

## Исследование содержания золота и платины в руде месторождения Мако (Сенегал)

|                     |              |                                                                    |                                                                                                         |
|---------------------|--------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Сабухи И. Нифталиев | <sup>1</sup> | <a href="mailto:sabukhi@gmail.com">sabukhi@gmail.com</a>           |  0000-0001-7887-3061 |
| Ирина В. Кузнецова  | <sup>1</sup> | <a href="mailto:kuznetsovaiv@mail.ru">kuznetsovaiv@mail.ru</a>     |  0000-0001-6666-6292 |
| Виктор М. Ненахов   | <sup>2</sup> | <a href="mailto:nenakhov@geol.vsu.ru">nenakhov@geol.vsu.ru</a>     |  0000-0003-1439-0970 |
| Амаду Диалло        | <sup>3</sup> | <a href="mailto:amadiallo91@gmail.com">amadiallo91@gmail.com</a>   |  0009-0007-4339-2744 |
| Елена М. Горбунова  | <sup>1</sup> | <a href="mailto:lobanova8686@gmail.com">lobanova8686@gmail.com</a> |  0000-0002-3550-0115 |
| Валерия Р. Губанова | <sup>1</sup> | <a href="mailto:lerchonok.99@mail.ru">lerchonok.99@mail.ru</a>     |  0009-0002-0350-504X |

1 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

2 Воронежский государственный университет, Университетская площадь, 1 г. Воронеж, 394018, Россия

3 Ивановский государственный химико-технологический университет, пр. Шереметевский, 7, Иваново, 153000, Россия

**Аннотация.** Статья посвящена проблеме определения золота и платины в руде Сенегальского месторождения. Проведено исследование содержания золота и платины в рудах месторождения Мако (Сенегал) для оценки потенциала этого месторождения для дальнейшей добычи и переработки. В работе использовались методы геохимического анализа, включая геохимию образцов, рентгеновскую дифракцию и спектральный анализ, а также геофизические методы. При нагревании руды до 1250 °C был обнаружен только один эндотермический эффект (571,14–593,31 °C), сопровождающийся небольшой потерей массы. Измельчённую руду разделили на 5 фракций гравитационным методом. В тяжёлой фракции были обнаружены магнитные и немагнитные материалы. Промышленный продукт содержит только немагнитные материалы. Лёгкая фракция представляет собой глину. Кремнезём был обнаружен во фракции с размером частиц более 0,5 мм. Содержание металлов определялось методом атомно-абсорбционной спектроскопии. Перед измерением содержания металлов в растворах были проведены контрольные измерения содержания золота в стандартном растворе. В каждой фракции исследуемой руды были обнаружены и золото, и платина. Наибольшее количество золота и платины содержится в глинистой фракции (0,5 и 25,7 г/т соответственно). Наименьшее количество — в лёгкой фракции (0,065 и 0,26 г/т). Количество платины превышает содержание золота в продуктах гравитационного обогащения. Сделаны выводы о присутствии золота в руде в тонкодисперсном состоянии. Традиционный метод цианидного обогащения драгоценных металлов не подходит для выделения тонкодисперсного золота. Необходим поиск новых альтернативных, инновационных методов обогащения сенегальской руды.

**Ключевые слова:** золото, платина, атомно-адсорбционный анализ, руда, термический анализ, гравитационный метод.

## Investigation of gold and platinum in ore from Mako deposit (Senegal)

|                      |              |                                                                    |                                                                                                           |
|----------------------|--------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sabukhi I. Niftaliev | <sup>1</sup> | <a href="mailto:sabukhi@gmail.com">sabukhi@gmail.com</a>           |  0000-0001-7887-3061 |
| Irina V. Kuznetsova  | <sup>1</sup> | <a href="mailto:kuznetsovaiv@mail.ru">kuznetsovaiv@mail.ru</a>     |  0000-0001-6666-6292 |
| Victor M. Nenakhov   | <sup>2</sup> | <a href="mailto:nenakhov@geol.vsu.ru">nenakhov@geol.vsu.ru</a>     |  0000-0003-1439-0970 |
| Amadou Diallo        | <sup>3</sup> | <a href="mailto:amadiallo91@gmail.com">amadiallo91@gmail.com</a>   |  0009-0007-4339-2744 |
| Elena M. Gorbunova   | <sup>1</sup> | <a href="mailto:lobanova8686@gmail.com">lobanova8686@gmail.com</a> |  0000-0002-3550-0115 |
| Valeria R. Gubanova  | <sup>1</sup> | <a href="mailto:lerchonok.99@mail.ru">lerchonok.99@mail.ru</a>     |  0009-0002-0350-504X |

1 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, 394036, Russia

2 Voronezh State University, Universitetskaya pl., 1, Voronezh, 394018, Russia

3 Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetievskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia

**Abstract.** A study of the gold and platinum content in the ores of the Mako deposit (Senegal) was conducted to assess the potential of this deposit for further extraction and processing. The work used methods of geo-chemical analysis, including geochemistry of samples, X-ray diffraction and spectral analysis, as well as geophysical methods. When the ore was heated to 1250 °C, only one endothermic effect was found (571.14–593.31 °C), accompanied by a slight loss of mass. Ground ore was divided into 5 fractions by the gravitational method. Magnetic and non-magnetic materials found in the heavy fraction. The industrial product contains only non-magnetic materials. The light fraction is clay. The silica was found in the fraction with a particle size of more than 0.5 mm. The metal content was determined by atomic absorption method. Before measuring the metal content in solutions, control measurements of the gold content in the standard solution were carried out. In each fraction of the studied ore, both gold and platinum were found. The largest amount of gold and platinum is in the clay fraction (0.5 and 25.7 g / t, respectively). The smallest - in the light fraction (0.065 and 0.26 g / t). The amount of platinum exceeds the gold content in the products of gravity separation. Conclusions are drawn about the presence of gold in the ore in a finely divided state. The traditional method of cyanide separation of precious metals is not suitable for the isolation of finely divided gold. A search is needed for new alternative, innovative methods for the separation of Senegal ore.)

**Keywords:** vibrational spectra, molecular structure, electron diffraction analysis, quantum-chemical calculations.

### Для цитирования

Нифталиев С.И., Кузнецова И.В., Ненахов В.М., Диалло А., Горбунова Е.М., Губанова В.Р. Исследование содержания золота и платины в руде месторождения Мако (Сенегал) // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 2. С. 126–131. doi:10.20914/2310-1202-2025-2-126-131

### For citation

Niftaliev S.I., Kuznetsova I.V., Nenakhov V.M., Diallo A., Gorbunova E.M., Gubanova V.R. Investigation of gold and platinum in ore from Mako deposit (Senegal). Vestnik VGUI [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 2. pp. 126–131. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-2-126-131

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

## Введение

Западная Африка обладает большим запасом полезных ископаемых, таких как фосфаты, золото, циркон, известняк, платина, железная руда. Согласно исследованиям авторов [1–7], данные, собранные в Западной Африке, подчеркивают разнообразную природу орогенных месторождений золота. Данные типы рудного месторождения могут образовываться из различных источников флюидов, как метаморфических, так и магматических.

Сабодальское месторождение золота восточной части Сенегала было открыто французским институтом геологических и горных исследований (BRGM) в 1961 году. Это месторождение находится на поясе Мако Гринстоун, в западной части Биримианской золотой провинции [8].

Золотоносные руды восточной части Сенегала состоят из известняков, перекрытых более молодыми осадочными породами, которые включают арсенит и алевролит. Основная часть рудного запаса размещается в пределах зоны распространения хрупкого и пластичного растяжения в поперечном направлении шириной от 10 до 50 м, определяемой как зона сдвига Садиола [8, 9].

Многие структурные и технологические особенности руд в настоящее время являются предметом интенсивного изучения [10–14]. В области технологии учитываются как традиционные подходы (цианирование [15]), так и перспективные инновационные способы извлечения золота с помощью биотехнологии [16,17]; гидрохлорирования [18]. Авторы [19, 20] рассматривают ряд металлургических процессов по извлечению платиновых металлов. Отмечается, что такие методы, как обжиг и выщелачивание руды под давлением являются капиталоемкими и экологически вредными. и механизмы кислотно-го выщелачивания вышеупомянутых платиносодержащих минералов варьируются и могут быть улучшены путем изменения условий выщелачивания или предварительной обработки руд / концентратов (например, механической активации). Тем не менее, минералогия каждого месторождения ставит свои собственные задачи, связанные с уникальной структурой руды.

Однако потенциал добычи золота и благородных металлов в основном используется недостаточно [15].

В связи с этим актуальным является исследование состава руды Сенегала с целью определения содержания в ней благородных металлов Au, Pt для выбора метода их извлечения.

## Материалы и методы

Руда была предварительно измельчена на щековой и валковой дробилке золотодобывающего предприятия «Toro gold» Сенегала. Конечный диаметр измельчения частиц пробы 0,074 мм, конечный вес пробы 435 г.

Термический анализ образца был проведен при нагревании до 1250 °С в алюминиевых тиглях со скоростью 10 К/мин. в атмосфере азота на приборе синхронного термического анализа Netzsch STA 449 F1 Jupiter.

Измельченную руду разделили на 5 фракций гравитационным методом на концентрационном столе (рисунок 1).

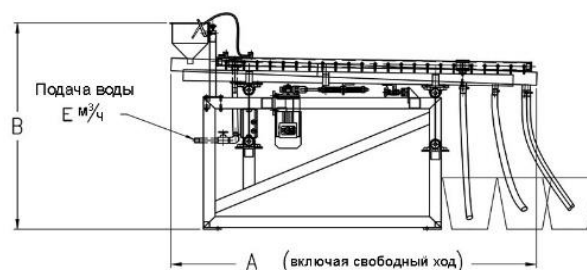


Рисунок 1. Концентрационный стол "ДЖЕМЕНИ"

Figure 1. Concentration table "JAMENI"

Концентрационный стол предназначен для мокрого гравитационного обогащения и имеет двойную зеркально отображенную поверхность для сепарации. С одного конца подается молотая руда, она движется по направлению к разгрузочному краю деки с помощью возвратно-поступательных движений, создаваемых приводом. На каждой половине деки разгружаются 4 фракции: суперконцентрат, концентрат, промпродукт и хвосты. Большая часть воды разгружается во фракцию с хвостами. На деке имеются желобки, в которых задерживаются частицы золота и направляются в прилегающие концентратные желобки, лежащие вдоль каждой половины деки. Каналы расположены на концах каждого концентратного желобка, и разгрузка осуществляется в продуктовые коробки.

Минералогический состав продуктов обогащения определяли методом оптической микроскопии (микроскоп «Olympus»).

Содержание металла в каждой фракции определялось атомно-абсорбционным методом с помощью атомно-абсорбционного спектрометра «КВАНТ-Z.ЭТА-1».

Помимо стандартных калибровочных процедур перед измерением содержаний золота в растворах были проведены контрольные

измерения содержания золота в растворе эталона. Эталонные образцы готовили растворением золота или платины в царской водке для получения растворов с концентрацией 51–55 мкг/л. Замеры на эталоне показали высокую воспроизводимость результатов, низкий показатель среднего квадратичного отклонения (СКО) менее 2,0 и его малую ошибку (ОСКО 3,5%), что указывает на высокую надежность измерений.

### Результаты и обсуждение

По данным термического анализа в интервале температур 571.14–593.31 °С присутствует небольшой эндотермический эффект ( $q = 1,409$  Дж/г) с малой потерей массы 0,06%, соответствующий процессу разложения материалов (удаление остаточной влаги, органики и др.). Больше никаких эффектов при нагревании руды до 1250 °С не обнаружено (рисунок 2).

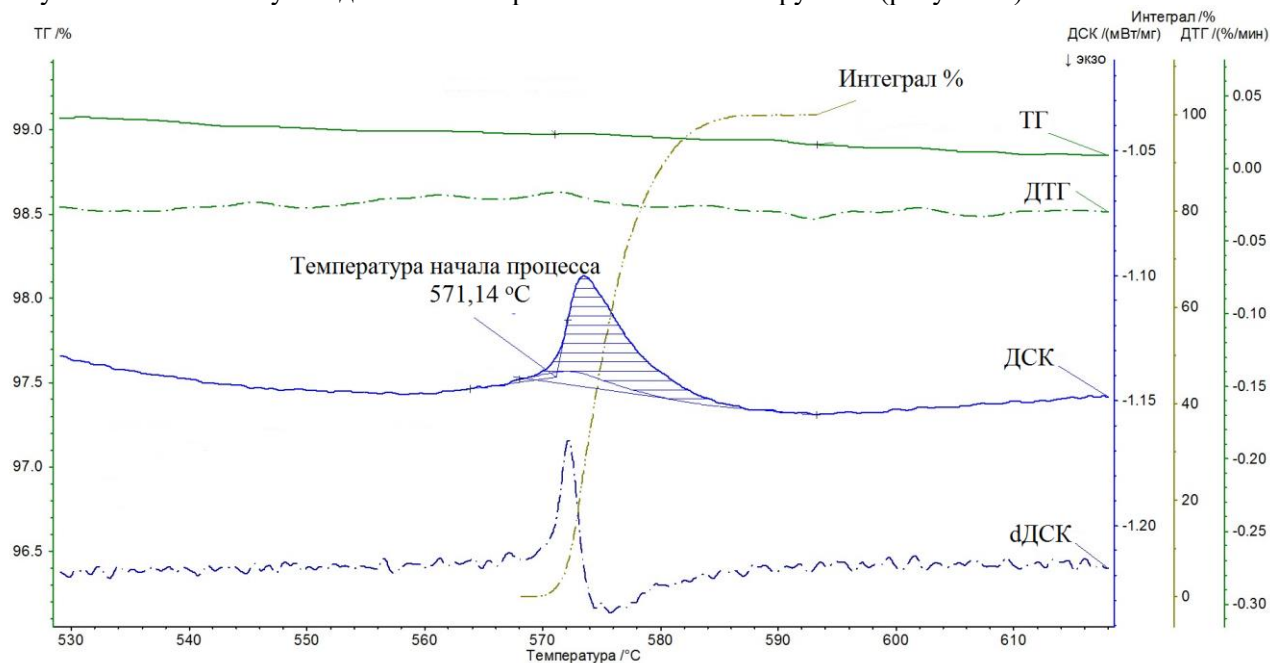


Рисунок 2. Термический анализ руды

Figure 2. Thermal analysis of ore

В результате разделения руды гравитационным методом получили пять фракций: тяжелую фракцию черного цвета  $\omega = 1.825\%$ ; промпродукт коричневого цвета  $\omega = 11.485\%$ ; легкую фракцию белого цвета  $\omega = 32.388\%$ ; глинистую  $\omega = 17.629\%$ ; фракцию с размером частиц больше 0.5 мм  $\omega = 36.673\%$ .

По результатам оптической микроскопии в состав руды входят следующие минералы:

циркон  $ZrSiO_4$ ; апатит  $Ca_5(PO_4)_3(OH, Cl, F)$ ; рутил  $TiO_2$ ; алюмосиликат  $Al_2 Si_3 O_5$ ; магнетит  $Fe_3 O_4$ ; железосодержащие минералы  $FeTiO_3$ ;  $Cr[FeAl]_2 O_4$ ;  $FeAl_4[SiO_4]_2 O_2(OH)_2$  (таблица 1).

Для определения содержания золота и платины атомно-адсорбционным методом каждую фракцию растворили в царской водке. Результаты анализа на содержание металлов представлены в таблице 2.

Таблица 1.

Минеральный состав продуктов обогащения на концентрационном столе "JAMENI"

Table 1.

Mineral composition of enrichment products on the concentration table "JAMENI"

| Фракционный состав руды<br>Fractional composition of ore | Минералогический состав руды<br>Mineralogical composition of the ore     |
|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Тяжелая фракция   Heavy fraction                         | Сильно магнитный минерал $Fe_3O_4$   Strongly magnetic mineral $Fe_3O_4$ |
|                                                          | Немагнитные минералы $TiO_2$ , $ZrSiO_4$ , $Ca_5(PO_4)_3(OH, Cl, F)$     |
|                                                          | Non-magnetic minerals $TiO_2$ , $ZrSiO_4$ , $Ca_5(RO_4)_3(OH, Cl, F)$    |
|                                                          | Электромагнитные минералы $FeTiO_3$ , $Cr[FeAl]_2 O_4$                   |
| Промпродукты   Industrial products                       | Немагнитные минералы $SiO_2$ , $ZrSiO_4$ , $Ca_5(PO_4)_3(OH, Cl, F)$     |
|                                                          | Non-magnetic minerals $SiO_2$ , $ZrSiO_4$ , $Ca_5(RO_4)_3(OH, Cl, F)$    |
| Легкая фракция   Light fraction                          | Глина   Clay                                                             |
| Фракция > 0,5 мм   Fraction > 0.5 mm                     | Кристаллы $SiO_2$   $SiO_2$ crystals                                     |

Таблица 2.

Результаты анализа на содержание золота и платины в продуктах обогащения

Table 2.

The results of the analysis for the content of gold and platinum in the products of enrichment

| Фракционный состав руды<br>Fractional composition of ore | Масса вещества, г<br>Weight of substance, g | Объем раствора царской<br>водки, мл   Volume<br>of tsar's vodka solution, ml | Au, мкг/л | Pt, мкг/л | Au, г/т | Pt, г/т |
|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|---------|---------|
| Тяжелая фракция   Heavy fraction                         | 3.00                                        | 15                                                                           | 39.900    | 225.000   | 0.200   | 1.120   |
| Промпродукт                                              | 0.94                                        | 5                                                                            | 29.900    | 55.700    | 0.160   | 0.300   |
| Легкая фракция                                           | 0.60                                        | 3                                                                            | 104.210   | 514.100   | 0.520   | 25.700  |
| Промпродукты   Industrial products                       | 1.00                                        | 3                                                                            | 92.311    | 514.100   | 0.270   | 15.420  |

Наибольшее количество золота и платины обнаружено в легкой фракции (0.52 и 25.7 г/т), наименьшее – в промпродуктах (0.16 и 0.30 г/т). Платина присутствует в каждой фракции исследуемой руды в количествах, превышающих содержание золота. Заметное количество частиц металла представлено в тонкодисперсном состоянии, так как находится в легкой фракции в больших количествах, чем в тяжелой фракции и промпродуктах.

Известно, что высокая удельная поверхность глин (каолинов), входящих в состав легкой фракции, способствует сорбции мелкодисперсного золота с формой частиц предположительно в виде тонких пластин. Этот факт существенно

усложняет возможность извлечения золота традиционной технологией цианирования [10]. Для выделения золота и платины из руды Сенегала необходимо тонкое измельчение материала и применение новых технологий переработки руды.

### Заключение

Проведен физико-химический анализ руды месторождения Мако (Сенегал). Определен минералогический и фракционный состав. Легкая глинистая фракция содержит наибольшее количество золота и платины по сравнению с тяжелой фракцией и промпродуктом. Для извлечения драгоценных металлов из руды необходимо использование новых инновационных технологий.

### Литература

- 1 Lawrence D., Treloar P., Rankin A. The geology and mineralogy of the Loulo mining district, Mali, West Africa: Evidence for two distinct styles of orogenic gold mineralization // *Economic Geology*. 2013. V. 108. № 2. P. 199–227. doi: 10.2113/econgeo.108.2.199
- 2 Treloar P.J., Lawrence D.M., Senghor D., Boyce A. et al. The Massawa gold deposit, Eastern Senegal, West Africa: an orogenic gold deposit sourced from magmatically derived fluids? // *Geological Society of London, Special Publications*. 2016. V. 393. № 1. P. 135–160. doi: 10.1144/SP393.12
- 3 Masurel Q., Miller J.M., Hein K.A., Hanssen E. et al. The Yatela gold deposit in Mali, West Africa: The final product of a long-lived history of hydrothermal alteration and weathering // *Journal of African Earth Sciences*. 2016. V. 113. P. 73–87. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2015.10.006
- 4 Lebrun E., Thébaud N., Miller J. et al. Mineralisation footprints and regional timing of the world-class Siguiri orogenic gold district (Guinea, West Africa) // *Miner Deposita*. 2017. V. 52. P. 539–564. doi: 10.1007/s00126-016-0684-6
- 5 Tshibubudze A., Hein K. Gold mineralisation in the Essakane goldfield in Burkina Faso, West African craton // *Ore Geology Reviews*. 2016. V. 78. P. 652–659. doi: 10.1016/j.oregeorev.2015.10.030
- 6 Lawrence D., Lambert-Smith J., Treloar P. A review of gold mineralization in Mali // *Mineral Deposits of North Africa*. 2016. P. 327–351. doi: 10.1016/j.oregeorev.2015.08.008
- 7 Goldfarb R.J., André-Mayer A., Jowitt S.M., Mudd G.M. West Africa: The World's Premier Paleoproterozoic Gold Province // *Economic Geology*. 2017. V. 112. № 1. P. 123–143. doi: 10.2113/econgeo.112.1.123
- 8 Sylla S., Gueye M., Ngom P. New Approach of Structural Setting of Gold Deposits in Birimian Volcanic Belt in West African Craton: The Example of the Sabodala Gold Deposit, SE Senegal // *International Journal of Geosciences*. 2016. V. 7. № 5. P. 440–458. doi: 10.4236/ijg.2016.73034
- 9 Masurel Q., Thébaud N., Miller J., Ulrich S. et al. Sadiolla Hill: A world-class carbonate-hosted gold deposit in Mali, West Africa // *Economic Geology*. 2017. V. 112. № 1. P. 23–47. doi: 10.2113/econgeo.112.1.23
- 10 Комогорцев Б.В., Вареничев А.А. Проблемы переработки бедных и упорных золотосодержащих руд // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № 2. С. 204–218.
- 11 Surimbayev B., Akcil A., Bolotova L., Shalgymbayev S. et al. Processing of Refractory Gold-Bearing Sulfide Concentrates: A Review // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2023. V. 45. № 8. P. 573–591. doi: 10.1080/08827508.2023.2230344
- 12 Askarova G.Y., Shautenov M.R., Nogaeva K.A. Optimization of the combined beneficiation scheme and increase in the performance of highly efficient refractory gold-bearing ores under development // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. V. 1047. № 1. 012036. doi: 10.1088/1757-899X/1047/1/012036
- 13 Захаров Б.А., Меретуков М.А., Меретуков М.А. Золото: упорные руды. М.: Руда и Металлы, 2013. 451 с.

- 14 Кондратьева Т.Ф. Биотехнология получения благородных и цветных металлов: состояние и перспективы // Вестник биотехнологии и физико-химической биологии имени Ю.А. Овчинникова. 2009. Т. 5. № 1. С. 49–62.
- 15 Logan T.C., Seal T.S., Brierley J.A. Whole-ore biooxidation of sulfidic gold – bearing ores // *Biomining*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. P. 113–138. doi: 10.1007/978-3-540-34911-2\_6
- 16 Горланов В.В., Харламова Т.А. Интенсификация процесса выщелачивания с применением метода гидрохлорирования // Научный вестник МГТУ. 2013. № 2 (35). С. 57–63.
- 17 Mpinga Ceksteen J., Aldrich C. Direct leach approaches to Platinum Group Metal (PGM) ores and concentrates: A review // *Minerals Engineering*. 2015. V. 78. P. 93–113. doi: 10.1016/j.mineng.2015.04.015
- 18 Seisembayev R., Kozhakhmetov S., Kvyatkovsky S.A., Semenova A.S. Extraction of Gold from Refractory Gold-Bearing Ores by Means of Reducing Pyrometallurgical Selection // *Metallurgist*. 2020. V. 64. № 7-8. P. 788–795. doi: 10.1007/s11015-020-01055-z
- 19 Moh Ezeldin, Alsiddiq Osama. Determination of gold concentration in quartz rock samples by using atomic absorption spectrophotometer technique // *IJRCD*. 2015. V. 2. № 1. P. 78–80.
- 20 Grayson R.F. Fine Gold Recovery – Alternatives to Mercury and Cyanide Purpose of study // *World Placer Journal*. 2007. V. 7. P. 66–161.

## References

- 1 Lawrence D., Treloar P., Rankin A. et al. The geology and mineralogy of the Ioulo mining district, Mali, West Africa: Evidence for two distinct styles of orogenic gold mineralization. *Economic Geology*. 2013. vol. 108. no. 2. pp. 199–227. doi: 10.2113/econgeo.108.2.199
- 2 Treloar P.J., Lawrence D.M., Senghor D., Boyce A. et al. The Massawa gold deposit, Eastern Senegal, West Africa: an orogenic gold deposit sourced from magmatically derived fluids? *Geological Society of London, Special Publications*. 2016. vol. 393. no. 1. pp. 135–160. doi: 10.1144/SP393.12
- 3 Masurel Q., Miller J.M., Hein K.A., Hanssen E. et al. The Yatela gold deposit in Mali, West Africa: The final product of a long-lived history of hydrothermal alteration and weathering. *Journal of African Earth Sciences*. 2016. vol. 113. pp. 73–87. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2015.10.006
- 4 Lebrun E., Thébaud N., Miller J. et al. Mineralisation footprints and regional timing of the world-class Siguiri orogenic gold district (Guinea, West Africa). *Mineralium Deposita*. 2017. vol. 52. pp. 539–564. doi: 10.1007/s00126-016-0684-6
- 5 Tshibubudze A., Hein K. Gold mineralisation in the Essakane goldfield in Burkina Faso, West African craton. *Ore Geology Reviews*. 2016. vol. 78. pp. 652–659. doi: 10.1016/j.oregeorev.2015.10.030
- 6 Lawrence D., Lambert-Smith J., Treloar P. A review of gold mineralization in Mali. *Mineral Deposits of North Africa*. 2016. pp. 327–351. doi: 10.1007/978-3-319-31733-5\_13
- 7 Goldfarb R.J., André-Mayer A., Jowitt S.M., Mudd G.M. et al. West Africa: The World's Premier Paleoproterozoic Gold Province. *Economic Geology*. 2017. vol. 112. no. 1. pp. 123–143. doi: 10.2113/econgeo.112.1.123
- 8 Sylla S., Gueye M., Ngom P. New Approach of Structural Setting of Gold Deposits in Birimian Volcanic Belt in West African Craton: The Example of the Sabodala Gold Deposit, SE Senegal. *International Journal of Geosciences*. 2016. vol. 7. no. 3. pp. 440–458. doi: 10.4236/ijg.2016.73034
- 9 Masurel Q., Thébaud N., Miller J., Ulrich S. et al. Sadiolla Hill: A world-class carbonate-hosted gold deposit in Mali, West Africa. *Economic Geology*. 2017. vol. 112. no. 1. pp. 23–47. doi: 10.2113/econgeo.112.1.23
- 10 Komogortsev B.V., Varenichev A.A. The problems of processing poor and insistent gold-bearing ores. *Gornyy Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten*. 2016. no. 2. pp. 204–218. (in Russian)
- 11 Surimbayev B., Akcil A., Bolotova L., Shalgymbayev S. et al. Processing of Refractory Gold-Bearing Sulfide Concentrates: A Review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2023. vol. 45. no. 8. pp. 573–591. doi: 10.1080/08827508.2023.2230344
- 12 Askarova G.Y., Shautenov M.R., Nogaeva K.A. Optimization of the combined beneficiation scheme and increase in the performance of highly efficient refractory gold-bearing ores under development. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. vol. 1047. no. 1. pp. 012036. doi: 10.1088/1757-899X/1047/1/012036 (in Russian)
- 13 Zakharov B.A., Meretukov M.A. Gold: refractory ores. Moscow: Ruda i Metally, 2013. 451 p. (in Russian)
- 14 Kondratyeva T.F. Biogeotechnological obtain noble and non-ferrous metals: status and prospects. *Bulletin of Biotechnology and Physico-Chemical Biology named after Yu. A. Ovchinnikova*. 2009. vol. 5. pp. 49–62. (in Russian)
- 15 Logan T.C., Seal T.S., Brierley J.A. Whole-ore biooxidation of sulfidic gold – bearing ores. *Biomining*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. pp. 113–138. doi: 10.1007/978-3-540-34911-2\_6
- 16 Gorlanov V.V., Kharlamova T.A. Identification of the leaching process using the hydrochlorination method. *Nauchnyi Vestnik MGTU*. 2013. no. 2 (35). pp. 57–63. (in Russian)
- 17 Mpinga Ceksteen J., Aldrich C. Direct leach approaches to Platinum Group Metal (PGM) ores and concentrates: A review. *Minerals Engineering*. 2015. vol. 78. pp. 93–113. doi: 10.1016/j.mineng.2015.04.015
- 18 Seisembayev R., Kozhakhmetov S., Kvyatkovsky S.A., Semenova A.S. et al. Extraction of Gold from Refractory Gold-Bearing Ores by Means of Reducing Pyrometallurgical Selection. *Metallurgist*. 2020. vol. 64. no. 7-8. pp. 788–795. doi: 10.1007/s11015-020-01055-z (in Russian)
- 19 Ezeldin M., Osama A. Determination of gold concentration in quartz rock samples by using atomic absorption spectrophotometer technique. *International Journal of Research and Chemical Development*. 2015. vol. 2. no. 1. pp. 78–80.
- 20 Grayson R.F. Fine Gold Recovery – Alternatives to Mercury and Cyanide Purpose of study. *World Placer Journal*. 2007. vol. 7. pp. 66–161/

## Сведения об авторах

**Сабухи И. Нифталиев** д.х.н., профессор, кафедра неорганической химии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, sabukhi@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-7887-3061>

**Ирина В. Кузнецова** к.х.н., доцент, кафедра неорганической химии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, kuznetsovaiv@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-6666-6292>

**Виктор М. Ненахов** д.г.-м.н., профессор, кафедра общей геологии и геодинамики, Воронежский государственный университет, Университетская площадь, 1, г. Воронеж, 394006, Россия, nenakhov@geol.vsu.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-1439-0970>

**Амаду Диалло** аспирант, Кафедра неорганической химии, Ивановский государственный химико-технологический университет, пр. Шереметевский, 7, Иваново, 153000, Россия, amadiallo91@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0007-4339-2744>

**Елена М. Горбунова** к.х.н., доцент, кафедра неорганической химии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, lobanova8686@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-3550-0115>

**Валерия Р. Губанова** ассистент, кафедра неорганической химии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, lerchonok.99@mail.ru

 <https://orcid.org/0009-0002-0350-504X>

## Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Information about authors

**Sabukhi I. Niftaliev** Dr. Sci. (Chem.), professor, department of Inorganic chemistry and chemical technology, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, sabukhi@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-7887-3061>

**Irina V. Kuznetsova** Cand. Sci. (Chem.), assistant professor, department of Inorganic chemistry and chemical technology, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, kuznetsovaiv@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-6666-6292>

**Victor M. Nenakhov** PhD, Dr. habil. in Geol.-Min., Professor, Department of General Geology and Geodynamics, Voronezh State University, Universitetskaya pl., 1, Voronezh, 394018, Russia, nenakhov@geol.vsu.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-1439-0970>

**Amadou Diallo** Место для ввода текста., department of Inorganic chemistry, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetievskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia, amadiallo91@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0007-4339-2744>

**Elena M. Gorbunova** Cand. Sci. (Chem.), assistant professor, department of Inorganic chemistry and chemical technology, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, lobanova8686@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-3550-0115>

**Valeria R. Gubanova** assistant, department of Inorganic chemistry and chemical technology, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, lerchonok.99@mail.ru

 <https://orcid.org/0009-0002-0350-504X>

## Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

## Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

|                      |                                |                             |
|----------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| Поступила 11/04/2025 | После редакции 18/04/2025      | Принята в печать 20/04/2025 |
| Received 11/04/2025  | Accepted in revised 18/04/2025 | Accepted 20/04/2025         |