

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

2026, Том 18, № 1 / 2026, Vol. 18, Iss. 1 <https://esj.today/issue-1-2026.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/20NZVN126.pdf>

DOI: 10.15862/20NZVN126 (<https://doi.org/10.15862/20NZVN126>)

1.6.21. Геоэкология (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Ндайирагиже, А. Оценка динамики изменений окружающей среды на горнодобывающих участках Кибуйе и Музинда в коммуне Ругази / А. Ндайирагиже // Вестник евразийской науки. — 2026. — Т. 18. — № 1. — URL: <https://esj.today/PDF/20NZVN126.pdf>. — DOI: 10.15862/20NZVN126.

For citation:

Ndayiragije A. Assessment of environmental changes in the mining areas of Kibuye and Muzinda in the commune of Rugazi. *The Eurasian Scientific Journal*. 2026;18(1): 20NZVN126. Available at: <https://esj.today/PDF/20NZVN126.pdf>. DOI: 10.15862/20NZVN126. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 55

Ндайирагиже Атаназ

ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», Москва, Россия

Институт экологии

E-mail: athanasendayi1990@gmail.com; 1042245264@rudn.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1939-9389>

Научный руководитель: **Шаталов Андрей Борисович**

ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», Москва, Россия

Институт экологии

Доцент Департамента экологической безопасности и менеджмента качества продукции

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: sab150959@gmail.com; shatalov-ab@rudn.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0169-9075>

Оценка динамики изменений окружающей среды на горнодобывающих участках Кибуйе и Музинда в коммуне Ругази

Аннотация. Добыча полезных ископаемых связана с изменениями в окружающей среде.

В данной статье рассматриваются методы оценки изменений природных ландшафтов, вызванных добычей полезных ископаемых на рудниках Кибуйе и Музинда в провинции Бубанза. Наше исследование было проведено на основе обработки спутниковых изображений с использованием программ Google Earth Engine. Были рассчитаны четыре индекса, отражающие изменения в землепользовании в период с 1995 по 2020 год, а именно: BSI (Индекс голой почвы), NDVI (нормализованный разностный вегетационный индекс), NDBI (нормализованный разностный индекс застройки) и NDWI (нормализованный разностный водный индекс). Результаты расчетов показывают, что BSI варьируется от -0,006 до 0,048 для Музинды и от 0,018 до 0,052 для Кибуйе, что указывает на низкий уровень растительного покрова. Аналогичным образом, NDVI для двух участков варьируется от -0,002 до 0,031 и от 0,020 до 0,056, что свидетельствует о сильной деградации вследствие большого числа горнодобывающих предприятий. Индекс NDBI варьируется от 0,013 до 0,047 и от -0,019 до 0,046 для Кибуйе и Музинды, что указывает на то, что оба участка не являются густо застроенными. NDWI варьируется от 0,063 до -0,023 и от 0,094 до 0,026, что свидетельствует о низкой влажности на горнодобывающих участках Кибуйе и Музинда. Несмотря на то, что в Бурунди был реализован ряд инициатив, неэффективное управление окружающей средой привело к реальным изменениям на этих участках. Эта деятельность должна осуществляться в строгом соответствии

с экологическими нормами, обеспечивая защиту прибрежных сообществ, особенно в Музинде, для благополучия местного населения и страны в целом.

Ключевые слова: Бурунди; индекс растительности; модификация окружающей среды; минерализация; Ругази; добыча полезных ископаемых

Введение

Бурунди — горная страна, расположенная в районе Великих озер Африки, площадью более 27 834 квадратных километров. Страна находится к востоку от Демократической Республики Конго (ДРК), к югу от Руанды и к западу от Объединенной Республики Танзания. Методы добычи полезных ископаемых на северо-западе Бурунди варьируются в зависимости от типа руды. Наиболее распространенными являются традиционные методы, используемые со времен колониального периода. В этом секторе горнодобывающей промышленности используются традиционные инструменты, такие как факелы, кирки, лопаты, мотыги, мачете, ломы и многие другие. Этот метод имеет многочисленные последствия и опасен для здоровья человека. Кроме того, в северо-западной части страны широко распространена открытая добыча полезных ископаемых. Более того, население занимается кустарной добычей полезных ископаемых из-за возросшего спроса на минеральные ресурсы, необходимые для удовлетворения потребностей семьи и общины. Население нуждается в ресурсах для обеспечения экономического развития общины и улучшения условий жизни. Кроме того, рост поселения Хэнсин Сян привел к открытой добыче полезных ископаемых [1–3]. Эта техника используется для разработки менее глубоких месторождений, что означает, что горняки добывают руду под открытым небом. Открытая добыча полезных ископаемых часто сопряжена с авариями, обвалами, потерей земель, исчезновением видов животных и другими опасными явлениями.

Геология Бурунди состоит из чередующихся пелито-аренальных метасадочных пород мезопротерозойского возраста (1 600–1 000 миллионов лет), которые встречаются в восточной части Республики Конго, Руанде, южной части Уганды и западной части Объединенной Республики Танзания. Бурунди обладает различными полезными ископаемыми, особенно в северо-западной части страны. В этой части страны добываются такие полезные ископаемые, как золото (Au) и колтан, состоящий из колумбита и танталита (Fe, Mn) (Nb, Ta), касситерит (SnO₂) и драгоценные камни [4; 5]. Правильно организованная добыча полезных ископаемых способствует развитию страны в целом и соседних общин в частности. Напротив, ненадлежащая добыча полезных ископаемых приводит к исчезновению видов фауны и флоры и ухудшению условий жизни общины. Информация о провинции, в которой находятся эти месторождения, а также об исследуемой зоне представлена на рисунках 1 и 2.

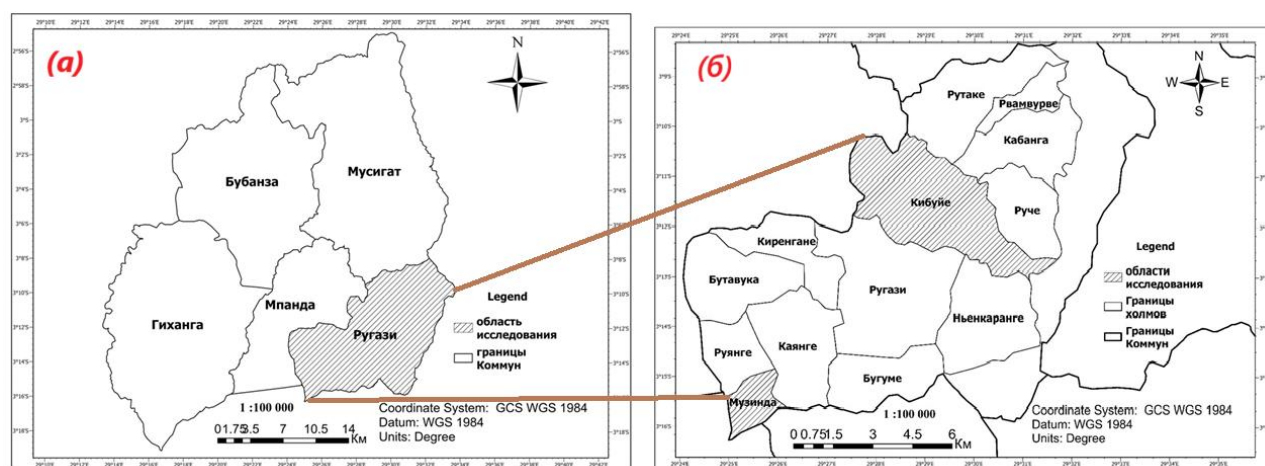


Рисунок 1. Провинция Бубанза (а) область исследования(б): коммуна Ругази (рисунок автора)



Рисунок 2. Спутниковые снимки двух горнодобывающих предприятий, взятых в качестве примеров деградации окружающей среды в северо-западной части Бурунди (а) географические координаты 3°15'21,9 «ю.ш. 29°25'41,6» в.д. в Музинде (коммуна Ругази) в провинции Бубанза, снятые 2 января 2026 года в 15:00 (б)¹. Географические координаты 3°10'40.2″S 29°28'55.1″E в Кибуйе в коммуне Ругази, снятые 4 января 2026 г. в 12:42. Два снимка (рис. 1 а, б) показывают деградацию окружающей среды в северо-западной части Бурунди в коммуне Ругази

2. Материалы и методы исследования

Основной целью этого исследования была оценка динамики изменений в окружающей среде в результате добычи полезных ископаемых, которые повлияли на природные ресурсы в период с 1995 по 2020 год. С помощью Google Maps и движка Google Планета Земля изображения сайтов Кибуйе и Музинда были обрезаны и выделены. Обработка сканов фотографий позволила рассчитать четыре индекса растительности и землепользования, такие как индекс голой почвы (BSI), индекс нормализованной разности растительности (NDVI), индекс нормализованной разности застройки (NDBI) и индекс нормализованной разности водных ресурсов (NDWI), для оценки изменений окружающей среды в период с 1995 по 2020 год.

Площадь, используемая этими двумя горнодобывающими предприятиями, составляет 98 279,32 м² для Кибуйе и 1 886 005,93 м² для Музинды (Кидидагузо), что составляет 1 984 285,25 м².

¹ Google. Muzinda [Google Maps image]. — available at: https://www.google.com/maps/place/Muzinda,+Burundi/@-3.249563,29.4317231,2207m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x19c3d55ac83ae9c7:0x4140857909e69c40!8m2!3d-3.2619682!4d29.4179214!16s%2Fm%2F047t9z7!5m1!1e2?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI2MDIyNS4wIKXMDSOASAFAw%3D%3D.

² Google. Kibuye [Google Maps image]. — available at: https://www.google.com/maps/place/Kibuye,+Burundi/@-3.193529,29.476361,164m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x19c3d40bcb86739b:0x9271d0b110b0526a!8m2!3d-3.1889872!4d29.4826804!16s%2Fg%2F11jmw506pk!5m1!1e2?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI2MDIyNS4wIKXMDSOASAFAw%3D%3D.

Индекс NDBI находится в диапазоне от -1 до +1. Отрицательное значение представляет водоемы, а положительное (высокое) значение указывает на застроенные территории. Расчетные формулы помогают нам понять оценку деградированных территорий в период с 1995 по 2020 год:

$$BSI = \frac{(SWIR + RED) - (BLUE + NIR)}{(RED + SWIR) + (BLUE + NIR)} \quad (1)$$

Индекс BSI является важным инструментом для оценки уровня оголенной почвы в определенном месте, что очень важно для мониторинга изменений почвы и растительного покрова [6]. Формула BSI (индекс оголенной почвы) приведена в уравнении (1), более высокие значения указывают на большую площадь оголенной почвы, а низкие значения — на растительный покров. BSI очень важен для выявления участков, затронутых горнодобывающей деятельностью. Таким образом, индекс BSI помогает оценить степень эрозии почв и может служить индикатором для усилий по восстановлению земель. Исследование показало, что показатель NDBI может помочь в оценке зон, которые претерпели значительные изменения в результате деятельности человека [7]. Индекс NDBI (нормализованный индекс разницы застройки) дается уравнением (2):

$$NDBI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR} \quad (2)$$

NDVI был разработан с целью мониторинга растительности и фенологии [8]. Это исследование показало, что чем выше значение NDVI, тем гуще растительность [9]. Обычно значение NDVI колеблется от -1 до 1. Если он колеблется от -0,1 до 0,1, то в этом случае наблюдаются засушливые скалы, песок и т. д., если он колеблется от 0,2 до 0,5, то наблюдается тенденция к кустарникам или лугам, а если он колеблется от 0,6 до 1, то мы находимся в зоне редкой растительности или тропического леса. Индекс растительности по нормализованной разности NDVI задается уравнением (3):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (3)$$

Значения индекса NDWI находятся в диапазоне от -1 до 1. Значения NDWI, близкие к отрицательным, указывают на сухие или деградированные горные выработки, а значения NDWI, близкие к положительным, сигнализируют о наличии воды [10]. Нормализованный индекс разницы водных поверхностей — NDWI представлен уравнением (4):

$$NDWI = \frac{(Green - NIR)}{Green + NIR} \quad (4)$$

2. Результаты исследования и их обсуждение

Для лучшей интерпретации полученные результаты представлены в таблицах 1, 2, 3 и 4.

В таблицах 1 и 3 приведены значения, тогда как в таблицах 2 и 4 представлена их научная интерпретация. Мы анализируем и интерпретируем таблицы 1 и 2, а затем таблицы 3 и 4.

В таблице 1 приведены зарегистрированные значения, а в таблице 2 — их научная интерпретация для Кибуйе. Наш анализ показал, что индекс BSI варьируется от 0,018 до 0,052, что указывает на редкую растительность на участке Кибуйе. Индекс NDVI варьируется от -0,002 до 0,031, что означает, что участок Кибуйе в коммуне Ругази интенсивно эксплуатируется из-за обилия минеральных ресурсов. Индекс NDBI варьируется от 0,013 до 0,047, что указывает на неплотную застройку участка. Индекс NDWI варьируется от 0,063 до -0,023, что свидетельствует о низкой влажности на этом горнодобывающем участке.

Таблица 1

Значения индексов BSI, NDBI, NDVI и NDWI для Кибуйе

Периоды	Площадь (area_m ²)	dBSI_mean	dBSI_stdDev	dNDBI_mean	dNDBI_stdDev	dNDVI_mean	dNDVI_stdDev	dNDWI_mean	dNDWI_stdDev
1995–2000	98279,32	0,031	0,073	0,012	0,069	0,024	0,085	-0,055	0,035
2000–2005	98279,32	0,025	0,059	0,009	0,057	0,047	0,075	-0,063	0,032
2005–2010	98279,32	0,018	0,065	-0,002	0,063	0,013	0,082	-0,023	0,027
2010–2015	98279,32	0,032	0,053	0,015	0,051	0,034	0,063	-0,061	0,024
2015–2020	98279,32	0,052	0,031	0,031	0,030	0,013	0,034	-0,048	0,027

Составлено автором на основе анализа Материалов [6; 8]³

Таблица 2

Обобщенный анализ результатов применения индексов за период с 1995 по 2020 год

индексы	Полученные средние значения	Формулы или значение	Интерпретация результатов
BSI	0,018 и 0,052	Если найденное значение > 0: голая почва Если найденное значение < 0: растительность/вода	— Рассеянная растительность или голая почва — Интенсивные изменения, связанные с эксплуатацией — Активная и плохо управляемая добыча ресурсов
NDBI	-0,002 и 0,031	> 0: застроенная территория < 0: незастроенная территория	Слегка урбанизированный участок, что указывает на небольшое количество растительности или минеральной поверхности
NDVI	0,013 и 0,047	- варьируется от -1 до +1, — отрицательные значения указывают на эксплуатируемые участки, — положительные значения указывают на растительность	Эти значения указывают на отсутствие растительности. — Практически полностью измененная площадь земель — Интенсивная эрозия почвы
NDWI	-0,063 и -0,023	— колеблется от -1 до +1 — положительные значения указывают на наличие воды, отрицательные — на отсутствие растительности	— Низкий уровень воды — Хронический дефицит воды, вызванный нерациональными методами добычи полезных ископаемых

Составлено автором на основе [6; 8]³

В таблице 3 приведены зарегистрированные значения, а в таблице 4 — их научная интерпретация для Музинда. Наш анализ показал, что индекс BSI варьируется от -0,006 до 0,048, что указывает на то, что территория Музинда покрыта редкой растительностью. NDVI варьируется от 0,020 до 0,056, что означает, что территория Музинда в коммуне Ругази

³ Muzinda [Google Maps image]. — URL: <https://www.google.com/maps/place/Muzinda,+Burundi/@-3.249563,29.4317231,2207m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x19c3d55ac83ae9c7:0x4140857909e69c40!8m2!3d-3.2619682!4d29.4179214!16s%2Fm%2F047t9z7!5m1!1e2?entry=ttu> (дата обращения: 07.04.2026).

Kibuye [Google Maps image]. — URL: <https://www.google.com/maps/place/Kibuye,+Burundi/@-3.193529,29.476361,164m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x19c3d40bcb86739b:0x9271d0b110b0526a!8m2!3d-3.1889872!4d29.4826804!16s%2Fg%2F11jmw506pk!5m1!1e2?entry=ttu> (дата обращения: 07.04.2026).

интенсивно эксплуатируется из-за ее богатых запасов полезных ископаемых. Индекс NDBI варьируется от -0,019 до 0,046, что указывает на то, что территория не является густо застроенной. Индекс NDWI варьируется от -0,094 до 0,026, что свидетельствует о низкой влажности на этой горнодобывающей территории.

Таблица 3

Значения индексов BSI, NDBI, NDVI и NDWI для Музинда

Периоды	Площадь(ар ea m2)	dBSI_mean	dBSI_st dDev	dNDBI_mean	dNDBI_s tdDev	dNDVI_mean	dNDVI_s tdDev	dNDWI_mean	dNDWI_s tdDev
1995–2000	1886005.93	0,048	0,073	0,039	0,075	0,020	0,077	-0,094	0,039
2000–2005	1886005.93	0,046	-0,019	0,046	0,048	0,056	-0,037	0,026	0,046
2005–2010	1886005.93	-0,003	0,058	-0,016	0,059	0,034	0,065	-0,026	0,024
2010–2015	1886005.93	-0,004	0,046	-0,019	0,046	0,048	0,056	-0,037	0,026
2015–2020	1886005.93	-0,006	0,033	-0,016	0,031	0,056	0,042	-0,031	0,022

Составлено автором на основе анализа Материалов [6; 8]³

Таблица 4

Обобщенный анализ результатов применения индексов за период с 1995 по 2020 год

индексы	Полученные средние значения	Формулы или значение	Интерпретация результатов
BSI	0,006 и 0,048	Если найденное значение > 0: голая почва Если найденное значение < 0: растительность/вода	— Рассеянная растительность или голая почва — Сильное антропогенное воздействие — Серьезная деградация, связанная с эксплуатацией — Неустойчивая добыча ресурсов — Добыча полезных ископаемых на действующих шахтах
NDBI	-0,019 и 0,046	> 0: застроенная территория < 0: незастроенная территория	Слегка урбанизированный участок, что указывает на небольшое количество растительности или минеральной поверхности
NDVI	0,020 и 0,056	— варьируется от -1 до +1, — отрицательные значения указывают на эксплуатируемые участки, — положительные значения указывают на растительность	— Эти значения указывают на отсутствие растительности — Серьезные изменения окружающей среды — Неэффективное и неустойчивое кустарное сельское хозяйство — Практически полностью измененная площадь земель
NDWI	-0,094 и 0,026	— колеблется от -1 до +1 — положительные значения указывают на наличие воды, отрицательные — на отсутствие растительности	— Низкий уровень воды — Горнодобывающие участки сильно нарушены в результате добычи полезных ископаемых — Очень низкая влажность и изменение состава почвы — Хронический дефицит воды, вызванный нерациональными методами добычи полезных ископаемых

Составлено автором на основе [6; 8]³

Кустарная добыча полезных ископаемых имеет серьезные последствия для окружающей среды, в частности, приводит к деградации почв, обезлесению и экологическим изменениям [11; 12]. Это исследование показало, что регион на юго-западе Нигерии, известный своими богатыми месторождениями золота, добываемого кустарным способом, оказал негативное воздействие на окружающий ландшафт [12; 13]. Исследования показали, что индексы NDVI, BSI и NDBI могут помочь в оценке уровня деградации окружающей среды [14]. В том же ключе недавнее исследование, проведенное в Индии, указывает на то, что NDVI имеет важное значение для оценки здоровья растительности, NDBI — для картографирования городских территорий, а NDWI — для обнаружения водоемов [15]. Данное исследование показывает, что нерациональная горнодобывающая деятельность, основанная на использовании примитивных технологий, способствует возникновению таких серьезных проблем, как обезлесение, эрозия почв и загрязнение воды [16]. Воздействие добычи полезных ископаемых на окружающую среду не ограничивается Бурунди. Avkopashvili et al. (2024) проанализировали пространственно-временное воздействие добычи полезных ископаемых на состояние растительности в Казрети, Грузия, с помощью индексов NDVI [17]. Было показано значительное ухудшение состояния растительности в радиусе, менее 1 км от горнодобывающих предприятий. Такая же ситуация наблюдается в коммуне Ругази, Бурунди, на различных горнодобывающих предприятиях, разбросанных по территории коммуны. Наиболее пострадавшими являются горнодобывающие предприятия в Ньягатобо, Музинда и Кибуйе, а также предприятия, расположенные в местности Музинда, особенно предприятия в Миньяри и Кидидагузо.

Было показано, что одни объекты находятся в непосредственной близости от местного населения, а другие — в непосредственной близости от рек. Отходы горнодобывающих предприятий попадают непосредственно в эти реки, что приводит к повторному появлению различных заболеваний. Исследование, проведенное в Гане, в регионах Кеджетия и Горого, показало, что из 172 сотрудников предприятий, 159 страдали респираторными заболеваниями [18]. Результаты анализа изменений окружающей среды, представленные на рисунках 1–4, наглядно демонстрируют, что Кибуйе и Музинда в последние годы подверглись значительной деградации. Значения индексов BSI, NDBI, NDVI и NDWI показывают, что деградация окружающей среды довольно равномерна на нескольких участках добычи полезных ископаемых, но участки в Музинде пострадали сильнее. Эти изменения имеют негативные экологические последствия, включая потерю почвенной влаги, деградацию среды обитания и увеличение заболеваемости среди местного населения. На основе этих результатов, анализ индексов и соответствующих данных показывает, что кустарная добыча полезных ископаемых изменяет земельный покров, тем самым усугубляя экологическую и человеческую уязвимость в исследуемой области.

Заключение

В рамках данного исследования были проанализированы изображения с целью оценки изменений окружающей среды в период с 1995 по 2020 год и изучения факторов, способствующих деградации природных ресурсов на рудниках Кибуйе и Музинда в коммуне Ругази, провинция Бубанза, Республика Бурунди. Спутниковые изображения позволили получить важную информацию, позволяющую продемонстрировать влияние изменений в эксплуатируемых районах в разные периоды времени. Оценка индексов BSI, NDBI, NDVI и NDWI показала степень изменения растительного покрова в регионе Кибуйе и Музинда за последние 31 год. Сравнивая горнодобывающие объекты, расположенные в одной коммуне, но на разной высоте над уровнем моря, было отмечено, что эти объекты не подвергались одинаковым темпам изменений, несмотря на то, что один из них находится на низкой высоте (между 849 и 1 150 м), а другой — на более высокой высоте у подножия Мирвы (от 1 750 до 2 050 м). Результаты также

показали, что чем ближе место добычи полезных ископаемых к жилым районам, тем больше изменений оно претерпевает по сравнению с местом, расположенным вдали от населенного пункта. Еще один вывод показал, что место, не огороженное забором, претерпевает больше изменений, чем огороженное. Правительство должно контролировать все заброшенные и действующие места добычи, чтобы принимать меры, способные смягчить последствия истощения ресурсов. Антропогенные факторы, оказывающие значительное влияние на окружающую среду, привели к значительному сокращению природных ресурсов. Только серьезный, рациональный, научно обоснованный подход к добыче полезных ископаемых, с привлечением технологии устойчивого управления природными ресурсами позволит предотвратить истощение ресурсов в коммуне Ругази.

ЛИТЕРАТУРА

1. Schueler, V. Impacts of surface gold mining on land use systems in western Ghana / V. Schueler, T. Kuemmerle, H. Schröder — DOI 10.1007/s13280-011-0141-9 // *Ambio*. — 2011. — Т. 40. — С. 528–539.
2. Li, N. Remote sensing monitoring recent rapid increase of coal mining activity of an important energy base in northern China, a case study of Mu Us Sandy Land / N. Li, C. Yan, J. Xie [et al.] — DOI 10.1016/j.resconrec.2014.11.010 // *Resources, Conservation and Recycling*. — 2015. — Т. 94. — С. 129–135.
3. Qian, D.W. The impact of mining changes on surrounding lands and ecosystem service value in the Southern Slope of Qilian Mountains / D.W. Qian, C. Yan, L. Xiu [et al.] — DOI 10.1016/j.ecocom.2018.08.002 // *Ecological Complexity*. — 2018. — Т. 36. — С. 138–148.
4. Ntiharirizwa, S. Geology and U-Th-Pb dating of the Gakara REE deposit, Burundi / S. Ntiharirizwa, P. Boulvais, M. Poujol [et al.] — DOI 10.3390/min8090394. // *Minerals*. — 2018. — Т. 8, № 9. — С. 1–22.
5. Buyse, F. Mineralogical and geochemical study of the rare earth element mineralization at Gakara (Burundi) / F. Buyse, S. Dewaele, S. Decrée [et al.] — DOI 10.1016/j.oregeorev.2020.103659. // *Ore Geology Reviews*. — 2020. — Т. 124. — С. 103659 — URL: <https://www.peeref.com/works/21121050> (дата обращения: 07.05.2025).
6. Oñate-Valdivieso, F. Soil degradation in andean watersheds: a case study using remote sensing / F. Oñate-Valdivieso, A. Oñate-Paladines, R. Díaz — DOI 10.3389/feart.2024.1325189 // *Frontiers in Earth Science*. — 2024. — Т. 12. — С. 1325189.
7. Miah, M.T. Urban Heat Island and Environmental Degradation Analysis Utilizing a Remote Sensing Technique in Rapidly Urbanizing South Asian Cities / M.T. Miah, J.N. Fariha, P.K. Jodder [et al.] — DOI 10.3390/world5040052. // *World*. — 2024. — Т. 5, № 4. — С. 1023–1053. — URL: <https://www.mdpi.com/2673-4060/5/4/52> (дата обращения: 09.01.2026).
8. Kabanyegeye, H. Spatio-Temporal Analysis of Green Infrastructure along the Urban-Rural Gradient of the Cities of Bujumbura, Kinshasa and Lubumbashi / H. Kabanyegeye, N.C. Cirezi, H.K. Muteya [et al.] — DOI 10.3390/land13091467. // *Land*. — 2024. — Т. 13, № 9. — С. 1467 — URL: <https://www.mdpi.com/2073-445X/13/9/1467> (дата обращения: 09.01.2026).

9. Boldyrev, S.L. Wetlands dynamics analysis: a case study of Keoladeo National Park (India), the wintering grounds of West Siberian white crane population / S.L. Boldyrev, A.Y. Levykh, D.O. Zamyatin — DOI 10.55355/snv2023123103 // Samara Journal of Science. — 2023. — Т. 12, № 3. — С. 27–35.
10. Gao, B.C. NDWI — A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space / B.C. Gao — DOI 10.1016/S0034-4257(96)00067-3. // Remote Sensing of Environment. — 1996. — Т. 58, № 3. — С. 257–266 — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425796000673> (дата обращения: 28.02.2026).
11. Oñate-Valdivieso, F. Large-Scale Climate Variability Patterns and Drought: A Case of Study in South — America / F. Oñate-Valdivieso, V. Uchuari, A. Oñate-Paladines — DOI 10.1007/s11269-020-02549-w. // Water Resources Management. — 2020. — Т. 34, № 6. — С. 2061–2079.
12. Ibukun, J.A. Assessing Vegetation Degradation and Thermal Effects of Artisanal Small-Scale Mining Using Remote Sensing Time Series Data / J.A. Ibukun, A.E. Olubaju, S.F. Thomas [et al.] — DOI 10.1002/ldr.70244. // Land Degradation and Development. — 2025. — (дата обращения: 06.01.2026).
13. Krebs, C.J. Extinction. The Causes and Consequences of the Disappearance of Species / C.J. Krebs — DOI 10.1086/412890 // The Quarterly Review of Biology. — 1982. — Т. 57, № 3. — С. 343.
14. Kpedenou, K.D. Cartographie et analyse spatiale de la dégradation des terres dans le sud-est du Togo: une approche basée sur la télédétection [Картирование и пространственный анализ деградации земель на юго-востоке Того: подход на основе дистанционного зондирования.] / K.D. Kpedenou, Z. Koumoi — DOI 10.56109/aup-sna.v9i1.64. // Annales de l'Université de Parakou — Série Sciences Naturelles et Agronomie [Анналы Паракусского университета — серия «Естественные науки и агрономия».] — 2019. — Т. 9, № 1. — С. 67–78 — URL: <https://hal.science/hal-02446404v1> (дата обращения: 09.01.2026) (на франц.яз).
15. Dapke, P.P. Seasonal Analysis of Vegetation, Moisture, Urbanization, and Land Surface Temperature (LST) Using NDVI, NDMI, NDWI, and NDBI Indices: A Case Study of Sillod, Maharashtra / P.P. Dapke, S.M. Nagare, S.A. Quadri [et al.] — DOI 10.1109/ICCCIT62592.2025.10928110. // Proceedings of the 2025 IEEE International Conference on Communications, Computing, Cybersecurity and Informatics (ICCCIT). — IEEE, 2025 — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10928110> (дата обращения: 09.01.2026).
16. Afeni, T.B. Assessment of environmental impact of gemstone mining in Ijero-Ekiti, Nigeria / T.B. Afeni, F. Ibitolu — DOI 10.15407/mining12.01.001 // Mining of Mineral Deposits. — 2018. — Т. 12, № 1. — С. 1–11 — URL: <https://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/151734> (дата обращения: 06.01.2026).
17. Avkopashvili, M. 50 years of mining-induced environmental changes: topography, hydrology, and vegetation health in Kazreti, Georgia / M. Avkopashvili, I. Avkopashvili, G. Avkopashvili [et al.] — DOI 10.1088/2515-7620/ad6b06. // Environmental Research Communications. — 2024. — Т. 6, № 8. — С. 085018. — URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2515-7620/ad6b06/meta> (дата обращения: 06.01.2026).

18. Rajae, M. Pulmonary function and respiratory health of rural farmers and artisanal and small scale gold miners in Ghana / M. Rajae, A.K. Yee, R.N. Long [et al.] — DOI 10.1016/j.envres.2017.07.011. // Environmental Research. — 2017. — Т. 158. — С. 522–530. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935117302463> (дата обращения: 07.01.2026).

Ndayiragije Athanase

Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia
Institute of Environmental Engineering
E-mail: athanasendayi1990@gmail.com; 1042245264@rudn.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1939-9389>

Academic adviser: **Shatalov Andrey Borisovich**

Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia
Institute of Environmental Engineering
E-mail: sab150959@gmail.com; shatalov-ab@rudn.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0169-9075>

Assessment of environmental changes in the mining areas of Kibuye and Muzinda in the commune of Rugazi

Abstract. Mining is associated with changes to the environment. This article discusses methods for assessing changes to natural landscapes resulting from mining activity at the Kibuye and Muzinda mines in Bubanza Province. Our study was conducted based on satellite image processing using Google Earth Engine programs. Four indices reflecting changes in land use between 1995 and 2020 were calculated, namely BSI (Bare Soil Index), NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), NDBI (Normalized Difference Built-up Index), and NDWI (Normalized Difference Water Index). The results show that BSI varies between -0,006 and 0,048 for Muzinda and between 0,018 and 0,052 for Kibuye, indicating low vegetation cover. Similarly, NDVI for the two sites varies from -0,002 to 0,031 and from 0,020 to 0,056, demonstrating that they are heavily degraded due to the abundance of mining sites. The NDBI index ranges from 0,013 to 0,047 and from -0,019 to 0,046 for Kibuye and Muzinda, indicating that neither site is densely urbanized. The NDWI index ranges from 0,063 to -0,023 and from 0,094 to 0,026, indicating low humidity at the Kibuye and Muzinda mining sites. Although a number of initiatives have been carried out in Burundi, poor environmental management has led to real changes at these sites. It is imperative that mining operations comply with environmental standards and protect the local community, especially in Muzinda, for the well-being of the local community and the country.

Keywords: vegetation index; environmental change; Burundi; mineralization; mining; Rugazi; mining operations