

**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.2025.2.4>

**ИЗУЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТИРУЕМОЙ РАЗВЕДКИ И ГЕОЛОГО-ПРОМЫШЛЕННОЙ ОЦЕНКИ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ НИКЕЛЯ И ВАНАДИЯ В ПРОЦЕССЕ ИХ ОСВОЕНИЯ В
РЕСПУБЛИКЕ БУРУНДИ**

Статья с данными

Игнатенко И.М.¹, Игнатенко Е.М.², Хакешимана Ж.К.^{3,*}, Бенуа Н.⁴

¹ ORCID : 0000-0002-9676-5774;

² ORCID : 0000-0002-4252-9848;

³ ORCID : 0009-0004-6029-2081;

⁴ ORCID : 0009-0003-3049-0100;

^{1,2,3,4} Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Российская Федерация

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

Аннотация

Данная статья посвящена анализу существующих и разработке новых методов геологического изучения, разведки и геолого-промышленной оценки месторождений никеля и ванадия в Республике Бурунди. В нем учтены особенности геологического строения и минералогического состава месторождений в Бурунди, а также особенности их разработки. Элементы черных металлов (Ni, V) являются важными металлами в различных отраслях промышленности, включая металлургию, производство стали и аккумуляторов. Понимание их петрографических и геохимических характеристик имеет важное значение для разведки, добычи и переработки этих металлов.

Добыча черных металлов (Ni, V) может оказывать негативное воздействие на окружающую среду, включая загрязнение подземных вод, деградацию почв, потерю среды обитания и выбросы парниковых газов. Поэтому важно использовать ответственные и устойчивые методы добычи полезных ископаемых, чтобы свести к минимуму это воздействие.

Изучение элементарной руды черного металла при разведке и геолого-промышленной оценке месторождений полезного ванадия в процессе их разработки в Республике Бурунди. Анализ отобранных образцов горных пород на прессе (лабораторный гидравлический рlg-12), энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия и отраженный свет. Обработка распределения химических элементов на основе полученных данных микрорентгенофлуоресцентного анализа.

Понимание петрографических и геохимических характеристик никеля и ванадия имеет важное значение для разведки, добычи и переработки этих важных металлов. Месторождения никеля и ванадия залегают в различных горных породах и геологических условиях, и их свойства значительно различаются. Важно учитывать потенциальное воздействие добычи этих металлов на окружающую среду и пропагандировать методы устойчивой эксплуатации.

Ключевые слова: никель, ванадий, геологическое изучение, геолого-промышленная оценка, Республика Бурунди.

**STUDY OF OPERATIONAL EXPLORATION AND GEOLOGICAL AND INDUSTRIAL EVALUATION OF
NICKEL AND VANADIUM MINERAL DEPOSITS IN THE PROCESS OF THEIR DEVELOPMENT IN THE
REPUBLIC OF BURUNDI**

Data paper

Ignatenko I.M.¹, Ignatenko Y.M.², Hakeshimana J.C.^{3,*}, Benoit N.⁴

¹ ORCID : 0000-0002-9676-5774;

² ORCID : 0000-0002-4252-9848;

³ ORCID : 0009-0004-6029-2081;

⁴ ORCID : 0009-0003-3049-0100;

^{1,2,3,4} Belgorod State University, Belgorod, Russian Federation

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

Abstract

This article is dedicated to the analysis of existing and development of new methods of geological study, exploration and geological and industrial evaluation of nickel and vanadium deposits in the Republic of Burundi. It takes into account the specifics of the geological structure and mineralogical composition of deposits in Burundi, as well as the features of their development. Ferrous elements (Ni, V) are important metals in various industries including metallurgy, steel and batteries. Understanding their petrographic and geochemical characteristics is important for exploration, mining and processing of these metals.

Ferrous metal (Ni, V) mining can have negative impacts on the environment, including groundwater contamination, soil degradation, habitat loss and greenhouse gas emissions. It is therefore important to use responsible and sustainable mining practices to minimise these impacts.

Study of ferrous metal elemental ore in the exploration and geological and industrial evaluation of useful vanadium deposits during their development in the Republic of Burundi. Analysis of selected rock samples on press (laboratory hydraulic

plg-12), energy dispersive X-ray spectroscopy and reflected light. Processing of the distribution of chemical elements based on the obtained data of micro-X-ray fluorescence analysis.

Understanding the petrographic and geochemical characteristics of nickel and vanadium is important for the exploration, mining and processing of these important metals. Nickel and vanadium deposits occur in a variety of rock formations and geological settings, and their properties vary considerably. It is important to take into account the potential environmental impacts of mining these metals and to promote sustainable exploitation practices.

Keywords: nickel, vanadium, geological study, geological and industrial evaluation, Republic of Burundi.

Введение

Ростом спроса на никель и ванадий в связи с развитием электромобильной промышленности, прогрессивной металлургии, подчеркивает необходимость эффективной геологической разведки и других отраслей, использующих эти металлы [1], [6]. Повышения эффективности геологоразведочных работ для обеспечения устойчивого развития добывающей промышленности в Республике Бурунди. Отсутствием комплексного подхода к изучению месторождений никеля и ванадия в Бурунди.

Никель входит в состав множества сплавов (бинарные сплавы *Ni-Cu*, *Ni-Si* или *Ni-Mo*, тройные сплавы, такие как *Ni-Cr-Fe*, *Ni-Cr-Mo* и т.д.) и активно используется в промышленности и энергетике [2], [3], [4]. Характеристика минерализации месторождений черных металлов, особенно никеля (*Ni*) и ванадия (*V*), в Бурунди, важна для понимания распределения, качества и экономического потенциала этих ресурсов. Геология Бурунди представлена докембрийскими формациями, которые могут содержать значительные залежи полезных ископаемых, включая железо. Магматические и метаморфические породы часто ассоциированы с минерализацией железа, никеля и ванадия. Для эффективной оценки необходимо применять междисциплинарный подход, объединяющий геологические, минералогические, экономические и экологические исследования.

Геологическое разнообразие Бурунди предоставляет значительные возможности для освоения месторождений никеля и ванадия, но также требует комплексных исследований для минимизации экологических последствий и оптимизации методов добычи.

Глубина скважины достигает нескольких метров, а её преимущество заключается в том, что она вертикально прорезает ферралитовую почву, куйрассу, ферралит, сапролит (выветрившийся перидотит) и достигает коренных пород почвы (слегка выветрившийся перидотит, серпентинизированный зеленовато-серый). Процессы концентрации чёрных металлов обычно происходят в магматических (ультраосновных и мафических), осадочных (богатых органическим веществом), гидротермальных и метаморфических горных породах.

В ней подчеркивается геологическое строение, минералогический состав и проблемы освоения этих месторождений.

Горные работы, особенно связанные с добычей никеля и ванадия, создают экологические вызовы, такие как загрязнение грунтовых вод, деградация почв и выбросы парниковых газов. Это подчеркивает необходимость устойчивых методов горных работ.

Методы и классификация принципов исследования

В исследовании анализировались образцы горных пород с использованием гидравлического пресса, энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии и микрорентгенофлуоресцентного анализа. Основное внимание уделялось распределению элементов и геохимическим характеристикам никеля и ванадия. Используемые методы включают геохимический анализ образцов горных пород, особенности руд и связанных с их эксплуатацией полезных ископаемых. Оценка пространственного распределения содержания элементов в рудных телах для определения запасов и качества руды химический анализ образцов горных пород на черные металлы и другие элементы.

Многочисленные исследования минерализации, проведенные в Бурунди, показывают существование нескольких типов месторождений полезных ископаемых [6].

По геологическим характеристикам, условиям формирования и генезису месторождения полезных ископаемых Бурунди можно разделить на восемь категорий, из которых наиболее часто эксплуатируются кустарным способом следующие (Табл. 1):

- 1) основные породы, минерализованные *Fe-Ti* и *V*;
- 2) ультраосновные породы, минерализованные *Ni-Cu* (\pm ЭПГ);
- 3) карбонатиты и сиениты, минерализованные редкоземельными элементами и цирконом;
- 4) метасоматические жилы, минерализованные редкоземельными элементами;
- 5) никельсодержащие латериты.

В зависимости от происхождения месторождения полезных ископаемых Бурунди также можно разделить на три группы:

- месторождения, связанные с эволюцией Кибарского орогена;
- месторождения, связанные с открытием западной ветви Восточно-Африканского рифта;
- месторождения, связанные с климатическими условиями региона.

Таблица 1 - Месторождения полезных ископаемых черных металлов и элементов группы Платина в Бурунди

DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2025.2.4.1>

Типы месторождения	Минерализация	Группа или класс	Возраст (Ma)
Основные породы	<i>Fe, Ti, V</i>	Магматическое	1275 \pm 11

Типы месторождения	Минерализация	Группа или класс	Возраст (Ma)
Ультраосновные породы	<i>Ni, Cu, EGP</i>	Магматическое	1275±11
Карбонатиты	<i>REE</i>	Магматическое	739±7
Сиениты	<i>Zr</i>	Магматическое	699±13
Метасоматические вены	<i>REE</i>	Гидротермальное	587±5
Никельсодержащие латериты	<i>Ni, Cu, Co, Cr, EGP</i>	Осадочное	протерозой фанерозой

Важнейшие полезные ископаемые страны руды чёрных металлов, которые также содержат медь, кобальт и платину (месторождения в центре и на востоке, крупнейшее из которых Мусонгати) [7], [8]. Значительны также запасы богатых титаномагнетитовых руд, содержащих ванадий. Горнодобывающий потенциал Бурунди состоит в основном из:

- значительной никелевой минерализации мирового класса, сопровождаемой кобальтом и платиной;
- месторождений ванадия и редкоземельных элементов (REE);
- промышленных минералов, таких как фосфаты, известняк, каолин, глина и различные другие строительные материалы.

Бурунди расположена в самом сердце Африки, в районе «Великих озёр», в тропическом регионе.

Классификация латеритных месторождений никеля в зависимости от климата (сухой, сухой влажный, влажный) выделяет три типа профилей латеритных месторождений никеля, образующих три типа залежей:

- окисленные или лимонитовые;
- силикатные;
- глинистые.

Окисленные месторождения образуются во влажном тропическом климате. Они разрабатываются на гарцбургите и сочетают в себе *Ni, Co* и *Mn* (например, месторождения Моа-Бей на Кубе и Горо в Новой Каледонии). Эти фации также развиваются на дунитах, в которых много кремнезёма и мало глины (например, месторождение Sawse в Австралии). Никель рано задерживается в гётитовой структуре, которая развивается за счёт оливина, а также в оксидах марганца (абсолютах), осаждающихся в результате окислительно-восстановительных процессов в трещинах [9].

Силикатные месторождения, богатые гидратированными силикатами магния и никеля, являются наиболее богатыми никелем (1,8–2,5% *Ni* в сапролите). Минералогия этих месторождений сложна: силикаты и алюминаты образуют твёрдые растворы между *Mg* и *Ni*. Нумеит особенно богатая никелем разновидность. Кобальт встречается в виде абсолюта, аморфного оксида.

В глинистых отложениях (сухих латеритах) наблюдается частичное выщелачивание кремнезёма в результате поверхностного выветривания. Затем сапролит содержит смектиты (нонtronиты натрия), которые связывают никель. Месторождения развиваются на серпентинизированных перидотитах, в менее агрессивном климате и на небольших холмах [2].

В Бурунди окисленные и силикатные типы месторождений присутствуют примерно в равных пропорциях, а глинистые месторождения незначительны. Никель в окисленном типе связан с гётитом, а в силикатном с минералами группы серпентина (хризотил, антигорит) и глинистыми минералами (пимелит и нонtronит) [10].

Распределение элементов платиновой группы было определено на основании анализов, проведенных по профилю скважины. Элементы группы платины и редкоземельных элементов были изучены для оценки их концентраций. Эти элементы входят в состав ультраосновных пород, таких как оливин, гиперстен, антигорит, хризотил и сульфидные минералы [11], [12]. Их распределение в различных почвенных горизонтах зависит от процессов, которые повлияли на коренные породы с момента их залегания, а также от воздействия гипергенных условий (рис. 1).

Щелочи и щелочные земли (*Si, Mg, Na, K, Ca*) выщелачиваются во всех латеритных горизонтах, и их уровень постоянно ниже или близок к пределу обнаружения. *Ti* показывает лишь незначительный прирост массы в куйрассе (CU) и латеритной почве (SL), в то время как *Al* и *Fe* увеличивают массу от 2 до 20% на этих уровнях [2].

Среди микроэлементов следует отметить, что *Cu* выщелачивается из всех латеритных горизонтов. *Ni, Cu, Co* и *Mn* выщелачиваются из латеритной почвы и брони, в то время как они постепенно обогащаются от ферралита к сапролиту [13]. На уровне сапролита никель показывает значительный прирост, достигая около 10 000 ppm.

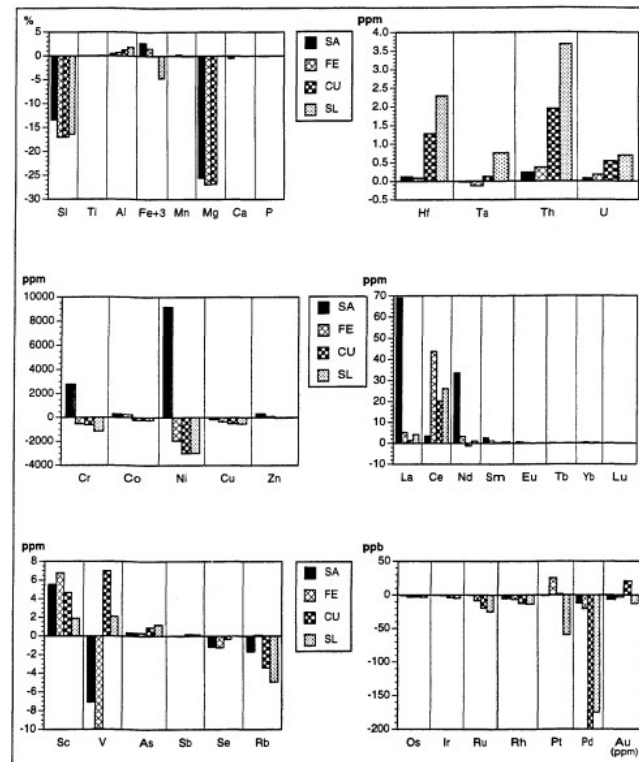


Рисунок 1 - Распределение элементов платиновой группы основано на анализах, проведенных по профилю скважины
DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2025.2.4.2>

Ультраосновные породы представляют собой наиболее важные горные единицы, на которых развиваются никеленосные латериты [2]. Глубина скважины достигает нескольких метров, и её преимущество заключается в том, что она вертикально прорезает изменённый перидотит и достигает коренной породы. Как обсуждается выше в разделах петрографии, можно выделить три основные ультраосновные единицы: дуниты, гарцбургиты и перидотиты. В районе Муканды, образованный интрузивным массивом Муканда-Бухоро, имеются геоморфологические и педологические характеристики, контрастирующие с осадочными вмещающими породами. Геологическая порода в почве, описанная при бурении как перидотит, является дунитом. Для каждого типа пород можно рассчитать среднее арифметическое значение результатов геохимического анализа [14]. Эти средние значения могут быть использованы в качестве начального значения для процессов латеритизации. Эти режимы наблюдаются на самых высоких частотах, представляя собой состав, наиболее близкий к латеритным ультраосновным породам. Они составляют почвенный профиль. Он используется для мониторинга эволюции изменения ультраосновных пород, физического (по буровому керну), химического и минералогического на большой глубине [2], [14].

Характеристика минерализации месторождений элементов чёрных металлов в Бурунди необходима для понимания распределения, качества и экономического потенциала этих ресурсов. Бурунди представляет геологию с докембрийскими формациями, которые могут содержать месторождения железа [1]. Магматические и метаморфические породы часто связаны с минерализацией железа. Характеристика месторождений чёрных металлов в Бурунди требует междисциплинарного подхода, объединяющего геологию, минералогический анализ и оценку состояния окружающей среды. Глубокое понимание этих аспектов поможет максимально увеличить экономический потенциал при соблюдении экологических и социальных стандартов страны. Также необходимо учитывать оценку потенциального воздействия горных работ на местную окружающую среду, включая биоразнообразие, водные ресурсы и почву [15].

Одной из причин быстрого освоения геологических техногенных массивов полезных ископаемых никеля является повышение эффективности условий освоения руд черных металлов в Республике Бурунди. Генезис месторождений полезных ископаемых определяет их основные геологические и промышленные характеристики: условия залегания, формы и размеры минеральных тел, состав материалов и структурно-текстурные характеристики.

Предложено ранее разделение промышленных типов для техногенных месторождений чёрных металлов и благородных металлов основано на их генетической классификации. Так, для никелевых предприятий цветной металлургии выделены следующие геолого-промышленные типы:

- 1) отвалы, связанные с добычей никелевой руды;
- 2) отвалы остатков обогатительного производства;
- 3) отвалы металлургического передела.

Наиболее важными из этих геолого-промышленных типов, представляющими в настоящее время особый интерес, являются отвалы металлургических шлаков, расположенные на крупных предприятиях [16].

Результаты и обсуждение

Никель и ванадий встречаются в различных геологических средах с отличительными геохимическими профилями. Исследование предлагает понимание характеристик минерализации этих месторождений, делая акцент на устойчивой добыче и охране окружающей среды.

Результаты картирования химических элементов показывают нулевые изменения объема элементов (рис. 2). Анализы с использованием энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии и рентгеновской дифрактографии позволяют выявить элементы, которые с наибольшей вероятностью будут группироваться вместе, и пересчитать объемные коэффициенты, соответствующие относительной неподвижности элементов в группах платиновых металлов (EGP) или оксидах в выбранных образцах [17]. Это позволяет для каждого образца, сравниваемого с материнской породой (исходной породой), определить среднее изменение нулевого объема выбранных элементов или элемента из таблицы изменения нулевого объема элементов, проанализированных по энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии и рентгеновской дифрактографии рудного концентрата для анализа элементов платиновой группы или микроэлементов (*Ni, Cu, Cr, Ca, Mn, Fe, Ti, Al, V, Si, Cl* и др.). Это также включает в себя расчет весового процента (массовой доли) и атомного процента. Выбор неподвижных элементов дает среднее изменение объема, которое применяется к другим компонентам породы для определения содержания в них элементов платиновой группы или микроэлементов (*Ni, Cu, Cr, Ca, Mn, Fe, Ti, Al, V, Si, Cl* и др.) при латеритизации [2], [18].

Разведка месторождений никеля (*Ni*) и ванадия (*V*) обычно включает геохимические и геофизические исследования, а также бурение и анализ керна. Добыча месторождений элементов черной металлургии *Ni-V* (никеля и ванадия) зависит от типа месторождения и содержания металла. К распространенным методам добычи относятся открытая, подземная добыча и выщелачивание [3], [14]. Никелевые вмещающие породы обычно представляют собой ультраосновные породы, такие как перидотиты, дуниты, пироксениты и габбро. Эти породы встречаются в офиолитовых комплексах (породах океанической коры) или в зонах интрузивной магмы. Никелевые руды обычно ассоциируются с сульфидами железа, такими как пирротин и пентландит. Они также могут присутствовать в виде оксидов и гидроксидов [3]. Ванадий встречается в различных породах, включая магматические, осадочные и метаморфические. Элемент ванадий (*V*) присутствует в таких минералах, как ванадинит, патронит и роскоэлит. Он также может присутствовать в виде растворенных ионов в грунтовых и поверхностных водах [19].

Анализы полученных результатов наглядного распределения химических микроэлементов в образцах были выполнены с использованием метода рентгенофлуоресцентного анализа Spectroscan-MAX GV и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии [20]. В ходе проведенного анализа выяснилось, что выявленные элементы *Ni, Cu, Cr, Ca, Mn, Fe, Ti, Al, V, Si, Cl* и другие составляют элементы группы платиновых металлов и микроэлементы, которые встречаются в концентрациях чуть более 0,05%.

Анализируя 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: *Mg* – 21,80-17,90%, *Si* – 13,63-9,69%, *Fe* – 7,06-2,52%, и небольшое количество *Al* – 1,9-1,42%, *Ti* – 0,26-0,11%, *Ca* – 0,23-0,11%, *Mn* – 0,21-0,08%, *Ni* – 0,22-0,07% и др. В результате геохимических исследований было установлено, что в образцах были обнаружены высокие концентрации магний, кремния, железа, алюминия и других элементов. Высокие концентрации этих элементов, скорее всего, связаны с процессами окисления гипергена. Понятие латеритов никелевых охватывает концепцию относительного или абсолютного накопления Fe_2O_3 , SiO_2 и MgO , а также частичные или полные потери в Al_2O_3 , MnO , Ni_2O_3 и других оксидах.

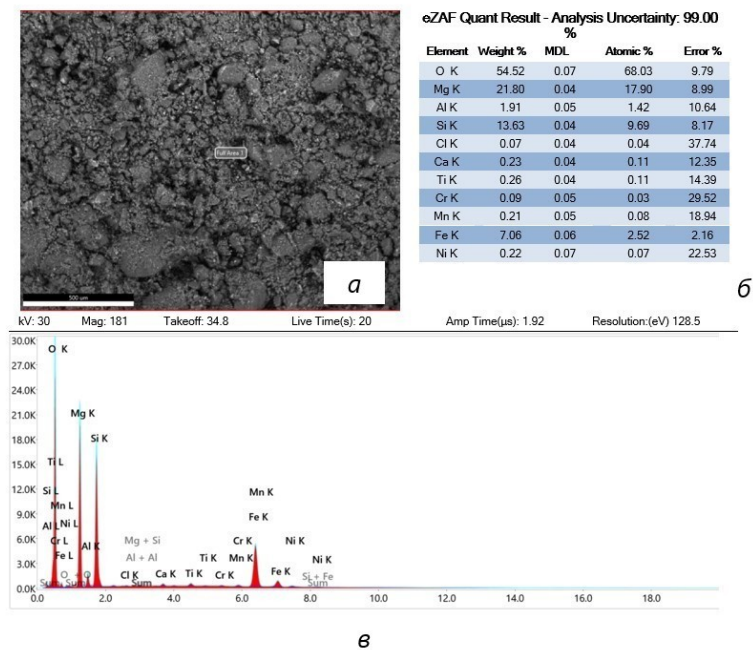


Рисунок 2 - Результаты картирования химических элементов энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия: а - спектральное изображение магния; б - таблица содержания химических элементов; в - график, отображающий содержание и концентрацию элементов
DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2025.2.4.3>

Примечание: EDX - спектр магний (с примесью оксидов кремния и алюминия) и железа

Содержание *Cl*, *Ca*, *Ti*, *Ni*, *Mn*, *Cr* встречаются в низких концентрациях, в основном в посткумулусе, за исключением мафических и ультрамафических пород Мусонгати, Ньябикере и Вага, где они образуют относительно толстые линзы (от 1 до 500 м) латеритных никеленосных отложений и высокие концентрации магния, кремния и железа. Сульфиды также широко рассеяны в основных кумулятах, за исключением Мусонгати, Ньябикере и Вага, где они образуют линзы (дуниты, гарцбургиты и перидотиты) в верхней части оксидной минерализации и на восточном краю интрузии [17]. Основными никелевыми рудами являются пентландит ($(Fe, Ni)_9S_8$), миллерит (NiS), гарниерит ($(Ni, Mg)_6Si_4O_{10}(OH)_8$) и лимонит ($FeO(OH), H_2O$). Он обычно концентрируется в ультраосновных магматических породах, таких как перидотиты и дуниты, и в сульфидах никеля, образующихся в магматических и гидротермальных средах [4], [21].

По данным элементного химического картирования и петрографического анализа шлифов для образца, установлено присутствие *Mg*, *Al*, *Si*, *Ti*, *Fe*, *V* и др (перечисленные элементы, где весовой процент (массовая доля) и атомный процент выше 0,05%). Анализируя карты распределения элементов, можно отметить, что в состав руд черных металлов входят следующие элементы в следующих соотношениях: *Fe* 37,13-17,19%, *Ti* 10,61-5,73%, *Al* 5,42-5,2% и небольшое количество *Si* 3,22-2,96%, *V* 1,31-0,66% и других элементов. (рис. 3)

В результате геохимических исследований было установлено, что в исследуемых абразивах имеются высокие концентрации железа, титана и алюминия. Высокие концентрации этих элементов обусловлены гипергенетическими окислительными процессами. С точки зрения химического элементного окислительного состава, понятие «ванадоносный» охватывает концепцию относительного или абсолютного накопления Fe_2O_3 и Al_2O_3 , а также частичные или полные потери в SiO_2 и других оксидах.

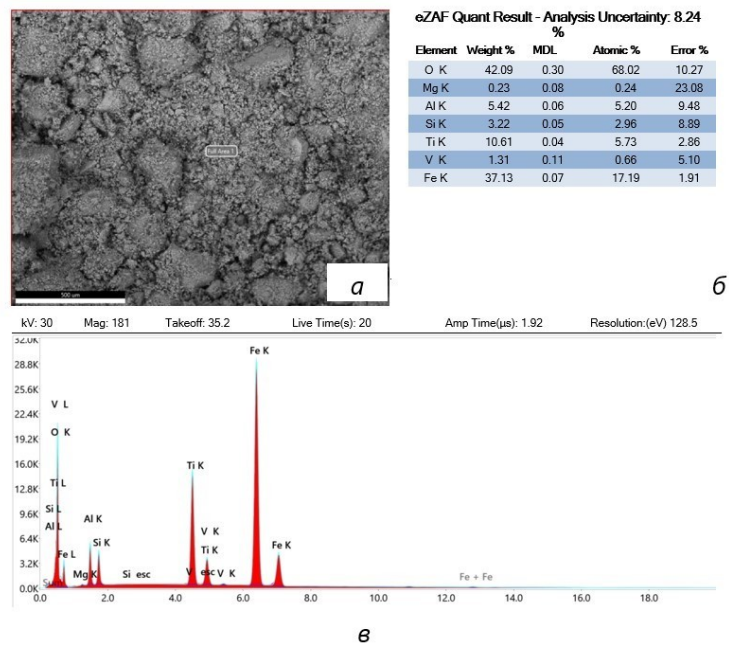


Рисунок 3 - Результаты картирования химических элементов энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия: а - спектральное изображение магния; б - таблица содержания химических элементов; в - график, отображающий содержание и концентрацию элементов
DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2025.2.4.4>

Примечание: EDX - спектр магний (с примесью оксидов кремния и алюминия) и железа

Содержание *Mg*, *V* и *Si* встречаются в низких концентрациях, в основном в посткумулусе, за исключением анортозитов Муканды, где они образуют относительно толстую линзу (от 1 до 500 м) ванадоносного титаномagnetита (месторождение Муканда) и высокие концентрации железа, титана, и др [22]. В оксидах *Fe-Ti* концентрация одного из элементов увеличивается, в то время как другого уменьшается в залежах ванадия. Сульфиды также сильно рассеяны в основных кумулятах, за исключением Муканды, где они формируют линзы (пирротин) в верхней части оксидной минерализации и на восточном краю интрузии (Итаба-Фуньянгесо) [19]. В габбровых породах иногда встречаются дайки и жилы лампрофира. Эта порфировая микролитовая порода характеризуется обилием мелких красно-коричневых lamellae биотита и присутствием сильно вытянутых моноклинных кристаллов пироксена. Остальная часть матрицы представлена очень тонкозернистым полевошпатовым веществом.

Основными ванадиевыми рудами являются ванадинит ($Pb_5(VO_4)_3Cl$), патронит (VS_4), роскоэлит ($K(V, Al, Fe)_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$) и ванадат (V_2O_5). Ванадий концентрируется в магматических породах, в органически богатых осадочных породах и угольных месторождениях [23].

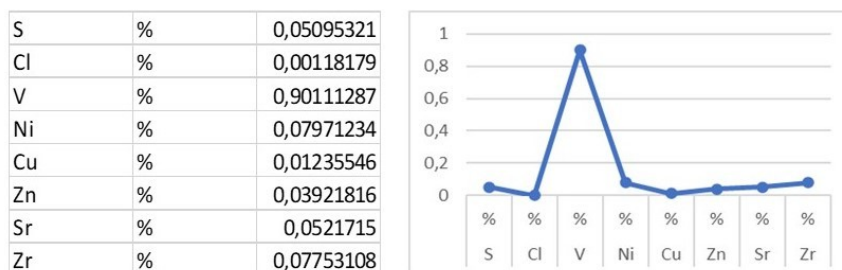


Рисунок 4 - Химические элементы в месторождениях черных металлов и тяжелых металлов
DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2025.2.4.5>

При анализе химических элементов отмечаются очень высокие концентрации *V* и *Ni*, что связано с процессами образования тяжелых металлов и снижением содержания *Cl*. Содержание железа очень близко к значениям, приведенным в литературе по базальтам и габбровым породам. Из перечисленных методов для нашей задачи хорошо подходит рентгенофлуоресцентный анализ. Он позволяет быстро определить элементное содержание тяжелых металлов: *S*, *Cl*, *V*, *Ni*, *Cu*, *Zn*, *Sr*, *Zr* и т.д. [20].

Результаты исследования показали, что образцы, собранные в Республике Бурунди, содержат микроэлементы и черных металлов (Табл.2). Статистические данные показывают минимальные, максимальные и средние значения содержания микроэлементов: *S* 0,05095321%, *Cl* 0,00118179%, *V* 0,90111287%, *Ni* 0,0797123424%, *Cu* 0,01235546%, *Zn* 0,03921816%, *Sr* 0,0521715%, *Zr* 0,07753108%.

Месторождения никеля часто связаны с ультраосновными формациями, а ванадий можно найти в железных рудах и других типах пород. Развитие горнодобывающей промышленности может внести значительный вклад в экономику Бурунди, и ванадий (особенно для технологий возобновляемой энергии) предлагает интересные перспективы [24]. Содержание *V* варьируется от очень высокого (0,9011%) до очень низкого (0,0011%) в концентрациях минералов тяжелых металлов. Эти черные металлы важны в различных областях, включая металлургию, химию и промышленность материалов [25].

Исследование минерализации месторождений *Ni* и *V* в Бурунди требует комплексного подхода с учетом геологических, минералогических, экономических и экологических факторов. Применение современных методов анализа, таких как ЭДС (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) и XRD (X-ray Diffraction), позволяет получить детальную информацию о составе руд и процессах формирования месторождений. Дальнейшие исследования необходимы для более точной оценки потенциала этих ресурсов и разработки стратегий устойчивой добычи, минимизирующих воздействие на окружающую среду.

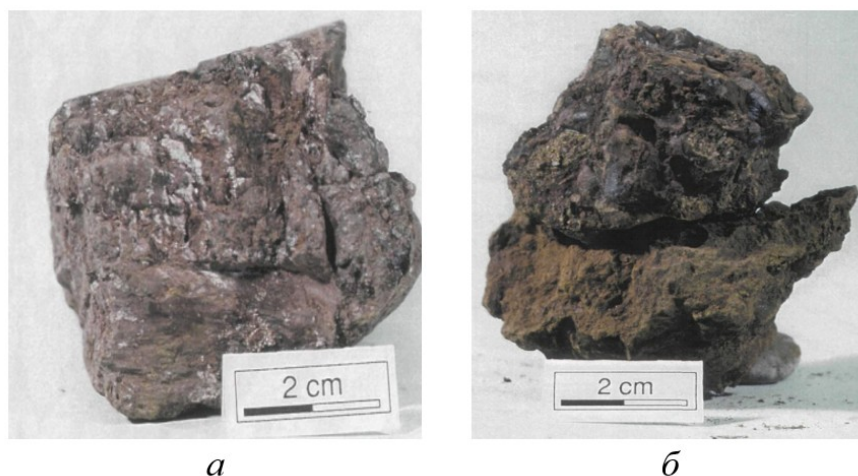


Рисунок 5 - Ферралит состоящий из никельсодержащего гетита:
a - при α николях; *б* - при Π николях
 DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2025.2.4.6>

Структура ферралита землистая, часто слоистая, а иногда и зональная. В верхней части ферралит постепенно переходит в куирассе, отмеченное коллоидными гетитовыми структурами и пизолитами гетит-гематитового состава. Если для сапролита характерны более или менее изоволюмические изменения, то ферралит более подвержен разрушению и потере объема, удерживаясь вместе чрезвычайно хрупкими структурами (Рис 4).

Заключение

Разведка месторождений никеля и ванадия обычно включает геохимические и геофизические исследования, а также бурение и анализ химического элементного окислительного состава. В исследованных образцах обнаружены высокие концентрации *V* и *Ni*, что связано с процессами образования тяжелых металлов и снижением содержания *Cl*. Добыча месторождений элементов черных металлов *Ni-V* (никеля и ванадия) зависит от типа месторождения и содержания металла. Распространенные методы добычи включают открытую, подземную и выщелачивающую добычу.

Разработка и оценка месторождений черных металлов в Бурунди требует комплексного подхода, сочетающего геологические знания, передовые методы разведки, экологические соображения и стремление к устойчивому развитию. Это потенциально может изменить экономический ландшафт страны при соблюдении экологических стандартов и социальных норм.

Понимание петрографических и геохимических характеристик месторождений никеля и ванадия имеет ключевое значение для их устойчивого освоения. В данной статье подчеркивается важность согласования горных практик с охраной окружающей среды, а также использования передовых методов разведки для максимальной эффективности. При правильном подходе Бурунди может использовать свои минеральные ресурсы для устойчивого экономического роста. Месторождения никеля и ванадия встречаются в различных породах и геологических средах, и их свойства существенно различаются. Важно учитывать потенциальное воздействие добычи этих металлов на окружающую среду и способствовать практике устойчивой эксплуатации.

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

- Roonwal G.S. Mineral exploration: practical application (Mineral exploration: practical application) / G.S. Roonwal. — Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2018. — P. 301. — DOI: 10.1007/978-981-10-5604-8
- 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. — P. 1–65.
- Ntiharirizwa S. Le potentiel en ressource minérale du Burundi, nord-est de la ceinture orogénique Kibarienne, Afrique central-orientale / S. Ntiharirizwa. — Québec, 2013. — P. 120.
- 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: optivaresources.com (accessed: 25.02.2024).
- Brough C. The geology of Vanadium deposits / C. Brough, R.J. Bowell, J. Larkin // An Introduction to Vanadium / Ed. by R. Bowell. — Nova Science Publishers, 2019. — Chap. 4 — P. 87–117.
- Gandhi S.M. Essentials of mineral exploration and evaluation (Essentials of mineral exploration and evaluation) / S.M. Gandhi, B.C. Sarkar. — Amsterdam: Elsevier Inc, 2016. — P. 406 .
- Musongati Nickel Project Updates. (2022). Developments in Nickel Mining in Burundi. — URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Burundi_Musongati_Mining (accessed: 25.02.2024).
- Kabanga Nickel. (2023). Kabanga Nickel Project Developments in Tanzania. — URL: https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1852940/000121390023014570/ea174305-425_lifezone.htm (accessed: 25.02.2024).
- Kennedy B. Investigation of the possibility of platinum-group element clusters in magmatic systems, using synthetic sulphide melts / B. Kennedy. — 2014. — P.190.
- Чернышов Н.М. Никеленосные рудные районы Воронежского кристаллического массива: геология и минерагения : монография / Н.М. Чернышов, А.Ю. Альбеков, В.М. Остуднев; Министерство образования и науки РФ. — Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2016. — 91 с.
- 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. — № 20. — DOI: 10.20341/gb.2016.018.
- Junge M. Cryptic variation of chromite chemistry, platinum group element and platinum group mineral distribution in the UG-2 chromitite: an example from the Karee Mine, western Bushveld Complex, South Africa / M. Junge, T. Oberthur, F. Melcher // *Economic Geology*. — 2014. — P. 109, 795–810.
- Junge M. Mineralogical siting of platinum-group elements in pentlandite from the Bushveld Complex, South Africa / M. Junge, R. Wirth, T. Oberthür [et al.] // *Mineralium Deposita*. — 2015. — P. 41–54.
- Shurweryimana Cl. Caractérisation des produits d'altération d'une roche basique sous climat tropical humide du Burundi: cas de Mukanda / Cl. Shurweryimana. — Bujumbura: Département des sciences de la terre, Sciences Géologiques et Minéralogiques, 2013. — P. 1-50.
- Лощинин В.П. Поиски, разведка и геологоэкономическая оценка месторождений полезных ископаемых. Практикум / В.П. Лощинин, Г.А. Пономарёва. — Саратов: Профобразование, 2020. — С. 102.
- Макаров А.Б. Геолого-промышленные типы техногенных месторождений / А.Б. Макаров, А.Г. Талалай, Г.Г. Хасанова // *Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН*. — 2018. — № 8. — С. 80–85. — DOI: 10.19110/2221-1381-2018-8-39-45.
- 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. Орсоев // *Геология рудных месторождений*. — 2016. — Т. 58. — № 1. — С. 23–40. — DOI: 10.7868/S0016777015050020.285.
- Franchuk A. High tenor Ni-PGE sulfide mineralization in the south Manasan ultramafic intrusion, Paleoproterozoic Thompson Nickel Belt, Manitoba, Canada / A. Franchuk, P.C. Lightfoot, D.J. Kontak // *Ore Geology Reviews*. — 2015. — № 72. — P. 434–458
- Gilligan R. The extraction of vanadium from titanomagnetites and other sources / R. Gilligan, A.N. Nikoloski // *Miner. Eng.* — 2020. — P. 106, 146.
- Методика измерений доли металлов, оксидов металлов в порошках пробах почв и донных отложений энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия и рентгенофлуоресцентным методом. М-049/18.2024 // Единое окно доступа к образовательным ресурсам Электронная Лаборатория БелГУ.
- Lesaffer A. Nature and formation processes of the supergene Pb-Zn-Cu-V mineralization of Bamba Kilenda, Bas-Congo Province, DR Congo / A. Lesaffer. — University of Gent, 2014. — P. 121.
- Wotruba H. Mineral processing and metallurgical treatment of lead vanadate ores / H. Wotruba // *Minerals*. — 2020. — № 10 (2). — P. 197. — DOI: 10.3390/min10020197.
- The Green Giant Vanadium Project // *Next Source Materials*. — 2017. — URL: <https://www.nextsourcematerials.com/vanadium/green-giant-vanadium-project> (accessed: 25.02.2024).
- Kelley K.D. Vanadium—U.S. Geological Survey Professional Paper 1802 / K.D. Kelley, C.T. Scott, D.E. Polyak [et al.] // *Critical Mineral Resources of the United States — Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply*. — 2017.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Roonwal G.S. Mineral exploration: practical application (Mineral exploration: practical application) / G.S. Roonwal. — Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2018. — P. 301. — DOI: 10.1007/978-981-10-5604-8
2. Ndayiragije T. Caractérisation des produits d'altération dérivés d'une roche-mère ultrabasique sous climat tropical humide du Burundi [Characterisation of alteration products derived from an ultrabasic bedrock in the humid tropical climate of Burundi] / T. Ndayiragije. — Bujumbura: Department of Earth Sciences, Geological and Mineralogical Sciences, 2014. — P. 1–65. [in French]
3. Ntiharirizwa S. Le potentiel en ressource minérale du Burundi, nord-est de la ceinture orogénique Kibarienne, Afrique central-orientale [The mineral resource potential of Burundi, northeast of the Kibaran orogenic belt, East-Central Africa] / S. Ntiharirizwa. — Québec, 2013. — P. 120. [in French]
4. 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: optivaresources.com (accessed: 25.02.2024).
5. Brough C. The geology of Vanadium deposits / C. Brough, R.J. Bowell, J. Larkin // An Introduction to Vanadium / Ed. by R. Bowell. — Nova Science Publishers, 2019. — Chap. 4 — P. 87–117.
6. Gandhi S.M. Essentials of mineral exploration and evaluation (Essentials of mineral exploration and evaluation) / S.M. Gandhi, B.C. Sarkar. — Amsterdam: Elsevier Inc, 2016. — P. 406 .
7. Musongati Nickel Project Updates. (2022). Developments in Nickel Mining in Burundi. — URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Burundi_Musongati_Mining (accessed: 25.02.2024).
8. Kabanga Nickel. (2023). Kabanga Nickel Project Developments in Tanzania. — URL: https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1852940/000121390023014570/ea174305-425_lifezone.htm (accessed: 25.02.2024).
9. Kennedy B. Investigation of the possibility of platinum-group element clusters in magmatic systems, using synthetic sulphide melts / B. Kennedy. — 2014. — P.190.
10. Chernyshov N.M. Nikelenosnye rudnye rajony Voronezhskogo kristallicheskogo massiva: geologija i mineragenija : monografija [Nickel-bearing ore regions of the Voronezh Crystalline massif: geology and minerageny : monograph] / N.M. Chernyshov, A.Ju. Al'bekov, V.M. Ostudnev; Ministry of Education and Science of the Russian Federation. — Voronezh : VSU Publishing House, 2016. — 91 p. [in Russian]
11. 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. — № 20. — DOI: 10.20341/gb.2016.018.
12. Junge M. Cryptic variation of chromite chemistry, platinum group element and platinum group mineral distribution in the UG-2 chromitite: an example from the Karee Mine, western Bushveld Complex, South Africa / M. Junge, T. Oberthur, F. Melcher // *Economic Geology*. — 2014. — P. 109, 795–810.
13. Junge M. Mineralogical siting of platinum-group elements in pentlandite from the Bushveld Complex, South Africa / M. Junge, R. Wirth, T. Oberthür [et al.] // *Mineralium Deposita*. — 2015. — P. 41–54.
14. Shurweryimana Cl. Caractérisation des produits d'altération d'une roche basique sous climat tropical humide du Burundi: cas de Mukanda [Characterization of the alteration 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. — P. 1-50. [in French]
15. Loshhinin V.P. Poiski, razvedka i geologojekonomicheskaja ocenka mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh. Praktikum [Search, exploration and geological and economic evaluation of mineral deposits. Practicum] / V.P. Loshhinin, G.A. Ponomarjova. — Saratov: Profobrazovanie, 2020. — P. 102. [in Russian]
16. Makarov A.B. Geologo-promyshlennye tipy tehnogennyh mestorozhdenij [Geological and industrial types of technogenic deposits] / A.B. Makarov, A.G. Talalaj, G.G. Hasanova // *Vestnik IG Komi NC UrO RAN [Bulletin of IG Komi NTs Ural RAS]*. — 2018. — № 8. — P. 80–85. — DOI: 10.19110/2221-1381-2018-8-39-45. [in Russian]
17. Kolotilina T.B. Raspređenje jelementov platinovoj gruppy v sul'fidnyh rudah ul'trabazitovyh massivov central'noj chasti Vostochnogo Sajana (jug Sibiri, Rossija) [Distribution of platinum group elements in sulfide ores of ultrabasic massifs of the central part of the Eastern Sayan (southern Siberia, Russia)] / T.B. Kolotilina, A.S. Mehonoshin, D.A. Orsoev // *Geologija rudnyh mestorozhdenij [Geology of Ore Deposits]*. — 2016. — Vol. 58. — № 1. — P. 23–40. — DOI: 10.7868/S0016777015050020.285. [in Russian]
18. Franchuk A. High tenor Ni-PGE sulfide mineralization in the south Manasan ultramafic intrusion, Paleoproterozoic Thompson Nickel Belt, Manitoba, Canada / A. Franchuk, P.C. Lightfoot, D.J. Kontak // *Ore Geology Reviews*. — 2015. — № 72. — P. 434–458
19. Gilligan R. The extraction of vanadium from titanomagnetites and other sources / R. Gilligan, A.N. Nikoloski // *Miner. Eng.* — 2020. — P. 106, 146.
20. Metodika izmerenij doli metallov, oksidov metallov v poroshkah probah pochv i donnyh otlozhenij jenergodispersionnaja rentgenovskaja spektroskopija i rentgenofluorescentnyj metodom. M-049/18.2024 [Methods of measuring the fraction of metals, metal oxides in powders of soil samples and bottom sediments energy dispersive X-ray spectroscopy and X-ray fluorescence method. M-049/18.2024] // *Edinoe okno dostupa k obrazovatel'nyj resursam Jelektronnaja Laboratorija BelGU [Single window of access to educational resources Electronic Laboratory of BelSU]*. [in Russian]
21. Lesaffer A. Nature and formation processes of the supergene Pb-Zn-Cu-V mineralization of Bamba Kilenda, Bas-Congo Province, DR Congo / A. Lesaffer. — University of Gent, 2014. — P. 121.
22. Wotruba H. Mineral processing and metallurgical treatment of lead vanadate ores / H. Wotruba // *Minerals*. — 2020. — № 10 (2). — P. 197. — DOI: 10.3390/min10020197.

23. The Green Giant Vanadium Project // Next Source Materials. — 2017. — URL: <https://www.nextsourcematerials.com/vanadium/green-giant-vanadium-project> (accessed: 25.02.2024).

24. Kelley K.D. Vanadium—U.S. Geological Survey Professional Paper 1802 / K.D. Kelley, C.T. Scott, D.E. Polyak [et al.] // Critical Mineral Resources of the United States — Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply. — 2017.