

**ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ И БИОГЕОГРАФИЯ, ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ И ГЕОХИМИЯ  
ЛАНДШАФТОВ/PHYSICAL GEOGRAPHY AND BIOGEOGRAPHY, SOIL GEOGRAPHY AND LANDSCAPE  
GEOCHEMISTRY**

DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2025.5.1>

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСНЫХ УСЛОВИЙ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НИКЕЛЕВЫХ  
РУД ДЛЯ РАЗВИТИЯ ГОРНОРУДНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В РЕСПУБЛИКЕ БУРУНДИ**

Статья с данными

**Хакешимана Ж.К.<sup>1,\*</sup>, Бенуа Н.<sup>2</sup>, Пелипенко Н.А.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> ORCID : 0009-0004-6029-2081;

<sup>2</sup> ORCID : 0009-0003-3049-0100;

<sup>3</sup> ORCID : 0000-0002-3522-5934;

<sup>1, 2, 3</sup> Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (hakeshajclaude[at]gmail.com)

**Аннотация**

В данном исследовании представлены результаты анализа геологических комплексных условий, контролирующих формирование месторождений никелевых руд на территории Республики Бурунди. Исследования основаны на проведенных нами в БелГУ лабораторных работах с использованием таких методов анализа химического состава руд, как энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия, рентгенофлуоресцентный анализ, микрорентгенофлуоресцентный анализ и рентгеноструктурный анализ, а также оборудования сертифицированной лаборатории «Грунтоведения». Оценивается текущее состояние и перспективы развития горнорудной промышленности Бурунди с акцентом на никелевый сектор. Работа охватывает геологическое строение региона, тектонические особенности, тип оруденения и минеральный состав руд. Месторождения расположены в пределах мезопротерозойского Карегве-Анкольского пояса и генетически связаны с ультрамафическими интрузивными породами. Особое внимание уделено роли интенсивного тропического выветривания в формировании промышленных концентраций никеля и кобальта, а также относительной устойчивости первичных минералов в основных породах и альтерации ультраосновных пород. Исследование подчеркивает значительный потенциал этих месторождений для экономического развития Бурунди и определяет ключевые аспекты для их дальнейшего изучения и освоения. В ходе исследований были изучены геолого-структурные особенности крупнейших никелевых месторождений Республики Бурунди, сфокусировавшись на латеритном комплексе мусонгати как наиболее представительном объекте.

**Ключевые слова:** Республика Бурунди, никелевые руды, латеритные месторождения, ультрамафические породы, мусонгати, карегве-анкольский пояс, горнорудная промышленность, геологические условия.

**STUDY OF THE GEOLOGICAL COMPLEX CONDITIONS OF NICKEL ORE DEPOSITS FOR THE  
DEVELOPMENT OF THE MINING INDUSTRY IN THE REPUBLIC OF BURUNDI**

Data paper

**Hakeshimana J.C.<sup>1,\*</sup>, Benoit N.<sup>2</sup>, Pelipenko N.A.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> ORCID : 0009-0004-6029-2081;

<sup>2</sup> ORCID : 0009-0003-3049-0100;

<sup>3</sup> ORCID : 0000-0002-3522-5934;

<sup>1, 2, 3</sup> Belgorod National Research University, Belgorod, Russian Federation

\* Corresponding author (hakeshajclaude[at]gmail.com)

**Abstract**

This study presents the results of an analysis of the complex geological conditions controlling the formation of nickel ore deposits in the Republic of Burundi. The research is based on laboratory work we conducted at BelSU, utilizing methods for analyzing the chemical composition of ores such as energy-dispersive X-ray spectroscopy, X-ray fluorescence analysis, micro-X-ray fluorescence analysis, and X-ray structural analysis. It assesses the current state and development prospects of Burundi's mining industry, with a focus on the nickel sector. The work covers the geological structure of the region, tectonic features, the type of mineralization, and the mineral composition of the ores, as well as the equipment of the certified laboratory of "Soil Science". The deposits are located within the Mesoproterozoic Karegwe-Ankole belt and are genetically associated with ultramafic intrusive rocks. Particular attention is paid to the role of intense tropical weathering in the formation of industrial concentrations of nickel and cobalt, as well as the relative stability of primary minerals in mafic rocks and the alteration of ultramafic rocks. The study highlights the significant potential of these deposits for the economic development of Burundi and identifies key aspects for their further study and development. During the research, the geological and structural features of the largest nickel deposits in the Republic of Burundi were studied, focusing on the Musongati laterite complex as the most representative site.

**Keywords:** Republic of Burundi, nickel ores, lateritic deposits, ultramafic rocks, musongati, karegwe-Ankole belt, mining, geological conditions.

**Введение**

Республика Бурунди, расположенная в Восточно-Африканской рифтовой зоне, обладает значительным, но недостаточно изученным минерально-сырьевым потенциалом, при этом среди перспективных полезных ископаемых особое место занимают никелевые руды, ассоциирующие с ультраосновными и основными комплексами, распространенными в регионах активного тектонического развития. Развитие горнодобывающей промышленности, в частности добычи и переработки никеля, имеет критическое значение для экономического роста Бурунди. Республика Бурунди располагает одним из крупнейших в мире неразработанных латеритных месторождений никеля — Мусонгати, а также другими проявлениями. Растущий мировой спрос на никель, особенно для производства аккумуляторов, делает эти ресурсы чрезвычайно перспективными. Бурунди, находясь в центральной части Африканского континента, обладает значительным, хотя и недостаточно освоенным, минерально-сырьевым потенциалом, среди которого наиболее перспективными выделяются никелевые руды, представленные преимущественно крупными латеритными месторождениями, такими как Мусонгати. Эти месторождения рассматриваются как ключевой фактор для экономического развития страны, способный стимулировать рост ВВП, создать новые рабочие места и привлечь значительные иностранные инвестиции в горнорудную промышленность. Успешное освоение столь масштабных и стратегически важных ресурсов требует глубокого и всестороннего понимания их геологического контекста, что включает не только общую приуроченность к региональным геологическим структурам, но и детальный анализ геолого-структурных особенностей рудовмещающих комплексов, литологического состава пород, а также специфики процессов рудообразования, которые привели к формированию промышленных концентраций полезных компонентов. Особое внимание заслуживает изучение роли процессов выветривания ультраосновных пород и поведения первичных минералов в этих условиях. Комплексный анализ геолого-структурных особенностей и условий формирования никелевых месторождений в Бурунди подчеркивает их огромный потенциал для развития горнорудной промышленности, а глубокое понимание этих условий является залогом успешной разведки, эффективной добычи и переработки, а также разработки устойчивых стратегий освоения минеральных ресурсов, что имеет решающее значение для будущего экономического благополучия Республики Бурунди.

#### **Методы и классификация принципов исследования**

Данного исследования является комплексный анализ геологических условий формирования и размещения месторождений никелевых руд в Республике Бурунди, с акцентом на месторождение Мусонгати, а также оценка перспектив развития горнорудной промышленности на их основе. Основным объектом исследования являются никелевые рудные месторождения Республики Бурунди, с особым вниманием к латеритному комплексу Мусонгати, как наиболее представительному и экономически значимому. Также рассматриваются общие геологические условия, способствующие формированию такого типа оруденения в регионе. В рамках данной работы использовались следующие методы исследования: энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия, рентгенофлуоресцентный анализ использованием для определения содержания химических элементов, микрорентгенофлуоресцентный анализ и рентгеноструктурный анализ химического состава руд.

Геологическое строение Республике Бурунди отличается сложностью и отражает длительную геологическую историю, включающую процессы осадконакопления, магматизма и метаморфизма (рис. 1) [4]. Страна расположена в пределах мезопротерозойского Кибарского пояса, который входит в состав более обширной системы Восточно-Африканского орогена. Геологические условия месторождений никелевых руд в Республике Бурунди, в частности латеритного комплекса Мусонгати, являются уникальными. Их формирование обусловлено сочетанием масштабного ультрамафического магматизма и длительных процессов интенсивного тропического выветривания. Ключевым фактором, способствовавшим образованию значительных промышленных концентраций никеля и кобальта в латеритных профилях, является низкая устойчивость основных первичных силикатов (оливина, пироксена) в ультраосновных породах к химическому изменению. Эти геологические особенности определяют специфику как добычи (открытым способом), так и переработки руд (в основном за счёт сложных гидрометаллургических процессов). Месторождение Мусонгати представляет собой стратегический актив мирового уровня, способный стать основой для устойчивого развития горнодобывающей отрасли Бурунди. Успешное освоение этих ресурсов несмотря на инфраструктурные, технологические и социальные вызовы может кардинально преобразить экономику страны: обеспечить устойчивый рост, расширить экспортную базу и значительно улучшить социально-экономические показатели. Для реализации этого потенциала необходимы дальнейшие детальные геологоразведочные работы, привлечение стратегических инвестиций и разработка ответственной и устойчивой политики в области недропользования. Территория Республике Бурунди сложена древними (архей-протерозойскими) кристаллическими породами Бурундийского щита (граниты, гнейсы, сланцы), а также комплексами, связанными с активными процессами Восточно-Африканской рифтовой зоны, при этом присутствуют интрузии ультраосновных и основных пород (перидотиты, габбро), являющиеся ключевыми для формирования никелевого оруденения [14], [21]. Страна находится в зоне активного рифтогенеза, что обуславливает наличие многочисленных разломов, грабенов и вулканической активности, причем разломы часто контролируют размещение магматических интрузий и последующего оруденения. Метаморфические породы (гнейсы, сланцы) могут быть вмещающими, а также содержать россыпные или вторичные минералы. Осадочные породы (глины, пески), формирующиеся в рифтовых долинах, могут содержать вторичные (латеритные) никелевые минералы [20]. Сульфидные медно-никелевые месторождения связаны с магматическими интрузиями ультраосновных пород, тогда как латеритные образуются в результате выветривания как сульфидных, так и силикатных никелевых пород [1].

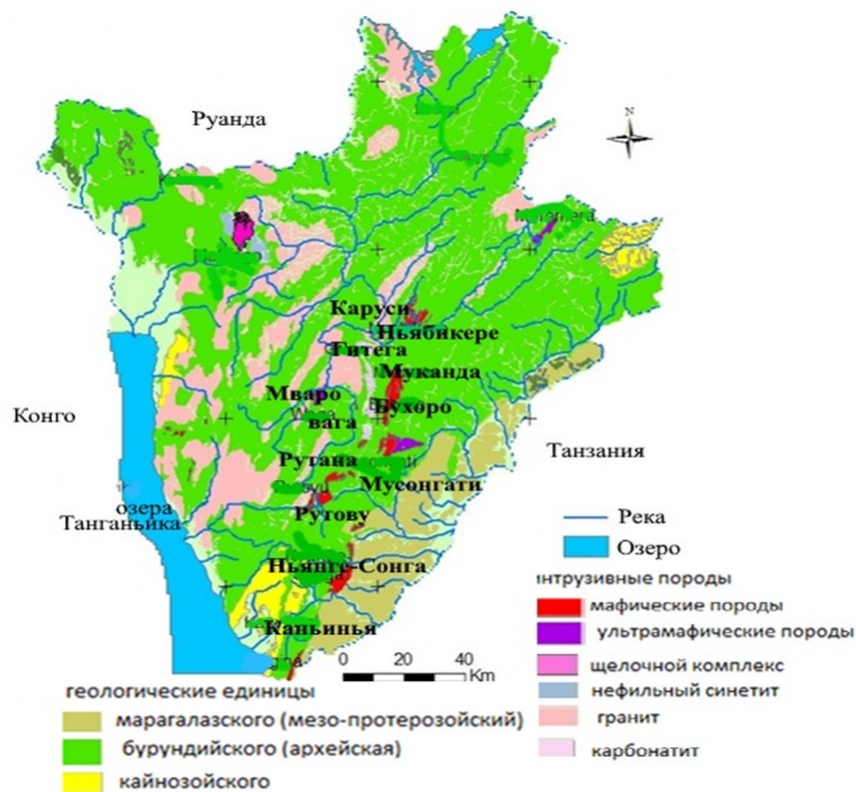


Рисунок 1 - Геологическая карта Республики Бурунди  
DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2025.5.1.1>

### Результаты и их обсуждение

Анализы полученных результатов наглядного распределения химических микроэлементов в образцах были выполнены с использованием метода рентгенофлуоресцентного анализа Spectroscan-MAX GV и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (рис. 2). В ходе проведенного анализа выяснилось, что выявленные элементы Ni, Cu, Cr, Mn, Fe, Ti, Al, S, Si, и другие составляют элементы группы платиновых металлов и микроэлементы, которые встречаются в концентрациях чуть более 0,05%. Проанализированы геохимические карты распределения элементов, можно отметить, что в состав условий освоения месторождений твердых полезных ископаемых руд черных металлов входят элементы группы платиновых металлов и микроэлементы в следующих соотношениях: Fe — 34,88–14,88%, Al — 9,32–8,23%, Si — 6,60–5,60%, и небольшое количество S — 0,07–0,05%, Ni — 0,19–0,08%, Cu — 0,15–0,05% и др. В результате геохимических исследований было установлено, что в образцах были обнаружены высокие концентрации железа, алюминия, кремния и других элементов. Сульфидными медно-никелевыми месторождениями образуются в результате дифференциации магматических расплавов ультраосновного состава [1].

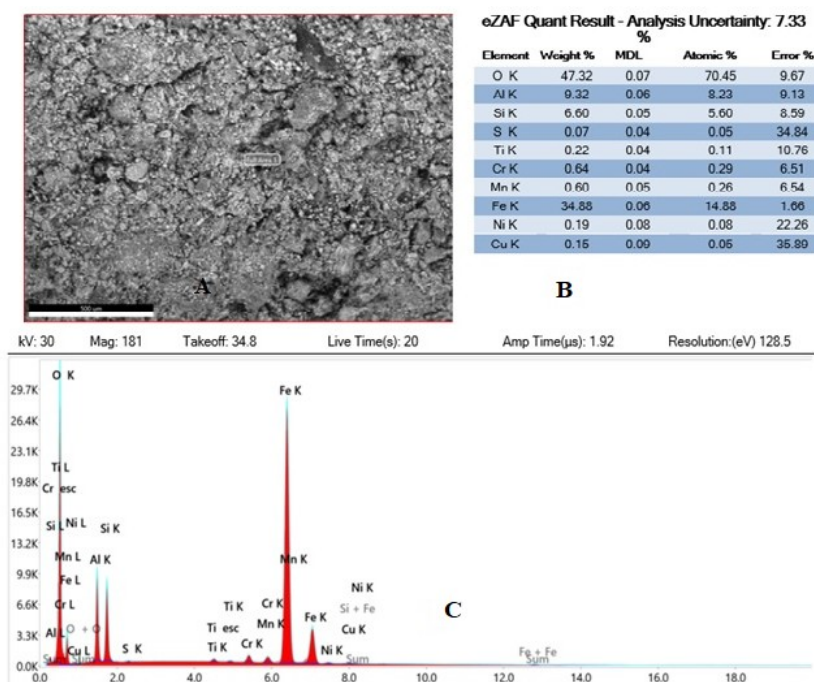


Рисунок 2 - Результаты картирования химических элементов энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия:  
 А – спектральное изображение магния; В – таблица содержания химических элементов; С – график, отображающий содержание и концентрацию элементов  
 DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2025.5.1.2>

В данной работе представлено исследование по определению месторождений полезных ископаемых из черных металлов в районах Муканда и Мусонгати в Бурунди. Результаты исследования показывают наличие перспективных участков с содержанием Fe, Ti, V, Ni, Cu, Co, Cr (Руд черный металлов) и, возможно, других черных металлов. Дальнейшие исследования необходимы для оценки экономической целесообразности добычи. Определение полезных ископаемых черных металлов в регионах, таких как Муканда и Мусонгати в Бурунди, является важной задачей для геологов и горнодобывающих компаний. Данная работа рассматривает методы и подходы, используемые для выявления и оценки запасов черных металлов, таких как никель, медь, железо, титан, ванадий и кобальт [15], [23]. Включая геологическое картирование, геохимические и геофизические исследования, а также бурение и отбор проб, исследование направлено на создание комплексного понимания геологической структуры этих регионов и их потенциала для добычи полезных ископаемых. Огромные запасы никеля и кобальта в Мусонгати делают его ключевым активом для развития горнорудной промышленности Бурунди. Освоение этого месторождения может привести к значительному росту ВВП, созданию тысяч рабочих мест (прямых и косвенных), увеличению экспортных доходов и привлечению значительных иностранных инвестиций. Потенциал для диверсификации экономики и снижения зависимости от сельского хозяйства огромен.

Месторождения никелевых руд в Бурунди, в частности, комплекс Мусонгати, расположены в пределах мезопротерозойского Карегве-Анкольского пояса (Karagwe-Ankole Belt, KIB). Этот пояс является частью более крупной орогенной системы Центральной Африки, сформировавшейся в ходе Кибаранской орогении. Регион сложен преимущественно метаосадочными породами (кварциты, сланцы, филлиты), которые прорваны многочисленными гранитоидными и ультрамафическими интрузиями. Именно последние, особенно расслоенные ультрамафические комплексы, являются ключевыми для формирования никелевых месторождений [5]. Крупнейшее месторождение никеля Мусонгати ассоциировано с массивным расслоенным ультрамафическим интрузивным комплексом Мусонгати. Этот комплекс сложен преимущественно перидотитами, пироксенитами и дунитами — породами, богатыми магниевыми силикатами, такими как оливин и пироксен. Эти первичные минералы содержат изоморфные примеси никеля в своей кристаллической решетке (например, в оливине никель может замещать магний). Глубокое залегание и массивная структура комплекса обеспечивают огромный объем исходного материала для последующего рудообразования [6].

По данным элементного химического картирования и петрографического анализа шлифов установлено присутствие в образце Ni, Mn, Cu, Cr, Co, Si, Ti, Fe, V и других элементов, у которых массовая доля и атомный процент превышают 0,05% (рис. 3). Разведка никелевых месторождений (Ni-Cu-PGE) обычно включает геохимические и геофизические исследования, а также бурение. Добыча месторождений элементов для чёрной металлургии зависит от типа месторождения и содержания в нём металла, а к распространённым методам добычи относятся открытый и подземный способы, а также выщелачивание. Никеленосные породы обычно представляют собой ультраосновные породы, такие как перидотиты, дуниты, пироксениты и габбро, которые встречаются в офиолитовых комплексах (породах океанической коры) или в зонах интрузивной магмы. Никелевые руды обычно ассоциируются с сульфидами железа, такими как пирротин и пентландит, а также могут присутствовать в виде оксидов и гидроксидов. Минерализация (Ni-Cu-Fe-Ti-V-PGE) встречается в различных типах пород, включая магматические, осадочные и метаморфические, причем элемент ванадий присутствует в таких минералах, как ванадинит, патронит и роскоэлит

[23]. Анализ полученных результатов визуального распределения химических микроэлементов в образцах был выполнен с использованием рентгенофлуоресцентного анализа Spectroscan-MAX GV.

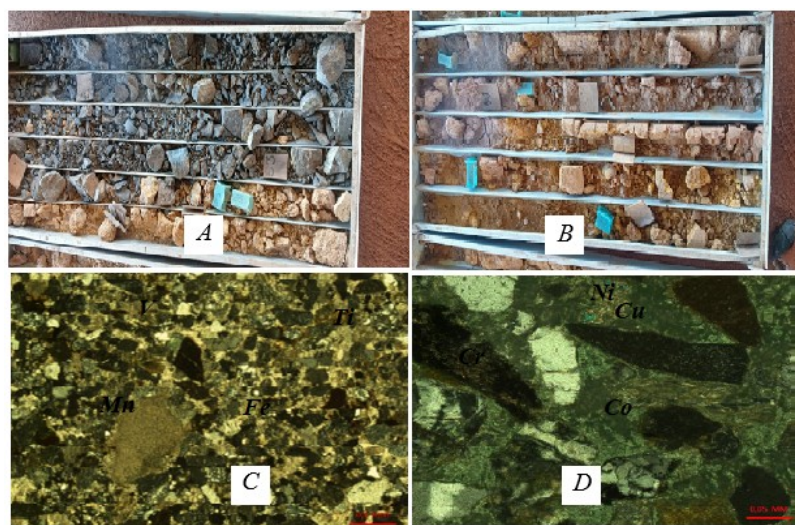


Рисунок 3 - Геологическое картирование изучение структуры и состава горных пород:

А – сбор образцов пород магматических; В – образцов пород ультраосновных; С – анализ лаборатории отобранных образцов содержание Fe, Ti, V, Mn и другие элементы; D – анализ лаборатории отобранных образцов на содержание Ni, Cu, Co, Cr EGP и других элементов

DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2025.5.1.3>

Месторождения никеля и связанных с ним элементов были выявлены в ряду мафических и ультрамафических массивов [1], [4], образующих непрерывную линию на северо-северо-запад от восточного берега озера Танганьика (южная Бурунди) до озера Виктория на границе Танзании и Уганды [4], [12]. Это направление простирается в пределах Кибаранского орогенного пояса на протяжении около 350 км в длину и 50 км в ширину. Эти массивы датируются  $1275 \pm 11$  млн лет (U-Pb по циркону) [6]. Девять основных массивов образуют это выравнивание в Бурунди: Мугина, Каньинья, Ньянге-Сонга, Рутову, Мусонгати, Вага, Муканда-Бухоро, Ньябикере и Муремера. К массивам относятся пород ультраосновных Мусонгати, Вага, Ньябикере и Муремера, а к массивам мафических пород — Бухоро-Муканда, Ньянге-Сонга, Рутову, Каньинья и Мугина. Эти месторождения никелевые в Бурунди сейчас желанны для транснациональных корпораций [22]. Основной проблемой для этих компаний является жесткая нехватка электроэнергии для начала работ эксплуатационных.

Мафит-ультрамафитовые интрузии в Бурунди, относящиеся к выравниванию Кабанга-Мусонгати, представляют собой перспективные месторождения. Эти интрузии внедрились в мезопротерозойские породы пояса Карагве-Анколе около 1375 млн лет назад и формируют выравнивание юго-восточного – северо-западного простирания, состоящее из девяти интрузивных тел на территории Бурунди с продолжением в сторону Танзании [7]. Как известно, элементы платиновой группы (ЭПГ) концентрируются в процессе магматической дифференциации в несмешивающейся с силикатным расплавом сульфидной жидкости совместно с другими элементами (S, V, As, Fe, Ba, Co, Cu, Mo, Ni, Pb, Cr, Sb, Se, Te и Zn), образуя магматические сульфидные месторождения медно-никелевых руд с платиноидами (Ni-Cu-PGE) [19]. Результаты картирования химических элементов позволяют отметить, что в состав условий освоения месторождений твердых полезных ископаемых руд черных металлов в провинции Каруси и Рутана входят элементы группы платиновых металлов и микроэлементы в следующих соотношениях: Ni — 3,98%, Cu — 2,74%, Fe — 1,40%, Cr — 1,21%, Co — 0,80%, S — 0,70% и небольшое количество Rb — 0,004%, Cl — 0,007%, Zr — 0,023%, Zn — 0,104% и др (рис. 4). В результате геохимических исследований было установлено, что в образцах были обнаружены высокие концентрации никеля, меди, железа, хрома и других элементов. Анализы с использованием энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии и рентгеновской дифрактографии позволяют выявить концентрацию химических элементов минералов, при этом минеральный состав руды может содержать, помимо основных никелевых минералов, спутники, такие как кобальт, медь, железо, а также элементы платиновой группы. Геологические данные указывают на наличие в Бурунди потенциала для обнаружения и разработки месторождений никелевых руд, в первую очередь латеритного типа, связанных с выветриванием ультраосновных пород.

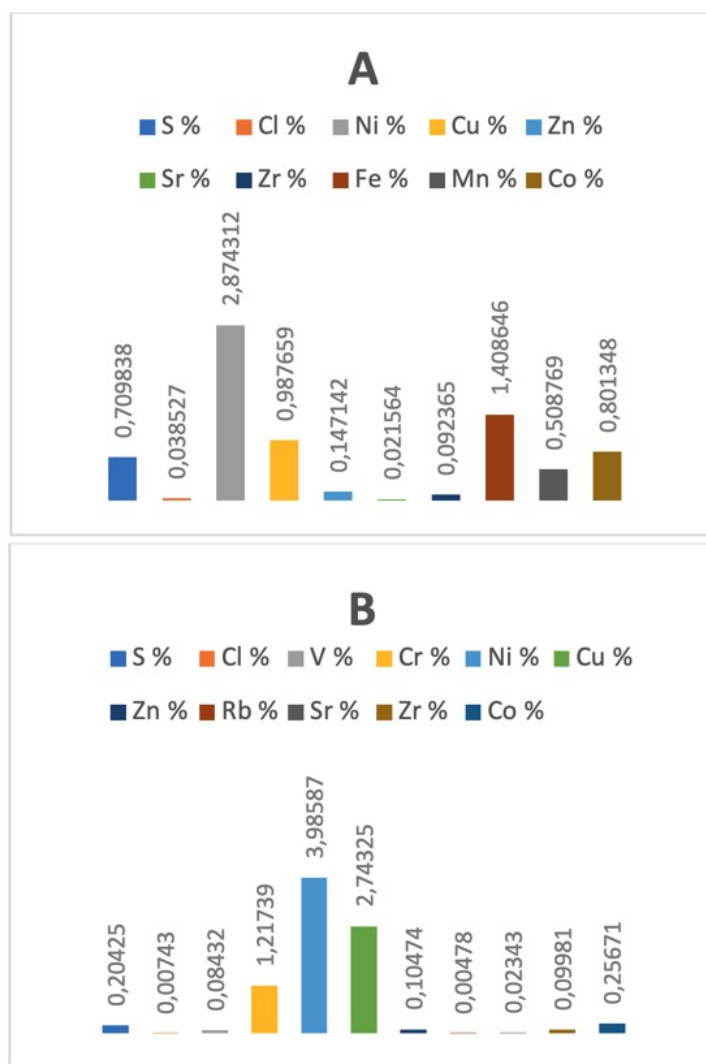


Рисунок 4 - Картирование химических элементов месторождений руд чёрных металлов в Республике Бурунди:  
 А – концентрацию минералов химических элементов в Каруси (Ni – 2,87%, Fe – 1,40%); В – концентрацию минералов химических элементов в Рутана (Ni – 3,98%, Cu – 2,74%)  
 DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2025.5.1.4>

Выравнивание Кабанга-Мусонгати, протяжённостью 350 км и возрастом заложения  $1,275 \pm 11$  млн лет (по данным U-Pb датирования цирконов), простирается через Бурунди в Уганду [6]. В пределах Бурунди оно включает девять основных стратиграфических единиц с залежами оксидов Fe–Ti–V, сопоставимыми с аналогичными формациями в других африканских слоистых магматических интрузиях, таких как Грейт-Дайк и Бушвельдский комплекс. Основным месторождением оксидов Fe–Ti–V является ванадиевая руда Муканда, расположенная в северной части мафического интрузива Муканда-Бухоро [16]. Незначительные минерализованные тела также были выявлены в других районах, включая проявления Fe–Ti–V в Макебуко (Рувесера), Рутегаме, Итабе, Фуньянгесо, Кабаго и Рувуму в массиве Муканда-Бухоро; ванадиево-содержащее месторождение титано-гематита Кивога в массиве Мусонгати; ванадиево-содержащее месторождение титано-магнетита в массиве Рутову, а также ряд месторождений железа в массивах Ньянге-Сонга [6]. Оксиды Fe–Ti–V связаны с анортозитовыми комплотами и обычно локализуются на контактах между интрузивом и вмещающими породами. Промышленное оруденение никеля в Мусонгати имеет латеритный тип, что означает его формирование в результате интенсивного тропического выветривания первичных ультрамафических пород. В условиях жаркого и влажного климата, характерного для экваториальной Африки, происходит глубокое химическое выветривание пород. Доминирующие первичные минералы в ультраосновных породах, такие как оливин (особенно его форстеритовая разновидность) и пироксены, характеризуются относительно низкой устойчивостью к химическому выветриванию по сравнению, например, с полевыми шпатами и кварцем, преобладающими в кислых или средних породах. При контакте с водой и углекислотой они подвергаются гидролизу и карбонатизации.

Месторождение Муканда представляет собой стратиформное ортомагматическое тело [17], согласующееся с магматической слоистостью анортозитовых кумулятов анортозито-норитовой единицы подзоны габброноритов (мафической зоны) муканды [5]. Руда состоит из массивного или субмассивного (менее 40 об.% породы) титано-магнетита и ильменита в анортозитовой матрице. Толщина линзы варьируется от 5 до 15 м, а протяжённость по простиранию (восток–запад) составляет около 1 300 м [6]. По данным на 2006 год, ресурсы ванадия на разведанном участке месторождения Муканда оценивались в 9,7 млн тонн руды со средним содержанием ванадия 0,63% [18]. В

настоящее время минеральные ресурсы ванадия на Муканде охватывают площадь около 144 км<sup>2</sup>. Доказанные запасы составляют 6 500 000 тонн с содержанием 0,63% V (при отсечке 0,2% V), вероятные — 7 300 000 тонн и возможные — 5 000 000 тонн. По результатам анализа составлена минералогическая карта содержания химических элементов и элементов платиновой группы (ЭПГ) в изученных породах с использованием рентгеноспектрального метода (рис. 5). По данным элементного и геохимического анализа в провинции Мваро и Гитега Республики Бурунди, в комплексе геологических условий развития месторождений никелевых руд и горнорудной промышленности, исследования образцов пород и минералов показывают, что содержание одних элементов (Ni, V, Ti, Fe, Mn, S и др.) выше, а других (Cl, Mg, Zr, Sr и др.) ниже (рис. 3). Анализ карт распределения элементов позволяет констатировать, что в минеральном составе руд черных металлов преобладают в основном V (9,12%), Ti (7,05%), Fe (5,32%), Ni (0,67%), Mn (0,57%), S (0,50%), Cr (0,31%), Cu (0,21%), а в небольшом количестве присутствуют Cl (0,01%), Mg (0,06%), Zr (0,08%), Sr (0,90%) и др. Латеритные месторождения формируются в результате гипергенного выветривания сульфидных или силикатных никелевых руд, при этом никелевые месторождения характеризуются наличием сульфидных минералов, таких как пентландит (основной рудный минерал никеля), пирротин, пирит, халькопирит, а металлы (никель, медь, платина и др.) присутствуют в сульфидной фазе. Месторождения минералов и ЭПГ элементов можно локализовать с учётом ассоциаций минералов платиновой группы арморитов, ферралитов, сапролитов. Эти минералы не связаны с сульфидами, но демонстрируют более высокую концентрацию в породах оксидного и силикатного состава, особенно ультраосновных.

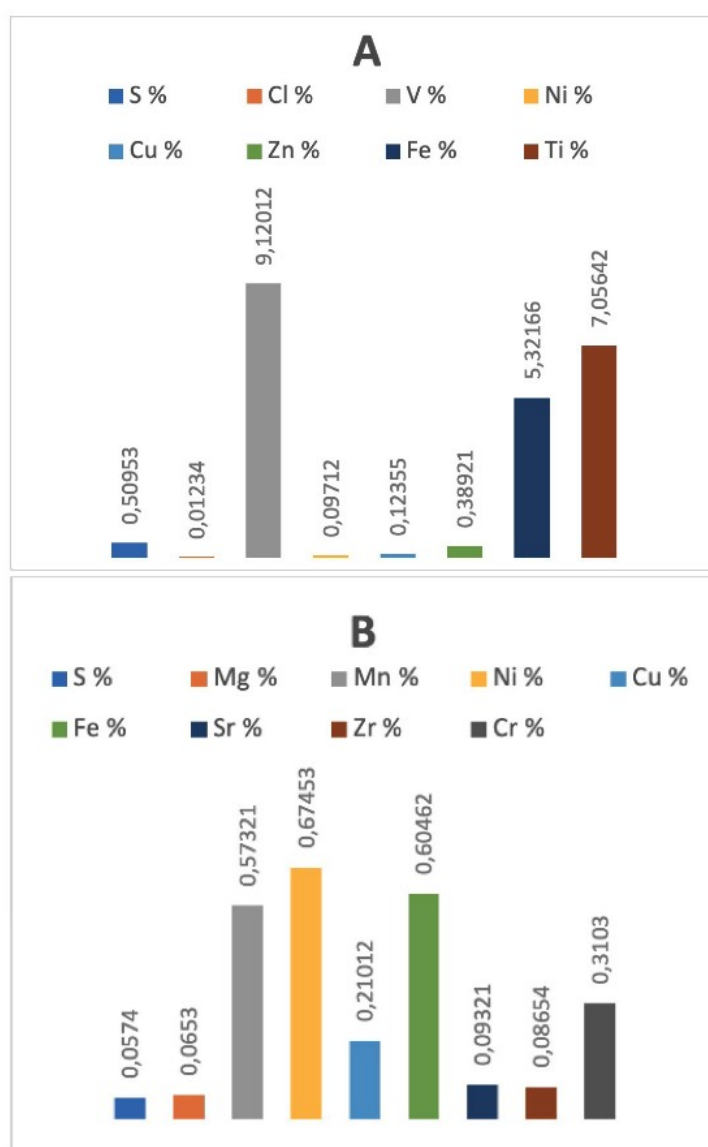


Рисунок 5 - Распределение химических элементов в минералах на исследуемых образцах из Республики Бурунди: А – содержание химических элементов в минералах из провинции Гитега (V – 9,12%, Ti – 7,05% и др.); В – содержание химических элементов в минералах из провинции Мваро (Ni – 0,67%, Fe – 0,60% и др.)

DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2025.5.1.5>

В интрузивной последовательности пород, сверху вниз, выделяются: контактовые габбродолериты, габбродолериты, содержащие оливин, и вновь контактовые габбродолериты [2]. Эти породы встречаются также в виде

включений и линз в горизонтах других формаций. Мафические и промежуточные интрузивные породы встречаются реже, чем граниты, но также присутствуют в Кибаранских поясе, включая его ультраосновные комплексы. Эти породы могут быть связаны с минерализацией никеля, железа и меди. Наиболее распространённые интрузивные породы часто ассоциируются с метаморфическими породами Кибаранских поясов и варьируются по составу от щелочных гранитов до гранодиоритов. В Бурунди установлено, что основные рудоносные структуры страны (в том числе Кибаранский пояс, зоны влияния кайнозойского рифтогенеза и древние кратоны) обладают четкой геохимической специализацией. Ультраосновные и основные интрузии ассоциированы с повышенными концентрациями Ni, Co, Cr, Fe и элементов платиновой группы (ЭПГ); гранитоидные комплексы Sn, Ta, Nb, W, Li, Be; зоны метаморфизма и гидротермальной активности Cu, Zn, Pb. Установлены характерные геохимические ассоциации индикаторных элементов для различных типов твёрдо минерального полезного ископаемого сырья (ТПИ) в Бурунди для никель-кобальт-железо-платиноидных латеритов района Мусонгати, олово-тантал-вольфрамовых грейзенов и железистых кварцитов [13].

Процесс формирования латеритных месторождений никеля и кобальта включает три последовательные стадии: разрушение первичных силикатов (оливина и пироксенов) с высвобождением ионов Mg, Fe, Si, Ni и Co; последующую мобилизацию и перенос более подвижных Ni и Co вниз по профилю выветривания в виде растворов; и их реконцентрацию с отложением в специфических горизонтах латеритного профиля [11], [19]. Наибольшие концентрации рудных компонентов наблюдаются в сапролитовой зоне (нижняя часть профиля с сохранившейся структурой материнской породы, но полностью изменённым минеральным составом) и в перекрывающей её глинистой зоне, содержащей никеленосные силикатные глины (нонтронит, сапонит), тогда как вышележащие железистые горизонты (лимонитовая зона) характеризуются пониженными содержаниями никеля. Результаты рентгенофлуоресцентного анализа, с использованием на приборе Спектроскан-МаксГВ (рис. 6), показали значительную более высокую вариабельность концентраций элементов Ni, Rb, Zn, S, Zr, V, Ni, тд и стабильных содержаниях Ba, Cr, Cu, Sr, As, тд при относительно низких этом установлено, что Rb и Zn концентрируются преимущественно в сульфидных фазах, что, вероятно, связано с ранним насыщением магмы серой до или одновременно с кристаллизацией силикатных минералов, что послужило основой для разработки предварительной модели минерализации элементов платиновой группы в интрузиве мусонгати.

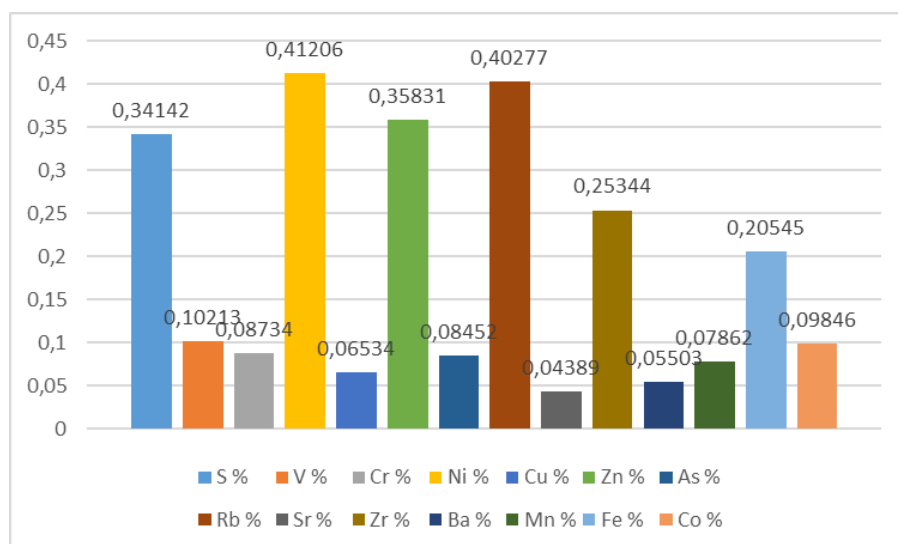


Рисунок 6 - Картирование химических элементов в месторождениях комплексных никелевых руд в Республике Бурунди

DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2025.5.1.6>

Химический анализ элементов проводился с использованием метода рентгенографического фазового анализа, в результате которого были выявлены элементы Ni, Cu, Zn, As, Rb, Sr, Zr и Ba. Анализ карт распределения элементов показал, что медные песчаники содержат следующие элементы в указанных концентрациях (в ppm): Ni — 0,41%, Rb — 0,40%, Zn — 0,35%, S — 0,34%, Zr — 0,25%, V — 0,10%, а также меньшие количества Sr — 0,004%, Ba — 0,05%, Mn — 0,07%, As — 0,08% и других элементов. Геохимические исследования установили наличие высоких концентраций Ni, Rb, Zn, S, Zr и V в исследуемых образцах, причем повышенное содержание последних элементов обусловлено гипергенными окислительными процессами. Проанализированы геохимические характеристики месторождений никеля имеют решающее значение для их устойчивого использования, при этом важно подчеркнуть необходимость согласования методов добычи с защитой окружающей среды и применения передовых методов разведки для достижения максимальной эффективности. При правильном подходе Бурунди может использовать свои минеральные ресурсы для обеспечения устойчивого экономического роста. Следует учитывать, что месторождения никеля встречаются в самых разных породах и геологических условиях, и их свойства сильно различаются, поэтому важно принимать во внимание потенциальные экологические последствия добычи этих металлов и активно внедрять устойчивые практики ведения горных работ. На основе полученных данных о распределении элементов была предложена предварительная модель формирования платиноидной минерализации для расслоенного интрузива мусонгати, включающая два возможных механизма: фракционирование сульфидов [9] и кластеризацию элементов

платиновой группы [3], [11]. Механизм кластеризации может быть применим к этапу эволюции магмы до её поступления в магматическую камеру мусонгати, тогда как модель сульфидного фракционирования относится к процессам, происходившим после этого события. Вероятно, магма была изначально обогащена элементами платиновой группы и никелем (Ni) вследствие высокой степени частичного плавления [3]. На этой ранней стадии кластеризация элементов платиновой группы могла быть основным механизмом их перераспределения между силикатными и, возможно, оксидными (шпинелевыми) фазами. Процесс кластеризации, как предполагается, включает образование стабильных молекулярных кластеров элементов платиновой группы с участием Fe, S и As [8]. В условиях серной недонасыщенности магмы такие кластеры преимущественно включались в кристаллическую структуру оливина и хромита. Добыча полезных ископаемых неизбежно оказывает воздействие на окружающую среду и местное население. Необходимо предусмотреть комплексные меры по минимизации негативных последствий, обеспечению устойчивого развития и справедливого распределения доходов.

### Заключение

Проведённый анализ геологических условий и структурно-тектонических особенностей месторождений никелевых руд в Бурунди позволил сделать Основные выводы исследования положения:

1. Подтверждена чёткая связь крупнейших месторождений никеля (в том числе Мусонгати) с мезопротерозойским Карагве-Анкольским поясом и его крупными расслоенными ультрамафическими интрузивами (например, Мусонгати–Гитараме). Это подчёркивает важность региональных тектоно-магматических процессов в формировании первичных рудных систем.

2. Установлено, что именно ультрамафиты (перидотиты, пироксениты, дуниты) являются основными носителями никеля и кобальта, содержащих эти элементы в составе первичных силикатных минералов.

3. Подтверждено, что основным механизмом образования промышленных латеритных никелевых руд является интенсивное тропическое выветривание. Оно вызывает разложение неустойчивых силикатов (оливина, пироксена), мобилизацию никеля и его переотложение в обогащённых горизонтах латеритного профиля (сапролитовая и глинистая зоны).

4. Месторождения никеля в Бурунди, особенно комплекс Мусонгати, обладают стратегическим значением. Их освоение может стать катализатором экономического роста, способствовать диверсификации экономики, привлечению инвестиций и укреплению позиций страны на мировом сырьевом рынке.

5. Для реализации проекта необходима разработка соответствующей инфраструктуры, внедрение сложных и капиталоемких технологий (например, гидрометаллургия высокого давления — HPAL), а также обеспечение устойчивого природопользования и социально-экологической ответственности.

В результате геохимических исследований в образцах обнаружены высокие концентрации никеля, а также титана, ванадия, меди, железа, хрома, кремния и других элементов. Высокие концентрации последних, скорее всего, связаны с процессами гипергенного окисления. Полученные результаты могут быть использованы для прогностических и поисковых исследований. Статья представляет интерес для научных работников, предпринимателей и специалистов, занимающихся вопросами сотрудничества между Республикой Бурунди и Российской Федерацией в сфере освоения геологических ресурсов, а также поставок оборудования для предприятий Республики Бурунди.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

### Список литературы / References

1. Колотилина Т.Б. Распределение элементов платиновой группы в сульфидных рудах ультрабазитовых массивов центральной части Восточного Саяна (юг Сибири, Россия) / Т.Б. Колотилина, А.С. Мехоношин, Д.А. Орсов // Геология рудных месторождений. — 2016. — Т. 58. — № 1. — С. 23–40. — DOI: 10.7868/S0016777015050020.
2. Служеникин С.Ф. Малосульфидные платиновые руды Норильского района — перспективные источники благородных металлов / С.Ф. Служеникин, В.В. Дистлер, А.В. Григорьева // Арктика: геология и экономика. — 2016. — № 4. — С. 32–45.
3. Chen L.-M. A laser ablation ICP-MS study of platinum group and chalcophile elements in base metal sulfide minerals of the Jinchuan Ni–Cu sulfide deposit, NW China / L.-M. Chen, X.-Y. Song, L.V. Danyushevsky [et al.] // Ore Geology Reviews. — 2015. — Vol. 65. — P. 955–967.
4. Ntiharirizwa S. Le potentiel en ressource minérale du Burundi, nord-est de la ceinture orogénique Kibarienne, Afrique central-orientale / S. Ntiharirizwa. — Québec, 2013. — 120 p.
5. Mbogoni T.L. Geology and Mineralization of Ultramafic Complexes in the Great Lakes Region: Implications for Nickel and Cobalt Exploration / T.L. Mbogoni, E.D. Msuya, F. Nguvumana // Journal of African Earth Sciences. — 2020. — 170 p.
6. Nkusi B. The Geology and Mineral Potential of the Kabanga-Musongati Nickel-Copper Deposits in Northwestern Tanzania and Southern Burundi / B. Nkusi, J.C. Kalala, M.P. Ndaluka [et al.] // Journal of African Earth Sciences. — 2011. — Vol. 61. — P. 199–218.

7. Fernandez-Alonso M. The Mesoproterozoic Karagwe-Ankole Belt (formerly the NE Kibara Belt): The result of prolonged extensional intracratonic basin development punctuated by two short-lived far-field compressional events / M. Fernandez-Alonso, H. Cutten, B. De Waele [et al.] // *Precambrian Research*. — 2012. — Vol. 216. — P. 63–86.
8. Kennedy B. Investigation of the possibility of platinum-group element clusters in magmatic systems, using synthetic sulphide melts / B. Kennedy. — University of the Free State, South Africa, 2014. — 190 p.
9. Kennedy B. The possible influence of PGE clusters on phase associations in Ni-Cu-S deposits, as deduced from synthetic sulphide systems / B. Kennedy, M. Tredoux, C. Ballhaus [et al.]; edited by E. Jonsson [et al.] // *Mineral deposits research for a high-tech world : proceedings of the 12th SGA Biennial Meeting*. — Uppsala, Sweden, 2013. — P. 159–161.
10. Tchouani M.E. Mineral Resources Potential of the East African Rift System: A Review of Geochemical Signatures and Tectonic Controls / M.E. Tchouani, A. Nono, P.N. Nouck // *Journal of African Earth Sciences*. — 2019. — 157 p.
11. Lightfoot P. Structural controls on the primary distribution of mafic-ultramafic intrusions containing Ni-Cu-Co-(PGE) sulphide mineralization in the roots of large igneous provinces / P. Lightfoot, D. Evans-Lamswood // *Ore Geology Reviews*. — 2015. — Vol. 64. — P. 354–386.
12. Burundi Musongati Mining. — URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Burundi\\_Musongati\\_Mining](https://en.wikipedia.org/wiki/Burundi_Musongati_Mining) (accessed: 25.02.2024).
13. Mungall J.E. Partitioning of platinum-group elements and Au between sulfide liquid and basalt and the origins of mantle-crust fractionation of the chalcophile elements / J.E. Mungall, J.M. Brenan // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. — 2014. — Vol. 125. — P. 265–289.
14. Abdelsalam M.G. The East African Rift System: An Overview of Tectonic Framework, Volcanism, and Resources / M.G. Abdelsalam, G.O. Adeyemi, C.J. Ebinger [et al.] // *African Geological Frameworks and Resources*. — 2018. — P. 1–35.
15. The Marela Project: Advancing a potentially world class Fe-Ti-V-Ni-Co-Sc polymetallic project in Guinea, West Africa / Optiva Resources Ltd. — 2023. — URL: <https://optivaresources.com> (accessed: 25.02.2023).
16. Paredis B. Platinum group element mineralization at Musongati (Burundi): Concentration and Pd-Rh distribution in pentlandite / B. Paredis, P. Muchez, S. Dewaele // *Geologica Belgica*. — 2017. — Vol. 20. — № 1–2. — DOI: 10.20341/gb.2016.018.
17. Shurweryimana Cl. Caracterisation des produits d'altération d'une roche basique sous climat tropical humide du Burundi: cas de Mukanda / Cl. Shurweryimana. — Bujumbura : Departement des sciences de la terre, Sciences Géologiques et Minéralogiques, 2013. — 50 p.
18. Tack L. Magmatic Mineralisation in the Burundi-Rwanda-Uganda Border Region / L. Tack, M. Veys, P. Minnaert // *European Journal of Mineralogy*. — 2011. — Vol. 23. — P. 379–394.
19. Zientek M.L. Magmatic ore deposits in layered intrusions – Descriptive model for reef-type PGE and contact-type Cu-Ni-PGE deposits / M.L. Zientek // *USGS Open-File Report*. — 2012. — 48 p.
20. Scholz C.A. The East African Rift System: A Laboratory for Lithospheric Dynamics / C.A. Scholz // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. — 2017. — Vol. 45. — P. 397–421.
21. Munyaneza O. Tectonic Setting and Petrogenesis of Granitic Rocks in Southern Burundi: Implications for Mineralization / O. Munyaneza, L. Nsengiyumva, P. Sibomana // *Journal of African Earth Sciences*. — 2016. — Vol. 123. — P. 245–260.
22. Mberu B. The Role of Artisanal and Small-Scale Mining (ASM) in Burundi's Mineral Sector Development / B. Mberu // *Resources Policy*. — 2021. — 71 p.
23. Ndayiragije T. Caractérisation des produits d'altération dérivés d'une roche-mère ultrabasique sous climat tropical humide du Burundi / T. Ndayiragije. — Bujumbura : Département des sciences de la terre, Sciences Géologiques et Minéralogiques, 2014. — 65 p.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Kolotilina T.B. Raspreделение ehlementov platinovoj gruppy v sul'fidnykh rudakh ul'trabazitovykh massivov central'noj chasti Vostochnogo Sayana (yug Sibiri, Rossiya) [GE distribution in sulfide ores from ultramafic massifs of the central East Sayan Mountains, Southern Siberia, Russia] / T.B. Kolotilina, A.S. Mekhonoshin, D.A. Orsoev // *Geologiya Rudnykh Mestorozhdenij* [Geology of Ore Deposits]. — 2016. — Vol. 58. — № 1. — P. 23–40. — DOI: 10.7868/S0016777015050020. [in Russian]
2. Sluzhenikin S.F. Malosul'fidnye platinovye rudy Noril'skogo rajona — perspektivnye istochniki blagorodnykh metallov [Low-sulfide platinum ores of Norilsk area — promising sources of precious metals] / S.F. Sluzhenikin, V.V. Distler, A.V. Grigoryeva // *Arktika: geologiya i ehkonomika* [Arctic: ecology and economy]. — 2016. — № 4. — P. 32–45. [in Russian]
3. Chen L.-M. A laser ablation ICP-MS study of platinum group and chalcophile elements in base metal sulfide minerals of the Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit, NW China / L.-M. Chen, X.-Y. Song, L.V. Danyushevsky [et al.] // *Ore Geology Reviews*. — 2015. — Vol. 65. — P. 955–967.
4. Ntiharirizwa S. Le potantiel en ressource minérale du Burundi, nord-est de la ceinture orogénique Kibarienne, Afrique central-orientale [Mineral resource potential of Burundi, northeast of the Kibaran orogenic belt, central-eastern Africa] / S. Ntiharirizwa. — Quebec, 2013. — 120 p. [in French]
5. Mbogoni T.L. Geology and Mineralization of Ultramafic Complexes in the Great Lakes Region: Implications for Nickel and Cobalt Exploration / T.L. Mbogoni, E.D. Msuya, F. Nguvumana // *Journal of African Earth Sciences*. — 2020. — 170 p.
6. Nkusi B. The Geology and Mineral Potential of the Kabanga-Musongati Nickel-Copper Deposits in Northwestern Tanzania and Southern Burundi / B. Nkusi, J.C. Kalala, M.P. Ndaluka [et al.] // *Journal of African Earth Sciences*. — 2011. — Vol. 61. — P. 199–218.

7. Fernandez-Alonso M. The Mesoproterozoic Karagwe-Ankole Belt (formerly the NE Kibara Belt): The result of prolonged extensional intracratonic basin development punctuated by two short-lived far-field compressional events / M. Fernandez-Alonso, H. Cutten, B. De Waele [et al.] // *Precambrian Research*. — 2012. — Vol. 216. — P. 63–86.
8. Kennedy B. Investigation of the possibility of platinum-group element clusters in magmatic systems, using synthetic sulphide melts / B. Kennedy. — University of the Free State, South Africa, 2014. — 190 p.
9. Kennedy B. The possible influence of PGE clusters on phase associations in Ni-Cu-S deposits, as deduced from synthetic sulphide systems / B. Kennedy, M. Tredoux, C. Ballhaus [et al.]; edited by E. Jonsson [et al.] // *Mineral deposits research for a high-tech world : proceedings of the 12th SGA Biennial Meeting*. — Uppsala, Sweden, 2013. — P. 159–161.
10. Tchouani M.E. Mineral Resources Potential of the East African Rift System: A Review of Geochemical Signatures and Tectonic Controls / M.E. Tchouani, A. Nono, P.N. Nouck // *Journal of African Earth Sciences*. — 2019. — 157 p.
11. Lightfoot P. Structural controls on the primary distribution of mafic-ultramafic intrusions containing Ni-Cu-Co-(PGE) sulphide mineralization in the roots of large igneous provinces / P. Lightfoot, D. Evans-Lamswood // *Ore Geology Reviews*. — 2015. — Vol. 64. — P. 354–386.
12. Burundi Musongati Mining. — URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Burundi\\_Musongati\\_Mining](https://en.wikipedia.org/wiki/Burundi_Musongati_Mining) (accessed: 25.02.2024).
13. Mungall J.E. Partitioning of platinum-group elements and Au between sulfide liquid and basalt and the origins of mantle-crust fractionation of the chalcophile elements / J.E. Mungall, J.M. Brennan // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. — 2014. — Vol. 125. — P. 265–289.
14. Abdelsalam M.G. The East African Rift System: An Overview of Tectonic Framework, Volcanism, and Resources / M.G. Abdelsalam, G.O. Adeyemi, C.J. Ebinger [et al.] // *African Geological Frameworks and Resources*. — 2018. — P. 1–35.
15. The Marela Project: Advancing a potentially world class Fe-Ti-V-Ni-Co-Sc polymetallic project in Guinea, West Africa / Optiva Resources Ltd. — 2023. — URL: <https://optivaresources.com> (accessed: 25.02.2023).
16. Paredis B. Platinum group element mineralization at Musongati (Burundi): Concentration and Pd-Rh distribution in pentlandite / B. Paredis, P. Muchez, S. Dewaele // *Geologica Belgica*. — 2017. — Vol. 20. — № 1–2. — DOI: 10.20341/gb.2016.018.
17. Shurweryimana Cl. Caractérisation des produits d'altération d'une roche basique sous climat tropical humide du Burundi: cas de Mukanda [Characterisation of weathering products of a basic rock in the humid tropical climate of Burundi: the case of Mukanda] / Cl. Shurweryimana. — Bujumbura : Department of Earth Sciences, Geological and Mineralogical Sciences, 2013. — 50 p. [in French]
18. Tack L. Magmatic Mineralisation in the Burundi-Rwanda-Uganda Border Region / L. Tack, M. Veys, P. Minnaert // *European Journal of Mineralogy*. — 2011. — Vol. 23. — P. 379–394.
19. Zientek M.L. Magmatic ore deposits in layered intrusions – Descriptive model for reef-type PGE and contact-type Cu-Ni-PGE deposits / M.L. Zientek // *USGS Open-File Report*. — 2012. — 48 p.
20. Scholz C.A. The East African Rift System: A Laboratory for Lithospheric Dynamics / C.A. Scholz // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. — 2017. — Vol. 45. — P. 397–421.
21. Munyaneza O. Tectonic Setting and Petrogenesis of Granitic Rocks in Southern Burundi: Implications for Mineralization / O. Munyaneza, L. Nsengiyumva, P. Sibomana // *Journal of African Earth Sciences*. — 2016. — Vol. 123. — P. 245–260.
22. Mberu B. The Role of Artisanal and Small-Scale Mining (ASM) in Burundi's Mineral Sector Development / B. Mberu // *Resources Policy*. — 2021. — 71 p.
23. Ndayiragije T. Caractérisation des produits d'altération dérivés d'une roche-mère ultrabasique sous climat tropical humide du Burundi [Characterisation of weathering products derived from ultrabasic bedrock in the humid tropical climate of Burundi] / T. Ndayiragije. — Bujumbura : Department of Earth Sciences, Geological and Mineralogical Sciences, 2014. — 65 p. [in French]