

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2021, №4, Том 13 / 2021, No 4, Vol 13 <https://esj.today/issue-4-2021.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/04NZVN421.pdf>

DOI: 10.15862/04NZVN421 (<https://doi.org/10.15862/04NZVN421>)

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Кулибали Мусса, Чекушина Т.В., Янкевский А.В. Повышение извлечения золота из бедных руд с помощью гравитации // Вестник Евразийской науки, 2021 №4, <https://esj.today/PDF/04NZVN421.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/04NZVN421.

**For citation:**

Koulibaly Moussa, Chekushina T.V., Yankevskiy A.V. (2021). Increasing gold recovery from poor ore using gravity. *The Eurasian Scientific Journal*, [online] 4(13). Available at: <https://esj.today/PDF/04NZVN421.pdf> (in Russian) DOI: 10.15862/04NZVN421.

УДК 622.772

### Кулибали Мусса

ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов», Москва, Россия  
Аспирант департамента недропользования и нефтегазового дела

E-mail: [mouskoul88@mail.ru](mailto:mouskoul88@mail.ru)

РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=938862](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=938862)

### Чекушина Татьяна Владимировна

ФГБУН «Институт проблем комплексного освоения недр имени академика  
Н.В. Мельникова Российской академии наук», Москва, Россия  
Ведущий научный сотрудник отдела горной экологии

ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов», Москва, Россия  
Доцент департамента недропользования и нефтегазового дела

Доктор экономических наук, кандидат технических наук

E-mail: [council-ras@bk.ru](mailto:council-ras@bk.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9261-1105>

РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=61549](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=61549)

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=8848759700>

### Янкевский Алексей Владимирович

ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов», Москва, Россия  
Ассистент департамента недропользования и нефтегазового дела

Кандидат экономических наук

E-mail: [yankevsky@gmail.com](mailto:yankevsky@gmail.com)

РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=498252](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=498252)

## Повышение извлечения золота из бедных руд с помощью гравитации

**Аннотация.** В статье, рассмотрены вопросы повышения эффективности добычи золотосодержащих руд из бедных руд с помощью гравитации при использовании комбинированных геотехнологий на руднике Сигири (Республика Гвинея). Золото, извлекаемое гравитацией (GRG), определяется как золото, присутствующее в частице в достаточных количествах, чтобы его можно было избирательно извлекать из пустой породы гравитационными методами. Так как по запасам золота Гвинея входит в десятку лидеров среди стран африканского континента (2019 г. — 700000 тонн), необходимо учесть, что комплекс мероприятий для переработки руд включает связанные между собой по ходу технологического процесса модули дробления, измельчительно-гравитационный модуль, флотационный модуль и металлургический модуль, которые влияют на решение проблемы комплексного освоения

недр в общепринятом понимании и это заключается в максимальном извлечении учтенных запасов из недр и полезных компонентов из добытой руды.

Автором представлен влияние центробежный концентратор Нельсона (Knelson) на повышения степени извлечения золота из золотосодержащих бедных руд при высоких климатических условиях. Повышение добыча золота методом GRG-тест за счет разрушения структуры руды и существенно уменьшению плотности, а также увеличению раскрываемости минералов с помощью гравитацию до 63 %. таким образом оптимизация классифицируется как средне-крупнозернистое золото.

**Ключевые слова:** золото; бедные руды; гравитационные методы обогащения; комбинированная геотехнология; повышение эффективности добыча; оценка гравитационной обогатимости руды; GRG-тест; Сигири (Республика Гвинея)

### Введение

При решении вопроса о повышении эффективности добычи золотосодержащих руд из бедных руд и техногенных отходов, авторам изучали совокупные мероприятия, которые могут влиять на процессе такие как комбинирования геотехнологий и GRG-тестю. При использовании комбинированных геотехнологий на руднике Сигири, авторами проводились опытно-промышленные исследования, которые показали практически прямую зависимость степени гравитации на повышение эффективности извлечения золота из золотосодержащей руды [1; 2].

Гравитационное обогащение золотосодержащих руд — является одним из методов обогащения золотосодержащих руд, в котором минералы отделяются от пустой породы за счёт разницы их плотности и размера частиц. Это метод обогащения входит в технологическую схему получения золота из россыпных руд. Так как в россыпном золотое, золото находится в форме единого природного золота. При гравитационном обогащении проходят дополнительную доработку амальгамацией как правило, гравитационный концентратах, как и хвосты гравитации. Существует много методов гравитационного обогащения, таких как отсадочное обогащение, обогащение по центрационному столе, обогащение по винтовому сепаратору и другие. Они все практически не имеют альтернативы при переработке руд россыпных месторождений, значительно удаленных от комплекса оборудования.

В данной статье речь пойдет о составной пробе, предназначенной для проведения исследования на определение количества золота, извлекаемого гравитацией (GRG теста). Как правило (GRG теста) характеризует обогатимость руды гравитационными методами. Согласно по методике GRG-тест МакГилла — это тест на определение характеристик руды с использованием трех стадий последовательного выделения и извлечения с помощью центрифуги Кнелсон (Knelson KC-MD3) для определения гранулометрического состава GRG.

Впервые, чтобы уменьшить потери на стадии измельчения, в 1970-е годы-Байрон Кнелсон изобретает центробежный гравитационный концентратор, в котором используется процесс псевдооживленного восстановления. Это изобретение стало первым концентратором Кнелсона. позднее методика была усовершенствована компанией и центробежные гравитационные концентраторы в настоящее время являются доминирующей технологией гравитационного извлечения золота (GRG).

Knelson KC-MD3 — это математическая модель для прогнозирования гравитационного восстановления в цепи измельчения размер по размеру. для моделирования модель мы неоднократно использовалась для того, чтобы сравнить наши прогнозируемые результаты с фактическими результатами. Модель Knelson KC-MD3 позволяет нам оптимизировать гравитационную схему и в то же время также позволяет нам определить доминирующие факторы, которые влияют на гравитационные характеристики.

Для определения доли золота, извлекаемого из руды при помощи гравитации, используется центробежный концентратор Нельсона (Knelson), где по результатам пробирно-гравиметрического анализа среднее содержание золота в руде составляет 1,34 г/т [2; 3].

Таблица 1

Представление характеристика КС-MD3 [8; 9]

Модель Концентратор Кнельсон	Мощность подачи твердых частиц	Требуемая вода для флюидизации	Максимальная	Зона активного захвата	Размер подачи	Объем концентрата	Масса концентрата	Масса нетто Концентратора
КС-MD3	0–45 кг/час	0,7–4,5 л/мин	8 л/мин	48 см <sup>2</sup>	макс. 1,7 мм	58 мл	80–150 г	28 кг

Целью работы является повышение добычи золотосодержащих руд из бедных руд с помощью гравитации.

**Объектом исследований** являются рудник Сигири в Республике Гвинея, где добывают золото из золотосодержащих руд из бедных руд в сложных температурных условиях. В результате исследования показал по размерам и фракциям повышение извлечения золота до 63% с средним содержанием золота 1,9 г/т.

### Лабораторные исследования процесса методом «GRG-тест Мак Гилла»

Исследования проводились на пробе руды массой 12 кг методом «GRG-тест Мак Гилла», разработанном доктором Андре Лапланте в трех этапах. Это составная проба золотосодержащей руды предназначается для проведения GRG теста с помощью лабораторного концентратора Knelson (LKC). Интересующими свойствами являются исходное содержание золота, гранулометрическое распределение материала, а также содержание золота по классам крупности. Согласно методике проведения GRG-теста, на 1-ме этапе руду массой 12 кг раздробили SAG Mill до фракции 150 мм, а BALL Mill до крупности 100 % класса — 20 мм и дробленую руду пропускали через концентратор Нельсона [3; 7].

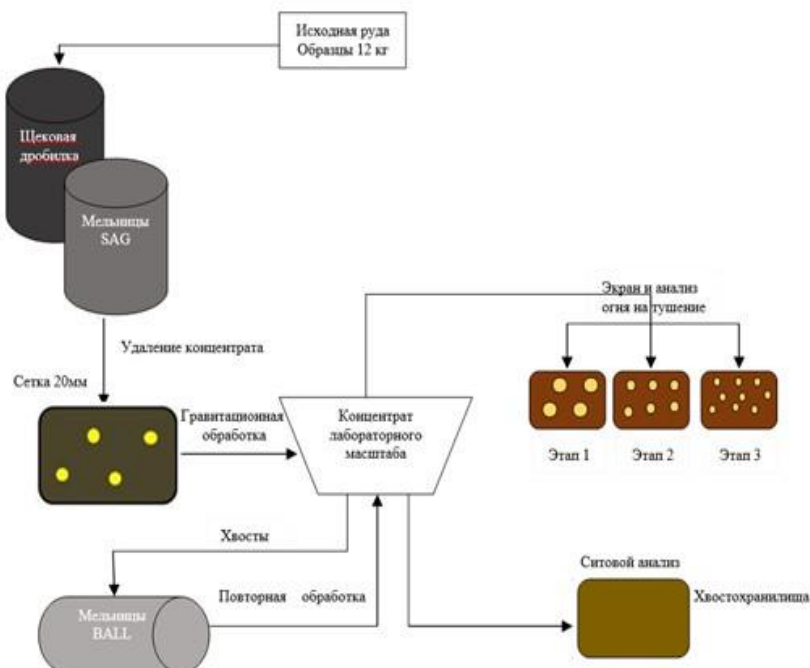
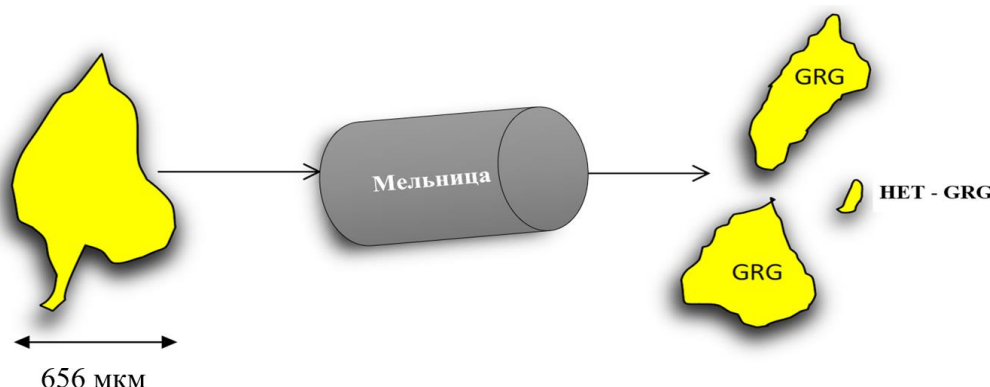


Рисунок 1. Технологическая схема проведения GRG-теста [8]

Затем хвосты первой стадии доизмельчали до крупности 80 % класса — 656 мкм и пропускали через концентратор Нельсона [5; 7]. На 3-й стадии хвосты 2-й стадии доизмельчали до крупности 80 % класса — 78 мкм (см. рис. 2).



**Рисунок 2.** Типовое доизмельчение GRG (рисунок авторов)

Во время лабораторных испытаний на всех стадиях из хвостов отбирали пробы для анализа и составления технологического баланса. Решение задачи повышения эффективности переработки руд цветных металлов, горно-химического сырья возможно с применением нового и усовершенствованного дробильно-классифицирующего оборудования [1; 4; 9].

**Таблица 2**

**Общие сведения размера помола для каждой стадии**

Размер помола		Продукт	Масса (g)	Анализ Au (%)	Единицы измерения Au (g/t)	Распределение (%)
P80 =	656 мкм	Этап 1. Конц.	85,7	0,4	184,3	38,5
		Образцы хвостов	289,5	1,2	1,1	0,7
P80 = -75 мкм =	185 мкм 54 %	Этап 2. Конц.	81,7	0,4	81,1	15,8
		Образцы хвостов	330,2	1,4	0,8	0,6
P80 =	78 мкм	Этап 3. Конц.	87,6	0,4	32,1	6,7
		Финишные хвостов	20664	95,9	0,8	36,2
		Итоги	21539	100,0	1,9	100
		Концентрат Нельсона	258,1	1,2	99,2	61

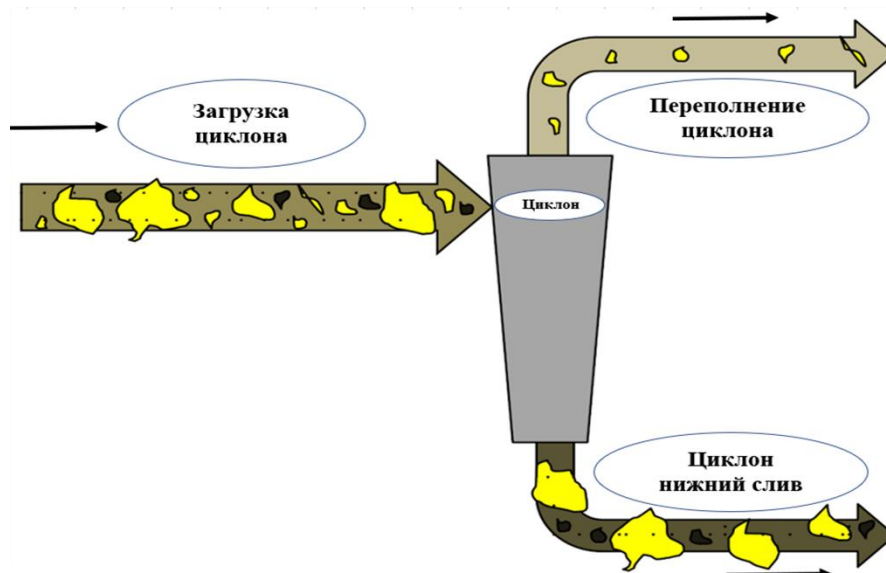
Для расчета полномасштабной гравитационной схемы (см. рис. 1) нам нужны характеристики высвобождения GRG в образце [7; 8], которые предоставляют размер по размеру на GRG, что позволяет масштабировать до полного масштаба с помощью математического моделирования.

При опытные исследования комбинированных геотехнологий на руднике Сигири, авторы заметили, что GRG тест в непрерывном замкнутом контуре измельчения, заканчивается в одном из трех мест:

- присутствует контур силы тяжести, он восстанавливается под действием силы тяжести;
- Он выходит через перелив циклона в соответствии с разделительной кривой GRG циклона;
- также из него получается золото, не содержащее GRG.



*Рисунок 3. Технологическая схема проведения GRG-Test (рисунок авторов)*



*Рисунок 4. Представление гравитационного устройства в контуре измельчения (рисунок авторов)*

Благодаря своей высокой плотности золото ведет себя как гораздо более крупная частица (см. рис. 5), но поэтому недодроблённая фракция по классификации возвращается в нижний слив циклона в очень большой пропорции и до очень мелкого размера (см. рис. 4) это контролируется благодаря методам дискретных элементов (DEM).

Метод дискретных элементов (DEM) — это численный метод в масштабе частиц для моделирования объемного поведения гранулированных материалов (руды, порошки).

**В результате исследования:** общие сведения таблицы 1, показывает характеристики высвобождения и гравитационного извлечения золота для образца. В таблице 2 представлено совокупное процентное соотношение этапов извлечения GRG и зависимости от фракции помола для каждой стадии [6–8].

Все концентраты GRG прошли анализ по размеру, где они были скринингованы и плавлены по фракциям (см. в табл. 2).

Таблица 3

Исходные данные извлечения золота GRG (%) по этапам обогащения

Размер		Частичное извлечение GRG (%)			Общая фракция % GRG	Наклоненный GRG (%)		
сетка	мкм	этап 1	этап 2	этап 3		этап 1	этап 2	этап 3
12	1700	0,00	0,00					
16	1180	0,07	0,00		0,07	0,07	0,07	0,07
20	850	0,07	0,00	0,00	0,07	0,14	0,14	0,14
30	600	3,82	0,00	0,00	3,82	3,96	3,96	3,96
40	425	5,83	0,00	0,00	5,83	9,79	9,79	9,79
50	300	7,79	4,41	0,00	12,20	17,58	21,99	21,99
70	212	4,91	4,26	0,00	9,16	22,48	31,15	31,15
100	150	4,32	2,08	0,00	6,40	26,80	37,55	37,55
140	106	3,83	1,97	0,63	6,44	30,63	43,35	43,98
200	75	3,01	1,00	1,37	5,38	33,64	47,36	49,36
270	53	2,00	0,73	1,75	4,47	35,64	50,08	53,84
400	38	1,52	0,51	1,24	3,28	37,16	52,12	57,11
500	25	0,76	0,34	0,78	1,88	37,92	53,22	58,99
-500	-25	0,67	0,64	1,07	2,38	38,59	54,53	61,37
-600	-38	0,56	0,78	1,11	2,18	39,12	55,20	62,15
<b>Итого</b>		<b>39,16</b>	<b>16,72</b>	<b>7,95</b>	<b>63,56</b>			

Автоматический минералогический анализ сырья и хвостов выщелачивания подтвердил, что размер золота, как правило, составлял менее 106 мкм, а в основном — менее 50 мкм [7; 10]. Количество выщелачиваемого и востового золота номинально относилось к фракции — 25 мкм.

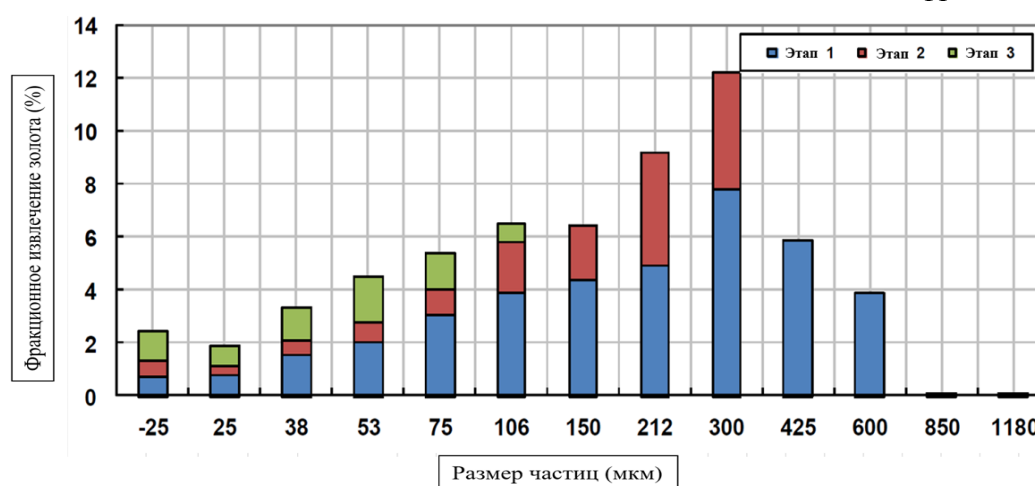
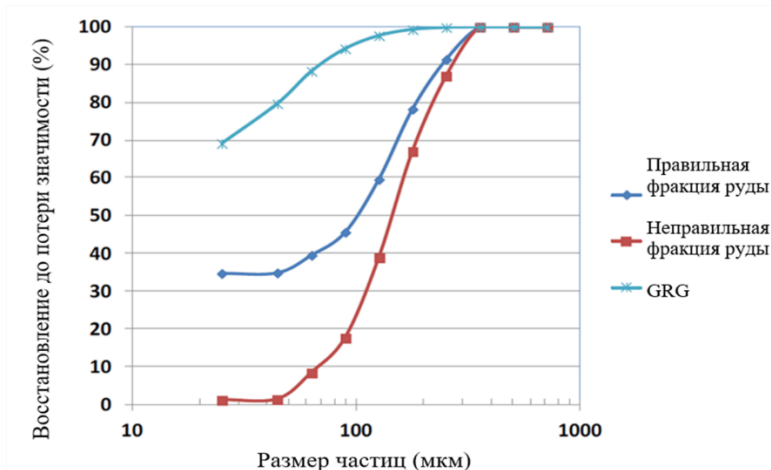


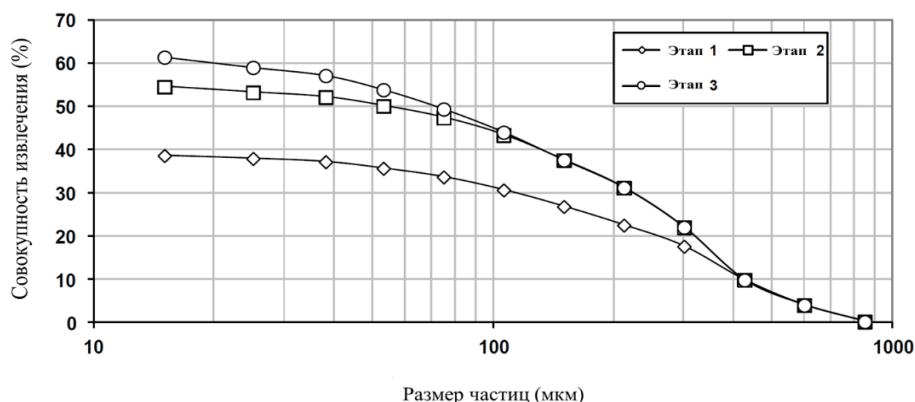
Рисунок 5. Графическое представление по индивидуальному размеру [8; 9]

Немаловажно, авторы наблюдали влияние обратного потока имеющий меньшую величину при измельчении (доизмельчении) в открытом цикле, обратный поток оказывал значительное влияние, когда мельницы работают в замкнутом цикле (см. рис. 6).



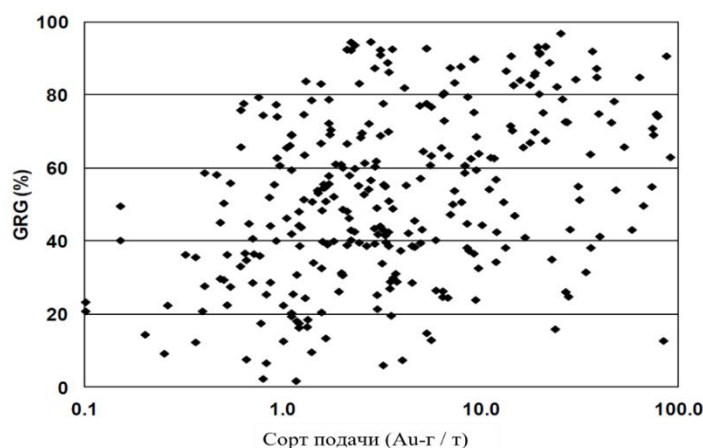
**Рисунок 6.** Представление эффективности замкнутого циклона (рисунок авторов)

На рисунке 3 мы видим эффективное измельчение в замкнутом цикле, классификация по размерам и фракцией которое повысило извлечение золота до 63 % [6; 7].



**Рисунок 7.** Совокупный размер частиц для каждого этапа (рисунок авторов)

Во время исследования было замечено что, все руды разные согласно глобальной базе данных GRG, а также есть отсутствие связи между значением GRG и классом.



**Рисунок 8.** Представление отсутствия связи между значением GRG и сортам золота (рисунок авторов)

Лабораторное исследование по шкале АМИРЫ (AMIRA P420B Gold), показывает, что измельчение на заключительной стадии P80 составляло 78 мкм, таким образом оптимизация классифицируется как средне-крупнозернистое золото [8; 9]. Классификация частиц относится к золоту, извлеченному из теста GRG, а не ко всей совокупности золота в образце.



Рисунок 9. Представление крупности по шкале АМИРЫ (рисунок авторов)

### Выводы

В результате исследования направленные на повышение эффективности добычи золотосодержащих руд из бедных показали практически прямую зависимость степени извлечения золота с помощью гравитации при использовании комбинированных геотехнологий наряду с автоматизированными минералогическими методами, как «GRG-тест МакГилла»; а также результаты «GRG-тест МакГилла» руды массой 12 кг показали, что золотосодержащая руда эффективно обогащается на центробежных концентраторах.

А также метод «GRG-тест МакГилла» показал эффективность измельчения в замкнутом цикле, который в результате показал по размерам и фракциям повышение извлечения золота до 63 %. В конце концов можно сделать вывод, что измельчение на заключительной стадии P80 составляло 78 мкм, и таким образом оптимизация классифицируется как средне-крупнозернистое золото.

### ЛИТЕРАТУРА

1. 14th International congress for applied mineralogy (ICAM 2019), Belgorod, 23–27 сентября 2019 // 14th International congress for applied mineralogy (ICAM2019). Сер. "Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences" 2019. — Белгород: Изд-во: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. С. 143–145, DOI: 10.1007/978-3-030-22974-0\_34.
2. Перспективы повышения эффективности цианирования золота с помощью инновационных реакторов в технологии кучного выщелачивания / Т.В. Чекушина, А.В. Янкевский, М. Кулибали, Э. Хаба // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2019. — № S27. — С. 3–9. — DOI: 10.25018/0236-1493-2019-7-27-3-9.
3. Янкевский, А.В. Комплекс мероприятий по повышению эффективности добычи золотосодержащих руд / А.В. Янкевский, М. Кулибали // Интернет-журнал Науковедение. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 78.
4. Перспективы комплексного использования золотосодержащего минерального сырья // А.Е. Воробьев, А.В. Янкевский, Е. В. Казакова, // Горный информационно-аналитический бюллетень, № 10, 2003. — С. 228–230.



5. Методические основы разработки технологии кучного выщелачивания золота из труднообогатимого сырья А.Е. Воробьев, М.Л. Погодин, Т.В. Чекушина // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Комбинированная геотехнология: развитие способов добычи и безопасность горных работ». — Магнитогорск: МГТУ, 2003. — С. 70–74.
6. Международная конференция "Ресурсосбережение и охрана окружающей среды при обогащении и переработке минерального сырья" (Плаксинские чтения — 2016). — г. Санкт-Петербург, 26–30 сентября 2016 г. // Материалы международной конференции: Изд-во Издательский дом "Руда и металлы" (Москва). С. 490–495.
7. Кулибали, М. Управление охраной труда и промышленной безопасностью золотодобывающей компании в Республике Гвинея / М. Кулибали // Обеспечение комплексной безопасности предприятий: проблемы и решения: сборник тезисов докладов IV международной научно-практической конференции, Рязань, 09–11 июня 2015 года. — Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет, 2015. — С. 48–50.
8. FLSmidth предлагает инновационные инженерные решения, оборудование и сервисные решения для мировой горнодобывающей и цементной промышленности. flsmidth.com /industries/mining?sort=relevanc.
9. Испытание на извлекаемое гравитацией золото (GRG), <https://www.911metallurgist.com/blog/>.
10. Геометаллургическое исследование золоторудного тела, извлекаемого гравитацией. Минералы 2018, 8(5), 186; <https://doi.org/10.3390/min8050186>.
11. Повышение полноты извлечения золота из лежалых отходов переработки золотосодержащих руд. Горлова Ольга Евгеньевна, Шадрунова Ирина Владимировна, Жилина Вера Анатольевна, Чекушина Татьяна Владимировна, известия тульского государственного университета. Науки о земле. Учредители: Тульский государственный университет (Тула) ISSN: 2218-5194, DOI: 10.46689/2218–5194-2020-1-1-193-210.
12. Интенсификация кучного выщелачивания золота из тонкодисперсных руд с использованием нанотехнологий, Воробьев А.Е., Чекушина Т.В., Каки Кристоф, Тчаро Хоноре, Воробьев К.А. горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) Учредители: Общество с ограниченной ответственностью "Горная книга" (Москва) ISSN: 0236–1493, DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-160-174.

### **Koulibaly Moussa**

Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia  
E-mail: mouskoul88@mail.ru  
RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=938862](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=938862)

### **Chekushina Tatiana Vladimirovna**

Institute for the Problems of Complex Development of Subsoil named after Academician  
N.V. Melnikov of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia  
Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia  
E-mail: council-ras@bk.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9261-1105>  
RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=61549](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=61549)  
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=8848759700>

### **Yankevskiy Alexey Vladimirovich**

Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia  
E-mail: yankevsky@gmail.com  
RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=498252](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=498252)

## **Increasing gold recovery from poor ore using gravity**

**Abstract.** The article discusses the issues of increasing the efficiency of extraction of gold-bearing ores from poor ores using gravity using combined geotechnologies at the Sigiri mine (Republic of Guinea). Gravity Recoverable Gold (GRG) is defined as gold present in a particle in sufficient quantities to be selectively recovered from waste rock by gravity methods. Since Guinea is one of the ten leaders among the countries of the African continent in terms of gold reserves (2019 — 700,000 tons), it should be taken into account that the complex of measures for ore processing includes crushing modules interconnected during the technological process, grinding-gravity module, flotation module and metallurgical a module that affects the solution of the problem of integrated development of subsoil in the generally accepted understanding and this is the maximum extraction of recorded reserves from the subsoil and useful components from mined ore. The author presents the influence of the centrifugal concentrator Nelson (Knelson) on increasing the degree of gold recovery from gold-bearing poor ores under high climatic conditions. Increase in gold production by the GRG test method due to the destruction of the ore structure and a significant decrease in density, as well as an increase in the opening of minerals using gravity up to 63 %. Thus, the optimization is classified as medium-coarse gold.

**Keywords:** gold; low-grade ores; gravity beneficiation methods; combined geotechnology; mining efficiency improvement; gravitational ore dressing assessment; GRG test; Sigiri (Republic of Guinea)