия магнетита в метасоматитах.

Анализ площадного распределения метасоматитов и руд с разными физическими свойствами позволил установить, что рудное тело идентифицируется как аномалия высокой плотности, низкой магнитной восприимчивости и низкого-умеренного удельного электрического сопротивления, окружённая зоной меньшей плотности, большей магнитной восприимчивости и меньшего удельного сопротивления, образующей проводящее

кольцо. Периферийная пропилитовая зона характеризуется низкой плотностью, высокой магнитной восприимчивостью и удельным электрическим сопротивлением, которое возрастает в направлении более удалённых от руды участков. Эти особенности позволяют определить ключевые поисковые признаки для золоторудных минеральных систем, аналогичных месторождению Тунанца.

Выводы

Определены физические свойства различных типов пород, метасоматитов и руд месторождения золота Тунанца. Установлено влияние метасоматических процессов и характера рудной минерализации на изменения этих параметров. Отчетливо проявлена зональность с ростом интенсивности процессов гидротермального изменения от периферийных участков с пропилитами к центральной части рудного тела. Соответственно установлен систематический рост плотности и резкое снижение магнитной восприимчивости. Это изменение связано с метасоматическим замещением первичных ферромагнитных минералов (магнетита в базальтах и обломках брекчий) сульфидами и карбонатами (пирит, сидерит) в сильно минерализованных и обогащенных золотом зонах.

Результаты пространственного анализа распределения физических параметров подтверждают пространственно-зональную корреляцию физических свойств с зонами интенсивного развития метасоматоза и оруденения. Рудная зона выражена аномалией высокой плотности, низкой магнитной восприимчивости и низкого удельного сопротивления, окружённая проводящим ореолом пониженного сопротивления, который, в свою очередь, обрамлён внешним ореолом низкой плотности, высокой магнитной восприимчивости и высокого удельного электрического сопротивления, соответствующим пропилитовой зоне.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кривцов А.И.* Прикладная металлогения. М.: Недра, 1989. 288 с.
2. *Медина Х.П., Игнатов П.А.* Золоторудное месторождение Тунанца в трубке взрыва (Кордильера-Дель-Кондор, юго-восток Эквадора) и вопросы классификации подобных объектов. Вестник геонаук. 2025. № 11. С. 20–25. DOI: 10.19110/geov.2025.11.2
3. *Медина Х.П., Игнатов П.А.* Фреатомагматические брекчии месторождения Au-Ag Тунанца-Эквадор, изменения физических свойств. Актуальные проблемы недропользования. СПб.: Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 2025. С. 317–319.
4. *Медина Х.П., Игнатов П.А., Викентьев И.В.* Рудносные брекчии эпитептермального золоторудного месторождения Тунанца, Кордильера-Дель-Кондор, Эквадор. Геология рудных месторождений. 2026. Т. 67. № 43. С. 1–15.
5. *Нарсеев В.А.* Промышленная геология золота. М.: Научный мир, 1996. 243 с.
6. *Abubakar F., Ahmed B., Rabi U., Alao J., Abir I., Umaru A., Sadiq F., Isiaka A., Olayinka L., Usman J., Ochu G., Abdulmalik D.* Integrated geophysical

- evaluation of potential gold mineralisation within Nigerian Yashi Sheet 56 (1:100, 000). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 2025. Vol. 140. DOI: 10.1016/j.pce.2025.103986
7. *Blackwell J.L., Cooke D.R., McPhie J., Simpson K.A.* Lithofacies Associations and Evolution of the Volcanic Host Succession to the Minifie Ore Zone: Ladolam Gold Deposit, Lihir Island, Papua New Guinea. *Economic Geology*. 2014. Vol. 109. P. 1137–1160. DOI: 10.2113/econgeo.109.4.1137
 8. *Cardenas A.* Fundamentos teoricos y su aplicacion en los metodos de potencial geomagnetico y gravimetrico. Bogota: Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, Colombia, 2014. 190 p.
 9. *Clark D.A.* Magnetic effects of hydrothermal alteration in porphyry copper and iron-oxide copper-gold systems: A review. *Tectonophysics*. 2014. Vol. 624–625. P. 46–65. DOI: 10.1016/j.tecto.2013.12.011
 10. *Corbett G.* Epithermal Au-Ag and porphyry Cu-Au exploration — short course manual. Greg Corbett Geological Services Pty Ltd. 2017. URL: www.corbett-geology.com (дата обращения: 10.05.2025).
 11. *Drobe J., Lindsay D., Stein H., Gabites J.* Geology, Mineralization, and Geochronological Constraints of the Mirador Cu-Au Porphyry District, Southeast Ecuador. *Economic Geology*. 2013. Vol. 108. P. 11–35. DOI: 10.2113/econgeo.108.1.11
 12. *Figueroa A.J., Gabo-Ratio J.A., Manalo P.C., Takahashi R., Sato H., Ramos A.B.* Breccia and vein mineralization of the Balatoc Diatreme, Acupan gold deposit, Baguio Mineral District: An example of a diatreme-hosted epithermal deposit in the Philippines. *Ore Geology Reviews*. 2022. Vol. 144. P. 15. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2022.104826
 13. *Geymond U., Truche L., Sissmann O., Kubaniova D., Recham N., Martinez I.* Mineralogical changes and H₂ generation yield during hydrothermal alteration of a magnetite-siderite assemblage. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2025. Vol. 130. P. 17. DOI: 10.1029/2024JB030724
 14. *Gobashy M., Mekkawi M., Araffa S., Ezz Eldin M., Khalil M.* Magnetic Signature of Gold Deposits: Example from Um Garayat Region, South Eastern Desert, Egypt. *Pure Appl. Geophys.* 2023. Vol. 180. P. 1053–1080. DOI: 10.1007/s00024-023-03228-8
 15. *INIGEMM.* Hoja geologica Zamora — Republica del Ecuador. Hoja 77, escala 1:100 000. Quito: Instituto Nacional de Investigacion Geologica Minero Metalurgico del Ecuador, 2017. 1 p.
 16. *Kadel-Harder I.M., Spry P.G., Dan Layton-Matthews, Voinot A., Von der Handt A., McCombs A.L.* Paragenetic relationships between low- and high-grade gold mineralization in the Cripple Creek Au-Te deposit, Colorado: Trace element studies of pyrite. *Ore Geology Reviews*. 2020. Vol. 127. 103847. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103847
 17. *Leary S., Sillitoe R., Stewart P., Roa K., Nicolson B.* Discovery, Geology, and Origin of the Fruta del Norte Epithermal Gold-Silver Deposit, Southeastern Ecuador. *Economic Geology*. 2016. Vol. 111. P. 1043–1072. DOI: 10.2113/econgeo.111.5.1043
 18. *Qian G., Pring A., Brugger J., Skinner W., Chen G.* Replacement of magnetite by pyrite under hydrothermal conditions. *Journal of Geochemical Exploration*. 2009. Vol. 101. P. 83. DOI: 10.1016/j.jexp-geo.2008.12.012
 19. *Sillitoe R.* Ore-related breccias in volcanoplutonic arcs. *Economic Geology*. 1985. Vol. 80. P. 1467–1514. DOI: 10.2113/gsecongeo.80.6.1467
 20. *Sillitoe R., Hedenquist J.W.* Linkages between Volcanotectonic Settings, Ore-Fluid Compositions, and Epithermal Precious Metal Deposits. Special Publication: Volcanic, Geothermal, and Ore-Forming Fluids: Rulers and Witnesses of Processes within the Earth, Stuart F. Simmons, Ian Graham. 2003. Vol. 10. P. 1–50. DOI: 10.5382/SP.10.16
 21. *Villatoro M., Henriquez C., Sancho F.* Comparacion de los interpoladores IDW y Kriging en la variacion espacial de pH, CA, CICE y P del suelo. *Agronomia Costarricense*. 2008. Vol. 32. P. 95–105. DOI: 10.15517/rac.v32i1.6773

REFERENCES

1. *Krivtsov A.I.* Applied Metallogeny. Moscow: Subsoil, 1989. 288 p. (In Russ.).
2. *Medina J.P., Ignatov P.A.* Tunantza breccia-pipe hosted gold deposit (Cordillera Del Condor, southeastern Ecuador) and issues of classification of similar deposits. *Bulletin of Geosciences*. 2025. No. 11. P. 20–25 (In Russ.). DOI: 10.19110/geov.2025.11.2
3. *Medina J.P., Ignatov P.A.* Phreatomagmatic breccias of the Au-Ag Tunantsa deposit, Ecuador, changes in physical properties. *Current problems of subsoil use*. Saint Petersburg: Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 2025. P. 317–319 (In Russ.).
4. *Medina J.P., Ignatov P.A., Vikentyev I.V.* Ore-bearing breccias of the epithermal Tunantza gold deposit, Cordillera del Condor, southeastern Ecuador. *Geology of Ore Deposits*. 2026. Vol. 67. No. 43. P. 1–15 (In Russ.).
5. *Narseev V.A.* Industrial geology of gold. Moscow: Scientific world, 1996. 243 p. (In Russ.).
6. *Abubakar F., Ahmed B., Rabiu I., Alao J., Abir I., Umaru A., Sadiq F., Isiaka A., Olayinka L., Usman J., Ochu G., Abdulmalik D.* Integrated geophysical evaluation of potential gold mineralisation within Nigerian Yashi Sheet 56 (1:100, 000). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 2025. Vol. 140. DOI: 10.1016/j.pce.2025.103986
7. *Blackwell J.L., Cooke D.R., McPhie J., Simpson K.A.* Lithofacies Associations and Evolution of the Volcanic Host Succession to the Minifie Ore Zone: Ladolam Gold Deposit, Lihir Island, Papua New Guinea. *Economic Geology*. 2014. Vol. 109. P. 1137–1160. DOI: 10.2113/econgeo.109.4.1137

8. *Cardenas A.* Fundamentos teoricos y su aplicacion en los metodos de potencial geomagnetico y gravimetrico. Bogota: Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, Colombia, 2014. 190 p.
9. *Clark D.A.* Magnetic effects of hydrothermal alteration in porphyry copper and iron-oxide copper-gold systems: A review. *Tectonophysics*. 2014. Vol. 624–625. P. 46–65. DOI: 10.1016/j.tecto.2013.12.011
10. *Corbett G.* Epithermal Au-Ag and porphyry Cu-Au exploration — short course manual. Greg Corbett Geological Services Pty Ltd. 2017. URL: www.corbett-geology.com (дата обращения: 10.05.2025).
11. *Drobe J., Lindsay D., Stein H., Gabites J.* Geology, Mineralization, and Geochronological Constraints of the Mirador Cu-Au Porphyry District, Southeast Ecuador. *Economic Geology*. 2013. Vol. 108. P. 11–35. DOI: 10.2113/econgeo.108.1.11
12. *Figueroa A.J., Gabo-Ratio J.A., Manalo P.C., Takahashi R., Sato H., Ramos A.B.* Breccia and vein mineralization of the Balatoc Diatreme, Acupan gold deposit, Baguio Mineral District: An example of a diatreme-hosted epithermal deposit in the Philippines. *Ore Geology Reviews*. 2022. Vol. 144. P. 15. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2022.104826
13. *Geymond U., Truche L., Sissmann O., Kubaniova D., Recham N., Martinez I.* Mineralogical changes and H₂ generation yield during hydrothermal alteration of a magnetite-siderite assemblage. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2025. Vol. 130. P. 17. DOI: 10.1029/2024JB030724
14. *Gobashy M., Mekkawi M., Araffa S., Ezz Eldin M., Khalil M.* Magnetic Signature of Gold Deposits: Example from Um Garayat Region, South Eastern Desert, Egypt. *Pure Appl. Geophys.* 2023. Vol. 180. P. 1053–1080. DOI: 10.1007/s00024-023-03228-8
15. *INIGEMM.* Hoja geologica Zamora — Republica del Ecuador. Hoja 77, escala 1:100 000. Quito: Instituto Nacional de Investigacion Geologica Minero Metalurgico del Ecuador, 2017. 1 p.
16. *Kadel-Harder I.M., Spry P.G., Dan Layton-Matthews, Voinot A., Von der Handt A., McCombs A.L.* Paragenetic relationships between low- and high-grade gold mineralization in the Cripple Creek Au-Te deposit, Colorado: Trace element studies of pyrite. *Ore Geology Reviews*. 2020. Vol. 127. 103847. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103847
17. *Leary S., Sillitoe R., Stewart P., Roa K., Nicolson B.* Discovery, Geology, and Origin of the Fruta del Norte Epithermal Gold-Silver Deposit, Southeastern Ecuador. *Economic Geology*. 2016. Vol. 111. P. 1043–1072. DOI: 10.2113/econgeo.111.5.1043
18. *Qian G., Pring A., Brugger J., Skinner W., Chen G.* Replacement of magnetite by pyrite under hydrothermal conditions. *Journal of Geochemical Exploration*. 2009. Vol. 101. P. 83. DOI: 10.1016/j.gexplo.2008.12.012
19. *Sillitoe R.* Ore-related breccias in volcanoplutonic arcs. *Economic Geology*. 1985. Vol. 80. P. 1467–1514. DOI: 10.2113/gsecongeo.80.6.1467
20. *Sillitoe R., Hedenquist J.W.* Linkages between Volcanotectonic Settings, Ore-Fluid Compositions, and Epithermal Precious Metal Deposits. Special Publication: Volcanic, Geothermal, and Ore-Forming Fluids: Rulers and Witnesses of Processes within the Earth, Stuart F. Simmons, Ian Graham. 2003. Vol. 10. P. 1–50. DOI: 10.5382/SP.10.16
21. *Villatoro M., Henriquez C., Sancho F.* Comparacion de los interpoladores IDW y Kriging en la variacion espacial de pH, CA, CICE y P del suelo. *Agro-nomia Costarricense*. 2008. Vol. 32. P. 95–105. DOI: 10.15517/rac.v32i1.6773

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Медина Х.П. — внес вклад в разработку концепции статьи, проводил полевые работы, подготовил текст статьи, проводил анализ результатов, утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Игнатов П.А. — разработал концепцию, методологию, проведение исследования, провел редактирование рукописи, утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Иванов А.А. — внес вклад в разработку концепции статьи, методологию, подготовил текст статьи, утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Викентьев И.В. — внес вклад в разработку концепции статьи, методологию, подготовил текст статьи, утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Juan P. Medina — contributed to the development of the article concept, carried out fieldwork, prepared the text of the article, analyzed the results, approved the published version of the article and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

Petr A. Ignatov — development of the concept, methodology, research, edited the manuscript, approved the published version of the article and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

Andrey A. Ivanov — contributed to the development of the article concept, methodology, prepared the text of the article, approved the published version of the article and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

Ilya V. Vikentyev — contributed to the development of the article concept, methodology, prepared the text of the article, approved the published version of the article and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Медина Хименес Хуан Пабло — магистр геологии, аспирант кафедры геологии месторождений полезных ископаемых ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе».

23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия

e-mail: juanmedinageologia@gmail.com

тел.: +7 (977) 194-02-24

SPIN-код: 8281-6107

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6231-0888>

Juan Pablo Medina Jimenez* — Master's degree in Geology, postgraduate student at the Department of Geology of Mineral Deposits Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.

23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia

e-mail: juanmedinageologia@gmail.com

tel.: +7 (977) 194-02-24

SPIN-code: 8281-6107

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6231-0888>

Игнатов Петр Алексеевич — доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой геологии месторождений полезных ископаемых ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе».

23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия

e-mail: ignatovpa@mgri.ru

SPIN-код: 7893-1477

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7956-580X>

Petr A. Ignatov — Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Professor, Department of Geology of Mineral Deposits at the Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.

23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia

e-mail: ignatovpa@mgri.ru

SPIN-code: 7893-1477

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7956-580X>

Иванов Андрей Александрович — кандидат геолого-минералогических наук, декан геофизического факультета ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе».

23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия

e-mail: ivanov_off@mail.ru

SPIN-код: 9977-2363

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5294-8878>

Andrey A. Ivanov — Cand. Sci. (Geol.-Mineral.), Dean of the Faculty of Geophysics at the Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.

23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia

e-mail: ivanov_off@mail.ru

SPIN-code: 9977-2363

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5294-8878>

Викентьев Илья Владимирович — доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук — ИГЕМ РАН.

35, Старомонетный пер., г. Москва 119017, Россия

e-mail: viken@igem.ru

SPIN-код: 2456-3030

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9133-7562>

Ilya V. Vikentyev — Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher at Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences — IГЕМ RAS.

35, Staromonetny lane, Moscow 119017, Russia

e-mail: viken@igem.ru

SPIN-code: 2456-3030

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9133-7562>

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author