УДК 553.411.071

ВЕРТИКАЛЬНАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ И ПОЛЯ ГЕОХИМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ХАМАМА В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ВОСТОЧНОЙ ПУСТЫНИ ЕГИПТА

© 2021 г. А. Ш. Махмуд^{*a*, *b*, *, В. В. Дьяконов^{*a*, *c*}, А. Е. Котельников^{*c*}, М. Давуд^{*d*}, Х. А. Эль-Докуны^{*d*}}

^аРоссийский Государственный Геологоразведочный Университет им. С. Орджоникидзе, ул. Миклухо-Маклая, 23, Москва, 117997 Россия ^bУниверситет Файюм, г. Аль-Файюм, 63514 Египет ^cРоссийский университет дружбы народов (РУДН), ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, 117198 Россия ^dУниверситет Менуфия, ул. Гамаль Абдель Насер, г. Шебин Эль-Кум, 32511 Египет *e-mail: halim.geologist@mail.ru Поступила в редакцию 14.02.2019 г.

После доработки 13.04.2020 г. Принята к публикации 13.04.2020 г.

Месторождение Хамама представлено крутопадающим рудным телом полиметаллического колчеданного типа и расположено на контакте базальтовых лав и их вулканокластических разностей. Его параметры — около 3 км по простиранию, до 110 м мощностью и более 250 м глубиной. По документации керна разведочных скважин выявлена вертикальная зональность рудной зоны, состоящей из четырех зон (снизу вверх): 1 — первичная рудная зона; 2 — зона вторичного сульфидного обогащения; 3 — зона выщелачивания и 4 — зона окисления. Самые высокие содержания Au, Pb и Cu распределены в зоне окисления, в то время как самые высокие концентрации Ag и Zn наблюдаются в массивной первичной руде между высотами 340 и 390 м. За зоной окисления следует зона резкого обеднения металла, затем содержание металла увеличивается в зоне вторичного обогащенная и, наконец, постепенно уменьшается с утончением рудного тела. Установлены межэлементные корреляции между основными металлами и Pb, Hg, Cd, As и Sb, которые отражают полиметаллический характер руды. Промышленная минерализация сгруппирована на двух участках: Западная Хамама и Восточная Хамама. Западная Хамама является более продуктивной на Au и Ag, в то время как Восточная Хамама содержит большие количества Zn, Pb и Cu.

Ключевые слова: Восточная Пустыня, Хамама, зональность, зона окисления, золоторудные месторождения, аномалия, корреляция элементов **DOI:** 10.31857/S0016777021010044

ВВЕДЕНИЕ

Вулканогенная золоторудная минерализация широко распространена в Восточной Пустыне (ВП) Египта. При этом Восточная Пустыня остается неисследованной во многих частях, в основном из-за отсутствия инвестиций. В настоящее время правительство Египта обеспечивает благоприятный инвестиционный климат для серьезных инвесторов. Одним из крупнейших Египетских проектов по развитию горнодобывающего сектора является "Золотой Треугольник", занимающий площадь 11000 км² в центральной части ВП между городами Кусейр с юга, Сафага с севера и Кена на западе. Помимо месторождения Хамама, в него входит около 19 месторождений и проявлений золота, большинство из которых приобрела канадская компания Aton Resources (paнee Alexander Nubia). Месторождения и рудопроявления "треугольника" рассматриваются преимущественно как полиметаллические колчеданные, кварцевые, сульфидно-кварцевые формации и кварц-карбонатные.

Район Хамама имеет длительную историю золотодобычи, начиная со времен фараонов и до наших дней. В долине Абу-Грейда сохранилось множество древних пещер и шахт, которые представляют собой гнездовья для голубей, откуда и название (Хамама по-арабски "голубь"). Древние шлаковые отвалы и металлургические следы добычи меди относятся к периоду Птолемеев (ок. 330–30 гг. до н.э.) и сосредоточены в устье Вади Хамама (Abd El-Rahman et al., 2012). В 1970-х гг. этот район был исследован группой египетских геологов и экспертов из Советского Союза (Abd El Nabi, Prokhorov, 1976ф¹). В своем отчете авторы приволят средние концентрации золота и основных металлов в кварцевых и карбонатных жилах, каолинитизированных метавулканитах и гидротермально измененных вулканических породах. Были выделены участки для разведки руд. В конце 1980-х компания Minex Minerals Egypt пробурила около 40 скважин, однако буровые керны не сохранились. Затем в 2011 г. компания Alexander Nubia начала первичное разведочное бурение. В 2015 г. название компании было изменено на Aton Resources Inc. В 2018 г. были завершены геологоразведочные работы и месторождение Хамама подготовлено к добыче. По итогам разведки месторождение отнесено к Zn-Cu-Ag-Au вулканическим массивным сульфидам (VMS). Месторождение было подвержено влиянию мощных гипергенных процессов, которые привели к широкому распространению вторичных минералов меди, обогащению золотом и особенно - Zn. По данным компании Aton Resources Inc., предполагаемый ресурс добычи (бортовое содержание более 0.5 г/т Аи) месторождения Хамама составляет 2.36 млн т окисленной руды, 5.63 млн т первичной руды и 0.22 млн т рыхлой руды коры выветривания (всего 8.21 млн т) при содержаниях 29.7 г/т Ад и 0.87 г/т Au (Aton Resources, 2017). Западная зона считается самой богатой по содержанию золотосеребряной минерализации, как в приповерхностной золото-оксидной шляпе, так и на глубине в первичных рудах. Западная Хамама располагает ресурсами" "Предполагаемыми минеральными (оценка с низким уровнем достоверности) в 341 тыс. унций золотого эквивалента и "Обозначенными минеральными ресурсами" (т.е. экономически целесообразными) в 137 тыс. унций Au (Aton Resources, 2017). Недавний отбор проб в восточной части рудного тела протяженностью около 500 м выявил наличие высокосортной Au-Ag-Zn рудной минерализации (Aton Resources, 2018).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для изучения руд нами были отобраны 28 рудных образцов с поверхностных обнажений и из керна месторождения Хамама, включающих все типы рудных интервалов (табл. 1). Они были проанализированы в лабораториях Института минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов (ИМГРЭ, Москва, РФ). Измерения были выполнены с помощью ICP-MS на масс-спектрометре Elan 6100 DRC. Концентрации ртути в образцах определяли отдельно с использованием

ГЕОЛОГИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ том 63 № 2

метода AAS в том же институте с использованием ртутного анализатора RA-915+.

Для целей статистической обработки геохимических данных была сформирована единая база, включающая в себя, помимо собственных данных, и данные разведки компании Aton Resources в количестве 8 440 проб из скважин и 4 475 проб из траншей. Анализы выполнены в лаборатории ALS Minerals Division в Румынии. Для определения золота использовался метод атомной абсорбции, а для определения Ag, Cu, Pb и Zn – ICP-MS (Aton Resources, 2017). Для создания компьютерных версий геохимических карт и разрезов использованы программы ArcGIS, MicroMine и др.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ

В фундаменте Восточной Пустыни (ВП) обнажаются метаморфические породы. Они разделены на две основные стратиграфические единицы (El-Gaby et al., 1988; Abdeen, Greiling, 2005; Abd El-Wahed, Kamh, 2010). Нижняя структурная единица состоит из метаморфических пород (гнейсы, сланцы, амфиболиты и др.), которые представлены в куполообразных структурах, таких как купола Мигиф, Митик и Сибай. Выше залегают породы Верхней структурной единицы, представленные в различной степени метаморфизованными терригенными отложениями, выделяемыми в качестве метаосадочной толщи. Над ними залегает толща метавулканитов. Она делится на две части: внизу – метавулканиты основного состава, связанные с серпентинитами, выше - более поздние метавулканические и туфогенные породы кислого и среднего состава. Завершают разрез мезо-кайнозойские терригенные отложения Хамама, представляющие собой платформенный чехол, и вулканиты от основных до кислых Формации Дохана. Домезо-кайнозойские отложения прорваны породами двух магматических комплексов: ранним - гипербазитовым и более поздним – гранитоидным.

В строении района месторождения Хамама (Conoco, 1987) принимают участие основные и средние метавулканические породы верхней магматической серии (фиг. 1). К югу базальтовые породы соприкасаются с различными типами вулканокластических пород (лапиллиевые и полосчатые туфы и брекчии), переслаивающихся с железистыми сланцами. Контакт между ними тектонический, залеченный кварц-карбонатными телами с разной степенью рудной минерализации, образует протяженную зону окисления на поверхности (фиг. 1в). Среди базальтов часто встречаются дайки и штоки риолитового и дацитового составов (фиг. 16, в).

Небольшое кварцево-диоритовое тело прорывает метавулканиты в центральной части района

2021

¹ *Abd El Nabi A., and Prokhorov D.* Report of the Safaga party on the results of prospecting for gold and rare metals in the area of Wadis Safaga, El Barrud, Abu Makhadeg, El Marah and Hamama, conducted in 1974–1975 // The Egyptian Geological Survey and Mining Authority. Cairo, 1976. Internal report.

| ама |
|-------------------------------------|
| aM |
| X |
| месторождения |
| ИЗ] |
| буровых кернов |
| ВИ |
| образцоі |
| ICP-MS анализы поверхностных |
| Габлица 1. |

| | ¥£\$0-¥Н¥ | 130.3 | | 8.03 | 0.12 | 3.04 | 11.68 | 52.21 | 3.18 | 3.27 | 1.01 | 0.91 | 11.93 | 0.07 | 4.39 |
|----------------|-----------|------------------------------|-----------|-------|-------------------|-------|--------------------------------|------------------|--------|-------|------------------|------|-----------------------|----------|------------------|
| | aeeo-aha | 131 | | 17.28 | 0.09 | 19.06 | 10.23 | 25.85 | 0.03 | 0.41 | 0.29 | 0.51 | 17.53 | 0.07 | 8.24 |
| | 440-AHA | 30.8 | | 13.92 | 0.1 | 9.36 | 0.99 | 57.3 | 0.18 | 13.21 | 0.04 | 0.72 | 2.8 | 0.01 | 1.19 |
| | A020-AHA | 39.3 | | 10.69 | 0.19 | 2.89 | 5.18 | 43.93 | 0.18 | 12.37 | 0.32 | 0.24 | 13.78 | 0.05 | 9.92 |
| мотиди | Aððo-AHA | 43.7 | | 9.4 | 0.08 | 5.31 | 3.56 | 56.41 | 0.03 | 5 | 0.16 | 0.39 | 15.29 | 0.19 | 7.02 |
| Богатая ш | 220-AHA | 44.9 | | 10.2 | 0.82 | 10.49 | 16.01 | 34.28 | 2.95 | 2.3 | 1.89 | 1.05 | 15.94 | 0.12 | 3.27 |
| | 8050-AHA | 47 | 1ac. %) | 8.14 | 0.78 | 11.55 | 12.21 | 47.15 | 0.09 | 7.97 | 1.4 | 0.23 | 8.7 | 0.15 | 1.5 |
| | 8990-VHV | 61.6 | оксиды (м | 14.66 | 0.07 | 23.11 | 0.09 | 0.96 | 0.01 | 29.38 | 0.02 | 1.13 | 24.81 | 0.02 | 5.53 |
| | 8400-AHA | 79.4 | сновные | 21.78 | 0.06 | 22.35 | 6.24 | 20.59 | 0.02 | 16.44 | 0.59 | 2.09 | 8.37 | 0.06 | 1.31 |
| | 970-VHV | 114.2 | 0 | 9.14 | 1.28 | 15 | 13.53 | 40.08 | 6.0 | 5.61 | 0.89 | 0.54 | 11.43 | 0.05 | 1.22 |
| 1 | A400-AHA | 33.2 | | 6.54 | 0.29 | 22.08 | 1.92 | 6.93 | 0.07 | 27.83 | 0.15 | 1.2 | 14.32 | 0.02 | 5.24 |
| ллическая | 8170-AHA | 118.1 | | 9.41 | 0.1 | 8.81 | 3.39 | 35.38 | 0.95 | 17.81 | 0.1 | 5.33 | 8.94 | 0.03 | 5.58 |
| Полимета | VI20-AHA | 120.3 | | 14.93 | 0.13 | 9.44 | 3.62 | 42.48 | 96.0 | 16.67 | 0.21 | 5.15 | 3.99 | 0.01 | 1.88 |
| | 720-AHA | 83.2 | | 8.89 | 0.18 | 5.56 | 7.94 | 12.8 | 1.25 | 0.88 | 0.22 | 0.06 | 21.79 | 0.01 | 23.27 |
| Тип образца | образец | Верти- кальная глубина | | ШШП | Na ₂ O | MgO | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | K_2O | CaO | TiO ₂ | MnO | ${\rm Fe_2O_3^{tot}}$ | P_2O_5 | S ^{tot} |

МАХМУД и др.

ГЕОЛОГИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ том 63 № 2 2021

176

| Продолжение |
|-------------|
| Ι. |
| Таблица |

| Сумма | 82.85 | 99.47 | 95.83 | 86.59 | 99.67 | 6.66 | 99.79 | 99.87 | 99.32 | 99.84 | 99.74 | 99.82 | 99.59 | 99.84 |
|-------|--------|--------|-------|--------|-------|---------|-----------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|--------|
| | | | | | | Микроэл | іементы (| (mqq | | | | | | |
| Au | 0.126 | 0.602 | 0.19 | 0.0025 | 0.387 | 0.202 | 0.641 | 0.0025 | 0.0025 | 1.385 | 0.0025 | 0.125 | 0.016 | 0.031 |
| Ag | 13.5 | 16.4 | 13.7 | 0.54 | 25 | 35.9 | 28.1 | 1.23 | 0.5 | 71.1 | 0.5 | 9.2 | 10.94 | 10.13 |
| Cu | 6450 | 46 | 165 | 6323 | 112 | 17.4 | 113.1 | 29 | 54 | 83.7 | 260.61 | 25.8 | 111 | 55 |
| Zn | 127354 | 2666 | 26983 | 124970 | 275 | 121.8 | 259.1 | 158 | 2880 | 679 | 980 | 294 | 2753 | 191 |
| Pb | 14801 | 183.21 | 165 | 414 | 55 | 52.5 | 699 | 19 | 5.6 | 73.32 | 210 | 87.03 | 716 | 126.5 |
| As | 570 | 73.67 | 72 | 798 | 60 | 5.3 | 117.21 | 5.31 | 10.38 | 40.48 | 21.77 | 59.4 | 5.32 | 160.32 |
| Ba | 1014 | 291 | 340 | 77 | 1721 | 38.71 | 58.73 | 67.43 | 1442 | 29.3 | 57 | 717 | 137 | 315.55 |
| Cd | 295 | 1.37 | 65.1 | 330 | 0.47 | 0.35 | 0.46 | 0.52 | 2.1 | 0.94 | 0.83 | 0.48 | 1.19 | 0.32 |
| Hg | 15.1 | 7.84 | 12.15 | 20.4 | 10.81 | 5.47 | 14.12 | 15.12 | 0.28 | 28.44 | 0.05 | 127 | 5.5 | 0.67 |
| Sb | 3.63 | 85 | 77.14 | 422 | 5.55 | 0.47 | 0.85 | 13.43 | 112 | 3.82 | 43.1 | 1.93 | 0.366 | 13.33 |
| Te | 20.57 | 1.29 | 12.73 | 0,034 | 11.1 | 0.053 | 13.2 | 0.53 | 0.04 | 0.53 | 0.04 | 1.21 | 0.05 | 1.12 |
| Bi | 0.06 | 0.153 | 0.06 | 0.007 | 1.12 | 0.12 | 0.2 | 0.004 | 0.003 | 3.28 | 0.002 | 0.02 | 0.004 | 0.02 |
| V | 99 | 43 | 18.1 | 16.41 | 292 | 186 | 5.26 | 328 | 413 | 36.42 | 56.02 | 21 | 85 | 254 |
| Cr | 99.4 | 24.22 | 13 | 13.2 | 42.12 | 48.45 | 5.23 | 5.71 | 5.34 | 19.51 | 20 | 14.35 | 95 | 5.23 |
| Co | 1.91 | 10 | 3.11 | 8.08 | 29 | 3.31 | 3.06 | 13.7 | 26 | 3.31 | 5.61 | 2.21 | 9.8 | 18.2 |
| Ni | 62.21 | 10.11 | 11.2 | 18.43 | 30.04 | 21 | 2.98 | 6.12 | 14.32 | 2.03 | 4.43 | 1.01 | 51.21 | 7.67 |

ВЕРТИКАЛЬНАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ И ПОЛЯ ГЕОХИМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ

177

ГЕОЛОГИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ том 63 № 2 2021

| | H-73 | 0 | | 11.65 | 0.157 | 1.13 | 3.918 | 64 | 0.574 | 12.65 | 0.049 | 0.424 | 5.2 | 0.008 | 0.13 | <u>99.89</u> |
|----------------|---------|------------------------------|-----------|--------|---------|--------|-----------|------------------|------------------|-------|------------------|-------|-----------------------|----------|------------------|--------------|
| | Н-62 | 0 | | 5.02 | 1.06 | 1.99 | 9.855 | 47.094 | 2.243 | 3.041 | 0.576 | 0.086 | 28.26 | 0.56 | 0.18 | 96.66 |
| | H-56 | 0 | | 11.14 | 0.918 | 15.41 | 1.47 | 34.19 | 0.026 | 8.073 | 0.05 | 0.36 | 26.26 | 0.583 | 0.1 | 98.58 |
| | H-53 | 0 | | 5.87 | 0.19 | 0.755 | 15.318 | 32.517 | 3.826 | 0.718 | 2.1 | 0.367 | 37.33 | 0.154 | 0.2 | 99.345 |
| | H-41 | 0 | | 8.21 | 0.54 | 5.09 | 2.47 | 47.64 | 0.48 | 6.32 | 0.22 | 0.25 | 28.25 | 0.032 | 0.45 | 99.95 |
| | H-34 | 0 | | 8.26 | 0.251 | 1.463 | 8.05 | 58.551 | 0.022 | 0.906 | 0.485 | 0.069 | 21.39 | 0.291 | 0.13 | 99.868 |
| ая руда | H-30 | 0 | лас. %) | 16 | 1.335 | 0.657 | 1.54 | 59.36 | 0.412 | 0.69 | 0.06 | 0.05 | 19.475 | 0.0134 | 0.11 | 99.70 |
| Окисленна | H-25 | 0 | оксиды (л | 7.19 | 0.23 | 1.89 | 3.58 | 49.65 | 1.36 | 5.51 | 0.02 | 0.153 | 29.83 | 0.028 | 0.32 | 99.761 |
| C | H-24 | 0 | сновные | 17.29 | 1.7 | 0.91 | 5.74 | 34.43 | 0.75 | 0.77 | 0.14 | 2.74 | 34.33 | 0.11 | 0.21 | 99.12 |
| | H-21 | 0 | 0 | 28.625 | 0.105 | 13.625 | 0.285 | 15.21 | 0.03 | 25.59 | 0.02 | 4.275 | 7.372 | 0.0143 | 2.1 | 97.25 |
| | H-12 | 0 | | 12.72 | 2.02 | 10.82 | 1.39 | 38.82 | 0.354 | 13.45 | 0.01 | 0.13 | 19.47 | 0.027 | 0.34 | 99.55 |
| | 6-H | 0 | | 6.51 | 0.154 | 0.192 | 0.581 | 19.93 | 0.026 | 0.533 | 0.133 | 0.137 | 71.17 | 0.42 | 0.12 | 06.66 |
| | H-14 | 0 | | 8.69 | 0.12 | 0.79 | 3.78 | 51.37 | 1.36 | 3.51 | 0.01 | 0.153 | 29.72 | 0.027 | 0.12 | 99.65 |
| | AHA-001 | 22.9 | | 17.55 | 0.38 | 21.77 | 9.0 | 1 | 0.04 | 31.14 | 0.01 | 1.43 | 15.67 | 0.02 | 0.14 | 89.75 |
| Тип образца | Образец | Верти- кальная глубина | | ШШ | Na_2O | MgO | Al_2O_3 | SiO ₂ | K ₂ 0 | CaO | TiO ₂ | MnO | ${\rm Fe_2O_3^{tot}}$ | P_2O_5 | S ^{tot} | Сумма |
| | | | | | | ГЕОЛ | огия | РУДН | ых мі | ECTO | ожде | ЕНИЙ | том (| 53 N | <u>i</u> 2 2 | 2021 |

178

Таблица 1. Продолжение

МАХМУД и др.

| Окончание | |
|------------|--|
| 1 . | |
| Габлица | |

| | 0.358 | 0.393 | 10.6 | 52.4 | 2.27 | 8.01 | 34.22 | 0.237 | 0.067 | 1.71 | 0.291 | 0.172 | 13.3 | 3.08 | 13.1 | 1.28 |
|-----------|-------|-------|------|--------|-------|------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|------|------|-------|------|
| | 0.512 | 0.57 | 35.5 | 64.6 | 6.43 | 12.2 | 4.91 | 0.261 | 0.0245 | 0.907 | 0.263 | 0.067 | 113 | 11.6 | 8.75 | 4.75 |
| | 0.652 | 5.7 | 689 | 0653 | 2054 | 108 | 26.56 | 81.5 | 0.9335 | 25.9 | 3.42 | 0.215 | 33.6 | 3.61 | 8.52 | 17.7 |
| | 0.446 | 2.51 | 94.1 | 5345 1 | 9.66 | 63.5 | 99.58 | 22.6 | 0.1595 | 5.23 | 6.58 | 10.2 | 510 | 18.9 | 6.24 | 4.97 |
| | 0.553 | 2.97 | 51.1 | 67 | 12.3 | 13.3 | 37.89 | 2.76 | 0.048 | 0.982 | 2.48 | 4.63 | 184 | 18.5 | 20.5 | 7.35 |
| | 0.168 | 0.375 | 524 | 9.69 | 7.21 | 16.6 | 10.67 | 0.482 | 0.06 | 0.401 | 0.791 | 1.92 | 111 | 23.3 | 7.47 | 3.35 |
| (mqq | 1.23 | 9.12 | 254 | 1776 | 181 | 69.8 | 270 | 4.05 | 0.4995 | 15.4 | 3.65 | 0.056 | 75.8 | 8.5 | 4.52 | 9.53 |
| ементы (ј | 0.412 | 56.2 | 86.4 | 65.5 | 122 | 457 | 10.42 | 0.076 | 2.33 | 94.7 | 1.59 | 0.043 | 99.2 | 28.4 | 1.97 | 3.8 |
| геодяиМ | 4.33 | 55.2 | 1359 | 3284 | 2634 | 291 | 22.67 | 3.17 | 0.345 | 48.5 | 7.1 | 0.202 | 108 | 33.8 | 67.5 | 84 |
| | 1.11 | 5.93 | 777 | 19988 | 2135 | 318 | 240 | 56.2 | 0.03 | 135 | 0.204 | 0.011 | 36.7 | 3.48 | 7.83 | 25.8 |
| | 0.278 | 7.06 | 84.7 | 3720 | 70.2 | 76.8 | 319 | 15 | 0.1 | 3.03 | 0.186 | 0.008 | 17.7 | 4.36 | 19.2 | 16.1 |
| | 0.188 | 1.14 | 355 | 181 | 37.8 | 118 | 55.83 | 8.61 | 0.05 | 0.588 | 25.1 | 5.06 | 123 | 4.76 | 10.56 | 1.3 |
| | 2.29 | 173 | 79.2 | 215 | 1741 | 123 | 335 | 2.12 | 62 | 115 | 2.27 | 8.35 | 20.7 | 11.7 | 1.3 | 4.7 |
| | 0.421 | 170 | 8596 | 47260 | 38062 | 683 | 107 | 353.4 | 160.11 | 1274 | 0.02 | 3.4 | 5.61 | 5.09 | 8.12 | 24 |
| | Au | Ag | Cu | Zn | Pb | As | Ba | Cd | Hg | Sb | Те | Bi | > | Cr | Co | Ni |

ВЕРТИКАЛЬНАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ И ПОЛЯ ГЕОХИМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ

Примечание. Fe₂O₃^{tot} – содержание общего железа в пересчете на оксид. S^{tot} – общая сера. ППП – потери при прокаливании. Ррт – часть на миллион.



Фиг. 1. а – карта расположения района; б – геологическая карта района Хамама; в – геологическая карта месторождения Хамама (по материалам Aton Resources, 2018). Условные обозначения: 1 – долинные отложения; 2 – нубийский песчаник; 3 – кварцевые жилы; 4 – дайки гранит-порфиров; 5 – минерализованные кварц-карбонатные жилы; 6 – монцогранит; 7 – тоналит-трондъемит; 8 – габбро-диоритовый комплекс; 9 – гранодиорит; 10 – кварцевый диорит; 11 – кислые метавулканиты (риолит-дацит); 12 – железистые туфы; 13 – вулканокластические породы (туфобрекчии); 14 – основные и средние метавулканиты (андезитобазальт); 15 – разломы; 16 – зоны метасоматического изменения.

| | | - | - | | - | | | | | |
|------------------------|------|-------|-------|--------|---------|-------|-------|-------|-------|------|
| Элемент | Au | Ag | Cu | Pb | Zn | As | Hg | Sb | Cd | Te |
| Минимальное | 0.00 | 0.10 | 0.5 | 1 | 4 | 5.3 | 0.02 | 0.37 | 0.08 | 0.02 |
| Максимальное | 38.8 | 2710 | 15140 | 82600 | 376000 | 798 | 160.1 | 1274 | 353.4 | 25.1 |
| Медиана | 0.05 | 3.20 | 81 | 104 | 552 | 71 | 1.6 | 9.4 | 1.74 | 1.2 |
| Среднее значение | 0.42 | 15.23 | 373 | 819 | 3927.7 | 155.6 | 17.5 | 89.4 | 44.6 | 4.3 |
| Стандартное отклонение | 1.05 | 50.4 | 914 | 2917.6 | 14349.2 | 216 | 38.1 | 247.1 | 101.8 | 6.6 |

Таблица 2. Общие статистические параметры базы данных месторождения Хамама

Примечание. Средние значения в г/т, количество образцов (n = 12915 для Au, Ag, Cu, Zn; n = 11901 для Pb; n = 28 для As, Hg, Sb, Cd, Te); 0.00 – концентрация элемента ниже предела обнаружения.

Хамама (фиг. 1в). Большие по площади интрузии грано-диоритового и габбро-диоритового комплексов занимают юго-восточный угол территории. Они прорывают метавулканиты основного состава. Большое количество полевошпат-кварцевых гранит-порфировых даек протягивается в виде широкой полосы от массива монцогранитов в СВ направлении, пересекая все вышеупомянутые породы, включая гранитоиды. Зоны метасоматического изменения с рассеянными сульфидами широко распространены вокруг гранитоидных тел. Широко проявлены дизъюнктивные нарушения. Мощная толща Нубийских меловых песчаников (в западной части района) перекрывает метавулканические породы и руды.

Наиболее яркой особенностью геологии месторождения Хамама является широкое распространение карбонатных и кварц-карбонатных тел и жил, размещенных в вулканических и вулканокластических породах. Они сильно различаются по размеру, от нескольких миллиметров до десятков метров. Их можно разделить на два типа: а) неминерализованные, чистые тонкие карбонатные слои (толщиной до 15 см); б) минерализованные, мощные (до 10 метров и более) тела карбонатов. Они связаны с тектоническими нарушениями и в основном ограничиваются трещинами и разломами. Эти минерализованные линзы образуют протяженную до 3 км зону, которая прослеживается на восток и запад еще на 6 км и на глубину более 250 м. К этим зонам приурочена и рудная минерализация. При этом рудные тела круто погружаются, со средним углом падения около 55°. Мощность зоны оруденения варьирует в больших пределах от 10 до 110 м. Ширина залежи увеличивается вверх, достигая максимальных значений на поверхности в западной зоне месторождения Хамама.

ОБЩИЕ СТАТИСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ РУД

Среднее содержание основных оксидов руд Хамама (рассчитано по табл. 1) в порядке убывания составляет: SiO₂ (36.8 мас. %), Fe₂O₃ общ. (19.8 мас. %), CaO (9.6 мас.%), MgO (8.7 мас. %) и

ГЕОЛОГИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ том 63

№ 2 2021

 Al_2O_3 (5.54 мас. %). Эти значения указывают на то, что силикаты, карбонаты и сульфиды железа (или оксиды) являются основными составляющими руды. Среднее содержание микроэлементов приведено в табл. 2.

Среднее содержание золота месторождения Хамама низкое, 0.42 г/т, при этом менее 24.5% образцов равномерно распределяются выше этого значения, а 11.6% выборки превышают значения 1 г/т. Содержание серебра также низкое – в среднем 15.23 г/т, где около 23.2% выборки выше среднего значения. Среднее значение содержаний меди составляет 0.037%, и около 20.7% образцов имеют значение выше среднего. Цинк, как правило, самый богатый металл в образцах после железа, в среднем составляет около 0.4%. В целом содержание свинца низкое (в среднем 0.08%), максимум 8.2%, в более чем 87% образцов свинец ниже среднего значения. Концентрации мышьяка составляют от 5 до 798 г/т. Среднее значение мышьяка составляет 155.6 г/т, а медиана – 71 г/т. Сурьма присутствует всегда, иногда и в высоких концентрациях – до 1274 г/т. Половина образцов имеет концентрацию Sb ниже среднего значения (89 г/т), но другая половина имеет высокие значения около 500 г/т. Кадмий распределяется по многим фазам в виде включений, а иногда и в виде сульфидной фазы гринокита. Однако содержание Cd очень низкое в большинстве образцов (в среднем при 44 г/т), за исключением образцов полиметаллической руды, где его содержание достигает 353 г/т.

Рассчитанные статистические значения (среднее и стандартное отклонение) в табл. 2 следует оценивать осторожно, особенно для металлов с небольшим количеством проанализированных образцов, таких как As, Sb, Cd и Hg. Два фактора играют важную роль в точности данных. Во-первых, образцы с содержаниями ниже пределов обнаружения (определяемые количеством ценного вещества по данным анализа составляют Au = 0.005 г/т, Ag = 1 г/т, Cu = 1 г/т, Pb = 1 г/т, в то время как минимальное значение Zn = 56 г/т, выше предела обнаружения) считались в два раза ниже, что незначительно влияет на общее среднее. Во-вторых, образцы с очень высокими содержаниями сильно



Фиг. 2. Схематическое поперечное сечение месторождения на участке Западная Хамама как модель вертикальной зональности (Смирнов, 1955) и концентрация элементов в каждой зоне. Условные обозначения: 1 – вулканокластические породы, 2 – метавулканиты, 3 – железная шляпа (Госсан), 4 – зона выщелачивания, 5 – зона вторичного обогащения, 6 – первичная руда, 7 – зоны гидротермальных изменений.

увеличивают стандартное отклонение (которое использует отношение квадрата отклонений к среднему содержанию). Эти эффекты еще более важны из-за большого разнообразия между образцами (от безрудных до массивных руд и от окисленных до свежих). В результате значения стандартного отклонения могут превосходить средние значения. Это не означает, что существуют отрицательные оценки, а скорее, что распределение асимметрично относительно среднего.

Таким образом, приведенные выше значения дают приемлемые средние содержания (взвешенные по длине образцов) для Cu, Zn, Pb, в некотором роде точные для Au и Ag и приблизительное представление о значениях для As, Sb, Hg, Cd и т.д. В таком случае высокие стандартные отклонения указывают на элементы с сильными изменениями содержаний.

ВЕРТИКАЛЬНАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

По содержанию сульфидной минерализации руды, как правило, характеризуются от низких до средних (5–30% по объему). В некоторых глубоких буровых кернах встречены массивные руды с суммарным содержанием сульфидов до 60%. Месторождение подверглось интенсивным процессам физического выветривания. Вслед за С.С. Смирновым (Смирнов, 1955) нами выделены 4 основные зоны изменений на месторождении Хамама (снизу вверх): а) зона первичного оруденения; б) зона вторичного обогащения; в) зона выщелачивания; г) зона окисления (железная шляпа) (фиг. 2). В работе использованы данные опробования рудных интервалов. Минералогические характеристики рудных интервалов приводятся ниже. Определение границ между зонами весьма условно. Поэтому приводятся приблизительные пределы глубин каждой зоны, на основе данных геохимического опробования элементов и минералогических исследований.

Зона первичного оруденения (глубже 135 м от устья скважины)

Образцы первичной руды обогащены пиритом и сфалеритом больше, чем медными минералами. Они состоят в среднем из 30% модального кварца с аморфным кремнеземом, 25% доломита, 20% пирита, 10% кальцита, 10% других сульфидов, 5% полевого шпата. В этой зоне пирит представлен двумя генерациями: а) рано сформировавшиеся крупнозернистые идиоморфные кристаллы кубического габитуса в кварц-карбонатной матрице и б) мелкозернистые скелетные выделения, распределенные в серицитизированной полевошпатовой массе (фиг. 3б). Сфалерит встречается в виде больших масс с нечеткими кристаллическими очертаниями (фиг. 3а). Устанавливается более поздняя карбонатизация по отношению к кварцу. Реликты кварца с корродированными краями часто встречаются в тонкой карбонатной матрице.

Эта зона содержит самое высокое среднее количество Ag (20.1 г/т), варьируя от 0.1 до 2910 г/т. Золото показывает среднее значение 0.38 г/т, варьируя от 0 до 12.9 г/т. Среднее значение Zn составляет (3932 г/т), в диапазоне от 34 г/т до 12.1%, Cu (297 г/т) и Pb (660 г/т). Мощность этой зоны и содержание металлов уменьшаются сверху вниз.



Фиг. 3. Микрофотографии рудных минералов из разных зон: а – сфалерит и рассеянный пирит в кварц-карбонатной матрице; б – скелетные зерна пирита корродировали ободки первичного куба пирита; в – полиметаллическая руда с преобладанием пирита и сфалерита и небольшого межзернового галенита и халькопирита, окруженная реакционным ободком из ковеллита; г – галенит с включениями пирита и треугольниками выкрашивания, на границе с крупным зерном сфалерита; д – агломераты фрамбоидов пирита и идиоморфные кубики, показано стрелками; е – пирит с вытравленным бактериями краем; ж – кубики окисленного пирита, зонального строения; з – окисленный пирит и колломорфная текстура оксидов железа.

2021

Зона вторичного обогащения (от 85 до 135 м)

Эта зона характеризуется обилием текстур обрастания и замещения сульфидной минерализации вторичными минералами меди, такими как ковеллин, халькозин и борнит. Халькопирит распространен более широко, чем в зонах окисления и выщелачивания. Немного сфалерита и галенита можно найти в виде включений в карбонатную матрицу или в массивных пиритовых массах (фиг. 3в, г).

Карбонаты этой зоны существуют в основном в двух генерациях, первая из которых представляет собой доломитовую массу, содержащую пирит и кварц. Вторая — вторичные жилы кальцита, которые рассекают силикатные минералы, пиритовые жилы и более раннюю карбонатную матрицу. Во многих полированных шлифах наблюдалось растворение силикатов (кварца и лапили туфов) более поздним раствором карбонатов. Также гидротермальный раствор образует реакционный ободок с карбонатами и силикатами в полостях.

Отмечено, что в этой зоне содержания всех металлов очень близки к общему среднему значению месторождения. Они характеризуются самыми высокими средними концентрациями Zn (1.5%), Pb (0.3%), As (0.05%), Cd (400 г/т), Hg (150 г/т), Ag (40 г/т) и Au (0.7 г/т). Кроме того, в ней содержатся массивные сульфидные конкреции, подчиняющиеся геохимическому индексу (Zn + Cu + Pb > 5 атомный %), которые представляют только 1.7% выборки, но имеют наивысшие содержания золота и серебра (около 2 и 95 г/т соответственно). Эти массивные конкреции обнаруживаются в основном в зоне вторичного обогащения и в верхней части первичной рудной зоны, особенно в Западной Хамаме в интервале (340– 440 м в абсолютных значениях от уровня океана) (фиг. 2).

Зона выщелачивания (от 35 до 85 м)

Минеральная ассоциация этой зоны в основном богата пиритами, с низким содержанием сфалерита и минералов меди. Пирит в этой зоне наблюдается в двух формах с переходной формой между ними. Первый пирит представлен нормальными идиоморфными, кубической формы кристаллами, с интенсивным проявлением катаклазирования. Второй представлен фрамбоидальным пиритом (фиг. 3д). Переходная форма представлена кристаллами пирита с вытравленным бактериями краем (фиг. 3е, 4а). Фрамбоиды ограничены этой зоной. В зоне окисления они интенсивно окисляются и преобразуются в коломорфную массу (фиг. 3з). Эти фрамбоиды образуются за счет переработки первичных крупнозернистых пиритов бактериями в восстановительной среде, при низких температурах. Rickard (1997) показал, что пирит преобразуется в строго бескислородных системах. Halbach et al. (1993) определили температуру образования фрамбоидального пирита в гидротермальном поле месторождения в Японии в диапазоне (150-210°С). Сканирующая электронная микроскопия показывает сохранившиеся гнезда этих бактерий, построенных на первичных пиритах (фиг. 4а). Это привело к появлению во фрамбоидах тонких включений тетраэдрита, серебра и теллура (фиг. 4б). Агломераты фрамбоидов затем спаивались вместе с наполнителем из халькопирита, изредка образуя повторяющиеся ободки вокруг этих фрамбоидов. Барит распространенным второстепенным является минералом, особенно в этой зоне. Карбонаты в основном доломитовые и мелкозернистые.

Зона характеризуется резким истощением содержаний полезных компонентов, в ней концентрация Au снижается с 0.55 до 0.19 г/т, а Ag уменьшается с 16 до 9 г/т. Кроме того, зона выщелачивания имеет меньшую концентрацию свинца, примерно в половину от зоны окисления. Средняя концентрация меди снижается с 451 до 280 г/т. Содержание Sb также резко падает с 1 274 г/т (образец AHA-001 на вертикальной глубине 22 м) до менее чем 1 г/т (образец AHA-066B, на глубине 61 м). Zn, As, Hg показывают небольшое понижение, в то время как Cd — небольшое увеличение.

Зона окисления (от 0 до 35 м)

Согласно предыдущим сообщениям, по результатам бурения, проводимого в этом районе, зона окисления простирается под поверхностью на средней вертикальной глубине около 35 м (Aton Resources, 2016). В разломанных зонах и понижениях рельефа может достигать 50 м. Пустынный регион ВП характеризуется арилным климатом, где отсутствует сплошной почвенно-растительный покров. В этой связи кислород не расходуется на его формирование и насыщает грунтовые воды. В результате чего образуется окислительный барьер, что привело к обогащению одними элементами и истощению других, в соответствии с их физико-химическими свойствами, особенно растворимостью. Поэтому руды на поверхности месторождения характеризуются рыхлой текстурой, обусловленной процессами гипергенного выщелачивания, иногда сохраняются фрагменты "губок" пиритового и сфалерит-пиритового состава. В зоне окисления пирит переходит в гидроксиды железа в виде гематита, гетита и лимонита, с сохранением контура первоначальной кубической формы, которые можно назвать псевдоморфозами пирита (фиг. 3ж). Сфалерит превращается в оксиды (цинкит, ZnO), карбонаты (смитсонит, ZnCO₃) и сложные соли цинка, которые трудно идентифицировать микроскопически. Другие оксидные эквиваленты первичной руды включают в себя: литаргит или "глёт" (PbO), куприт (Cu_2O), арсенолит (As_2O_3) и др.

Карбонаты и окисленные сульфидные минералы подвергались диагенетическим преобразованиям, выразившимся в появлении коллоформной, кокардовой и сферолитовой текстур (Mahmoud et al., 2018). Некоторые карбонаты реагировали с Zn в коллоидном растворе при образовании этих текстур. Глинистые минералы представляют собой основной компонент зоны окисления, образовавшейся в результате выветривания силикатных минералов вулканических пород. Общая минеральная ассоциация зоны окисления может быть описана как гематит-лимонит-гетит-глинисто-карбонат-кварцевая, несущая Au и Ag с обильным баритом в качестве второстепенного минерала.

Помимо большого объема и простоты извлечения металлов, зона окисления характеризуется лучшими средними содержаниями золота (0.55 г/т), свинца (1029 г/т) и меди (451 г/т). Средняя концентрация золота в зоне окисления выше, чем в среднем по рудной залежи в 1.3 раза, что подтверждает его гипергенное обогащение при окислении. Кроме того, верхние 10 м содержат самые высокие концентрации Au (0.61 г/т) и нормальные значения Cu (524 г/т), Pb (1227 г/т) и Zn (4929 г/т), но низкое – Ад (14.4 г/т). В целом зона окисления обогащена Au, Cu, Fe, Sb, As и Hg. С другой стороны, зона окисления обеднена сульфидами Ag, Te, V, Со, Сг и Ni из-за их высокой растворимости при окислении. Статистика показывает, что верхний 10-метровый слой месторождения Хамама имеет значительные содержания большинства металлов



Фиг. 4. Фотографии со сканирующего электронного микроскопа: а – сохраненные гнезда фрамбоидальных бактерий, построенные на первичных кубиках пиритов, б – фрамбоид пирита (Ру) с тонкими включениями тетраэдрита (Tet), самородного теллура (Te) и серебра (Ag).

из-за гипергенного обогащения, кроме Ag (табл. 3-II) (Abd El-Rahman et al., 2015).

ПРИПОВЕРХНОСТНЫЕ АНОМАЛИИ

В попытке сопоставить приповерхностные аномалии с тектоникой мы представляем следующие контурные карты распределения концентраций металлов на поверхности (фиг. 5). Геохимическое картографирование на площади приблизительно 2.5 км² с размерами 956 × 2660 м, выполненное с использованием программы Arc-GIS, на основе значений анализа проб из траншей и среднего значения верхнего интервала проб бурового керна (до 5 м глубиной).

ГЕОЛОГИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ том 63 № 2 2021

МАХМУД и др.

| Таблица 3. | Изменение среднего содержания элементов Au, Ag, Zn, Pb и Cu (г/т) |
|------------|---|
|------------|---|

| ii zonozan zap | iuiții)i | | | |
|------------------------|---|--|---|---|
| Участок | Западная Хамама | Центральная Хамама | Восточная Хамама | Северная Хамама |
| Координаты | X = 533700 - 534600 $Y = 2913500 - 2914000$ | X = 5347600 - 535000 $Y = 2913700 - 2914000$ | $\begin{array}{l} X = 535000 - 535900 \\ Y = 2913700 - 2914500 \end{array}$ | X = 534400 - 535000 $Y = 2914000 - 2914500$ |
| Количество образцов | <i>n</i> = 9109 | <i>n</i> = 486 | <i>n</i> = 2263 | <i>n</i> = 618 |
| Au | 0.56 | 0.09 | 0.14 | 0.014 |
| Ag | 19.66 | 3 | 6.17 | 0.64 |
| Zn | 3034.5 | 2188.4 | 8571 | 1051 |
| Pb | 758.5 | 507 | 1110 | 90 |
| Cu | 337.8 | 197.4 | 548.3 | 408 |

| Т | Боковая | вациания |
|----|---------|----------|
| 1. | роковая | вариация |

II. Вертикальная вариация

| Интервал | Приповерхностная руда | Зона окисления | Зона выщелачивания | Зона вторич- ного обогаще- ния | Первичная руда |
|----------------------------|--------------------------|-----------------|--------------------|--------------------------------------|-------------------|
| Высота над уровнем моря | 540—530 м | 540—490 м | 490—440 м | 440—390 м | 390-283 м |
| Количество образцов | <i>n</i> = 4579 | <i>n</i> = 6788 | <i>n</i> = 3034 | <i>n</i> = 1849 | <i>n</i> = 3033 |
| Au | 0.61 | 0.55 | 0.19 | 0.34 | 0.38 |
| Ag | 14.14 | 16 | 9 | 14.8 | 20.1 |
| Zn | 4929 | 4306 | 3151 | 3893 | 3932 |
| Pb | 1227 | 1029 | 531 | 626 | 660 |
| Cu | 524.24 | 451 | 280 | 288 | 297 |

В результате были выявлены две потенциальные аномальные зоны для Au, первая из которых расположена на Западной Хамаме (до 38.8 г/т), с самой мощной частью на восточной стороне (фиг. 5). Вторая аномалия расположена в центральной части Восточной Хамамы (до 7.8 г/т).

Также были идентифицированы две потенциальные зоны для Ag, которые совпадают с двумя аномалиями золота. Первая расположена на Западной Хамаме (до 2710 г/т), в ее центральной части. Вторая аномалия на Восточной Хамаме, с концентрацией до 253 г/т Ag.

Цинк имеет только одну крупную аномалию на Западной Хамаме с концентрациями до 37.6%. В западном участке концентрации цинка не превышают 1000 г/т, за исключением нескольких точек в центральной части Западной Хамамы.

Свинец сконцентрирован в двух аномалиях, первая из которых расположена вдоль центральной части Западной Хамамы с концентрацией свинца до 6.33% и простирается до восточной части Центральной Хамамы. Вторая аномалия расположена в центральной части Восточной Хамамы с концентрациями до 3.22%.

Крупная аномалия меди протягивается через центральную и южную части Западной Хамамы со значениями до 1.43% и простирается до восточной части Центральной Хамамы. Еще две небольшие аномалии расположены в Восточной Хамаме (до 1.51%) и в Центральной Хамаме с более низкими концентрациями до 0.74%.

В целом Восточная Хамама представляет собой главный источник для цинка, свинца и меди в районе Хамама.

ТРЕХМЕРНАЯ ИНТЕРПОЛЯЦИЯ БАЗЫ ДАННЫХ

Результаты трехмерной интерполяции базы данных по распределению металлов Au, Ag, Pb, Cu и Zn (фиг. 6, 7) на поперечных сечениях показывают, что минерализация не сгруппирована в сплошное рудное тело. Оно нарушается разнонаправленными разломами и зонами переломов. Эти разломы образовались после полного форми-



Фиг. 5. Контурные карты поверхностного распределения элементов Au, Ag, Zn, Cu и Pb. Наименования участков сокращены следующим образом: Хамама западная (X3), Хамама Центральная (XЦ), Хамама Восточная (XB), Хамама Северная (XC).

| | Cu | Cd | As | Sb | Hg | Zn | Pb | Au | Ag |
|----|------|-------|------|-------|------|------|------|-------|------|
| Cu | 1 | 0.97 | 0.87 | 0.77 | 0.5 | 0.65 | 0.53 | 0.18 | 0.17 |
| Cd | 0.97 | 1 | 0.87 | 0.73 | 0.78 | 0.9 | 0.74 | -0.16 | 0.28 |
| As | 0.87 | 0.87 | 1 | 0.66 | 0.63 | 0.8 | 0.61 | 0.06 | 0.34 |
| Sb | 0.77 | 0.73 | 0.66 | 1 | 0.7 | 0.38 | 0.87 | -0.03 | 0.61 |
| Hg | 0.5 | 0.45 | 0.36 | 0.7 | 1 | 0.17 | 0.69 | 0 | 0.65 |
| Zn | 0.65 | 0.9 | 0.8 | 0.38 | 0.71 | 1 | 0.53 | 0.21 | 0.18 |
| Pb | 0.53 | 0.74 | 0.61 | 0.87 | 0.69 | 0.53 | 1 | 0.42 | 0.47 |
| Au | 0.18 | -0.16 | 0.06 | -0.03 | 0 | 0.21 | 0.42 | 1 | 0.5 |
| Ag | 0.17 | 0.28 | 0.34 | 0.61 | 0.65 | 0.18 | 0.47 | 0.5 | 1 |

Таблица 4. Коэффициент корреляции некоторых элементов месторождения Хамама

Примечание. Заштрихованные квадраты выражают высокий коэффициент корреляции (≥0.75).

рования рудного тела и сильно изменили его конфигурацию. Ряды поперечных сечений С–Ю (фиг. 7) в западном участке иллюстрируют крутое погружение руд (со средним углом падения 55°) к югу, где вмещающими являются вулканокластические породы.

Микроскопическое исследование показывает, что пористость вулканокластических пород выше, чем базальтовых пород. Крутой наклон и высокая пористость облегчают проникновение гидротермального раствора и, соответственно, благоприятствуют богатому оруденению.

ПРОДУКТИВНОСТЬ РУДНЫХ УЧАСТКОВ

Нами определены координаты четырех участков рудного тела (Западная, Восточная, Северная и Центральная Хамама) и рассчитаны средние содержания элементов из кернов и траншей в каждом участке (см. фиг. 5 и табл. 3-I). Полученные результаты согласуются с поверхностными аномалиями. Западная Хамама является основным источником для золота (0.56 г/т) и серебра (19.66 г/т), в то время как Восточная Хамама является основным источником для цинка (8571 г/т), свинца (1110 г/т) и меди (548 г/т). Минерализация в Северной Хамаме встречается в виде зон изменения и кварцевых жил с железным блеском (спекуляритом). В этой связи Северная Хамама самая бедная.

Центральная Хамама была нарушена пострудной гранитной дайкой, что привело к отделению западного и восточного участков и, соответственно, к снижению среднего содержания всех металлов.

КОРРЕЛЯЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ

Функция корреляции является полезным индикатором прочности взаимосвязи между двумя непрерывными переменными. Тем не менее нужно опасаться простой числовой корреляции, которая может закончиться так называемой "бессмысленной корреляцией" (Yule, 1926). Более точный подход — это сочетание минералогии и геохимии, то есть сочетание классических минералогических исследований с геохимическим анализом рудного месторождения. Корреляции между различными элементами были изучены для всей популяции образцов, а также для богатых пиритом полиметаллических и окисленных руд. Значения коэффициентов корреляции Au, Ag, Cu, Pb и Zn друг с другом из общей популяции основаны на базе данных Aton Resources, тогда как другие коэффициенты корреляции основаны на выборках проб, собранных авторами (табл. 4).

Медь проявляет высокую корреляцию со многими элементами, такими как Cd, As и Sb. Сильная положительная корреляция между Cd и Cu (r=0.97) отражает тесную связь Cd с медьсодержащими минералами (халькопиритом, ковеллином, энаргитом и борнитом). Сурьма обнаружена в виде мелких включений тетраэдрита в пирите, халькопирите и арсенопирите.

Несмотря на то что кадмий обнаружен в низких концентрациях, он появляется в металлической форме гринокита в полиметаллических образцах и в качестве обычного включения в большинстве сульфидных фаз, таких как сфалерит, халькопирит, арсенопирит и энаргит.

Мышьяк демонстрирует хорошую корреляцию со многими другими элементами (Cu, Cd и Zn), что можно объяснить тем, что он представлен во многих минералах, включая арсенопирит и энаргит, а также в виде включений в сфалерите.

Сурьма демонстрирует сильную корреляцию с медью, так как она обнаружена в виде примеси халькостибита (CuSbS₂), фаматинита (Cu₃SbS₄) и тетраэдрита (Cu, Fe)₁₂Sb₄S₁₃, в пирите, арсенопирите и халькопирите. Сильная корреляция Sb с Pb



Фиг. 6. а - 3D-модель распределения золота на Западной Хамаме, б - набор сечений в 3D-модели (Au > 1 г/т).



Фиг. 7. Разрезы центральной части Западной Хамамы, с контурами распределения элементов: Аu, Ag, Cu, Pb и Zn.

указывает на тесную связь галенита и стибнита и их продуктов окисления, где они прочно связаны друг с другом в зоне окисления, в окисленном пирите. Корреляция между Sb и Ag может быть объяснена тем фактом, что они находятся вместе в тетраэдрите.

Цинк показывает сильную корреляцию с кадмием. Анализ EDX показал, что большинство сфалеритов содержат заметные количества кадмия (до 0.99 мас. % в образце АНА-090), что является характерным для сфалеритов (Schwartz, 2000).

Между металлами Cu, Zn, Pb не фиксируется высокий коэффициент корреляции, потому что эти металлы находятся в различных минералах.

Высокие положительные межэлементные корреляции между Pb, Cd, As, Sb и Hg (табл. 4) отражают тесную связь арсенопирита, эниргита, стибнита, гринокита и галенита в полиметаллическом типе руды.

Ртуть демонстрирует положительную корреляцию с большинством элементов, что может быть связано с ее объединяющим характером, но, при этом, она показывает отрицательную корреляцию с золотом, поскольку золото в основном связано с пиритом.

Золото не коррелирует с большинством элементов, за исключением умеренной корреляции с серебром и слабой корреляции со свинцом, медью, железом и цинком, что указывает на его связь с сульфидами основных металлов, как в полиметаллической, так и в пиритной руде. Чтобы исследовать связи золота в основных минералах породы (кварц и карбонаты), мы сопоставили Аи с основными элементами, такими как Fe, Ca, Si и Mg. Обычно оксиды не коррелируют с микроэлементами, потому что основные элементы не имеют дискретных факторов, контролирующих их изменение в качестве микроэлементов. Тем не менее некоторые микроэлементы могут проявлять некоторые склонности к конкретным основным оксидам, как об этом свидетельствует минералогическое изучение (микроскопическое и EDX). Золото демонстрирует наилучшую корреляцию с Fe_2O_3 (r = 0.23), которую подтверждают электронно-микроскопические и EDX-исследования — микрочастицы золота внедряются в кристаллическую решетку пирита и переосаждаются после разрушения этой решетки во время окисления (Mahmoud et al., 2018). Кроме того, золото демонстрирует отрицательную корреляцию с СаО и MgO (r = -0.18 и -0.29 соответственно), что свидетельствует о том, что карбонизация наложена на сульфидную минерализацию, что привело к снижению содержаний металлов.

Теллур очень редкий. Он встречается только в виде включений в киновари, сфалерите и редко в самородном серебре. Он показывает небольшую корреляцию с Zn (r = 0.44), Hg (r = 0.26) и Fe₂O₃ (r = 0.23), которая подтверждается результатами EDX.

выводы

1. Месторождение Хамама — крупномасштабный пример очень распространенных неисследованных месторождений в центральной части Восточной Пустыни Египта. Оно расположено вдоль контакта базальтовых пород с их вулканокластическими разностями.

2. Форма рудных тел — штокверковая или в виде зон рассеянной вкрапленности. Руды массивные и полумассивные. Распределение элементов и минералогические характеристики подтверждают вертикальную зональность месторождения. Уверенно выделяются четыре зоны: а) зона первичной руды, обогащенная пиритом, сфалеритом и галенитом; б) зона вторичного обогащения, которая характеризуется обилием вторичной сульфидной минерализации и медных минералов; в) зона выщелачивания с резким истощением металлов, обилием фрамбоидов пирита с низким содержанием сфалерита; г) зона окисления, где пирит окислился до оксидов и гидроксидов железа.

3. Рудные минералы на месторождении Хамама составляют 5–30% по объему, с преобладанием минеральных фаз железа. В металлических минеральных комплексах преобладают пирит (40–90%), сфалерит, галенит, халькопирит и редкие акцессорные минералы – ковеллин, борнит, энаргит, акантит, гринокит и тетраэдрит с минералами кварца, карбонатов, барита, хлорита. Полиметаллическая руда богаче золотом и серебром, чем руда, обогащенная пиритом.

4. Зона окисления содержит отличное самородное золото и серебро. Накопление золота происходило в результате гипергенного изменения и окисления пирита, содержавшего золото в виде изоморфной примеси, с его дальнейшим укрупнением при эпигенетических процессах. Зона окисления, особенно верхние 10 м, содержит отличные Au и Ag, которые образуются в результате процессов гипергенного обогащения.

5. При организации работ по добыче Au, Ag и других металлов на месторождении Хамама рекомендуется первоначально заложить карьер на оксидной шляпе на западном участке. При необходимости в добыче Cu, Zn и Pb — открыть карьер на восточном участке.

6. Мы также рекомендуем Aton Resources провести дополнительную проверку содержаний Au в железистых туфах в юго-восточной части района Хамама из-за выявленной аномалии в восточной зоне на основе образца H-62 (табл. 1), где получено 0.512 г/т Au.

2021

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Смирнов С.С. Зоны окисления сульфидных месторождений. Изд. АН СССР, 1955.

Abdeen M.M., Greiling R.O. A quantitative structural study of late PanAfrican compressional deformation in the Central Eastern Desert (Egypt) during Gondwana assembly // Gondwana Res. 2005. V. 8. P. 457–471. https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)71148-5

Abd El-Rahman Y.A., Surour A.A., El-Manawi A.H.W., El-

Dougdoug A.-M.A., Omar S. Regional setting and characteristics of the Neoproterozoic Wadi Hamama Zn–Cu–Ag– Au prospect: evidence for an intra-oceanic island arc-hosted volcanogenic hydrothermal system // Int. J. Earth Sci. 2015. V. 104. No. 3. P. 625–644.

https://doi.org/10.1007/s00531-014-1093-7

Abd El-Rahman Y.A., Surour A.A., El-Manawi A.H.W., Rifai, M., Motelib A.A., Ali W.K., El-Dougdoug A.M. Ancient mining and smelting activities in the Wadi Abu Gerida Area, Central Eastern Desert, Egypt: Preliminary Results // Archaeometry. 2012. V. 55. №. 6. P. 1067–1087.

https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2012.00728.x

Abd El-Wahed M.A., Kamh S.Z. Pan African dextral transpressive duplex and flower structure, Central Eastern Desert, Egypt // Gondwana Res. 2010. V. 18. Is. 2–3 P. 315–336.

https://doi.org/10.1016/j.gr.2010.02.007

Aton Resources. For immediate release, Aton begins Remote Sensing and Spectral Imaging survey over its 40km gold mineralized Abu Marawat concession to further define its multiple exploration sites in this mining district 2016 // Company report: https://www.atonresources.com/site/assets/files/1197/aton-resources-inc-press-release-remotesensing-aug-29-2016-1.pdf

Aton Resources. Hamama west deposit, Abu Marawat concession, Arab Republic of Egypt, 2017, NI 43-101 // Company report: https://www.atonresources.com/site/assets/ files/1172/hamama_west_jan2017_ni43101tr_v3_final.pdf Aton Resources. High Grade Gold-silver-Zinc Oxide Mineralization From Channel Sampling Of Excavated Road Cuttings At Hamama East. 2018 // Electronic report: VANCOUVER, British Columbia. Company report: https:// www.atonresources.com/news/2018/aton-announces-high-grade-gold-silver-zinc-oxide-mineralization-from-channel-sampling-of-excavated-road-cuttings-at-hamama-east/

Conoco C. Geological map of Egypt: Qusier Quadrangle, scale 1 : 500000. The Egyptian General Petroleum Corporation, 1987.

El-Gaby S., List F.K., Tehrani R. Geology, evolution and metallogenesis of the Pan-African Belt in Egypt // El-Gaby S., Greiling R.O. (Eds.). The Pan-African belt of Northeast Africa and Adjacent Area. Braunschweig/Wiesbaden: Friedr Viewegsohn, 1988. P. 17–68.

Halbach P., Pracejus B., Maerten A. Geology and mineralogy of massive sulfide ores from the central Okinawa trough, Japan // Econ. Geol. 1993. V. 88. P. 2210–2225. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.88.8.2210

Mahmoud A.S., Dyakonov V.V., Dawoud M.I., Kotelnikov A.E. Mineral composition, textures and gold habit of the Hamama mineralizations, central Eastern Desert of Egypt // RUDN J. of Engineering researches. 2018. V. 19. №. 4. P. 391—401. https://doi.org/10.22363/2312-8143-2018-19-4-537-551

Rickard D.T. Kinetics of pyrite formation by the H_2S oxidation of iron (II) monosulfide in aqueous solutions between 25 and 125°C: The rate equation // Geochim. Cosmochim. Acta. 1997. V. 61. P. 115–134.

https://doi.org/10.1016/S0016-7037(96)00321-3

Schwartz M.O. Cadmium in zinc deposits: economic geology of a polluting element // International Geology Review. 2000. V. 42. №. 5. P. 445–469.

https://doi.org/10.1080/00206810009465091

Yule G.U. Why do we sometimes get nonsense-correlations between Time-Series? A study in sampling and the nature of time-series // J. of the royal statistical society. 1926. V. 89. N_{\odot} . 1. P. 1–63.