УДК 669.243.822(470.325)
DOI: 10.36979/1694-500X-2026-26-8-92-107

СЕРНОКИСЛОТНОЕ ВСКРЫТИЕ ЛАТЕРИТНОЙ НИКЕЛЕВОЙ РУДЫ БЕЛОГОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

П.А. Осипов, Р.А. Шаяхметова, А.А. Мухаметжанова

Аннотация. Рассматривается исследование минералогического состава окисленной железоникелевой руды Белогорского месторождения, локального поэлементного состава отдельных частиц и фрагментов, а также изучение изменений их минералогического и химического состава после сернокислотного выщелачивания методом сканирующей электронной микроскопии в сочетании с энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией (СЭМ–ЭДС). Установлено, что исходная руда представлена преимущественно серпентиновыми минералами, кварцем и железосодержащими фазами различного состава. Локальный ЭДС-анализ выявил наличие как практически мономинеральных частиц кварца, серпентина и железистых минералов, так и сложных железо-силикатных агрегатов с неравномерным распределением элементов. Исследование твердого остатка после сернокислотного выщелачивания показало практически полное удаление никельсодержащих и серпентиновых минералов, а также частичное растворение железосодержащих фаз. Остаток обогащен преимущественно кварцем, антигоритом и устойчивыми железистыми минералами. Полученные результаты подтверждают высокую эффективность сернокислотного выщелачивания никельсодержащих минералов и согласуются с данными рентгенофазового анализа.

Ключевые слова: окисленная никелевая руда; антигорит; нипуит; пимелит; серпентинит; сернокислотное выщелачивание.

БЕЛОГОРСК КЕНИНИН ЛАТЕРИТТИК НИКЕЛЬ КЕНИН КҮКҮРТ КИСЛОТАСЫ МЕНЕН АЧУУ

П.А. Осипов, Р.А. Шаяхметова, А.А. Мухаметжанова

Аннотация. Макалада Белогорск кенинин кычкылданган темир-никель кенинин минералогиялык курамын, айрым бөлүкчөлөрүнүн жана фрагменттерин локалдык элементтер боюнча курамын изилдөө, ошондой эле энергия-дисперсиялык рентген спектроскопиясы менен айкалышкан сканирлөөчү электрондук микроскопия (СЭМ–ЭДС) ыкмасы аркылуу күкүрт кислотасы менен шакарсыздандыруудан кийинки алардын минералогиялык жана химиялык курамынын өзгөрүүлөрүн үйрөнүү каралат. Баштапкы кен негизинен серпентиндик минералдар, кварц жана ар кандай курамдагы темир кармаган фазалар менен берилгени аныкталган. Локалдык ЭДС-талдоо кварцтын, серпентиндин жана темирлүү минералдардын иш жүзүндө мономинералдык бөлүкчөлөрүнүн, ошондой эле элементтери бир калыпта эмес бөлүнгөн татаал темир-силикаттык агрегаттардын бар экендигин көрсөттү. Күкүрт кислотасы менен шакарсыздандыруудан кийинки катуу калдыктарды изилдөө никель кармаган жана серпентиндик минералдардын дээрлик толугу менен бөлүнүп чыгышын, ошондой эле темир кармаган фазалардын жарым-жартылай эришин көрсөттү. Калдык негизинен кварц, антигорит жана туруктуу темирлүү минералдар менен байытылган. Алынган натыйжалар никель кармаган минералдарды күкүрт кислотасы менен шакарсыздандыруунун жогорку натыйжалуулугун далилдейт жана рентгенофазалык талдоонун маалыматтарына дал келет.

Түйүндүү сөздөр: кычкылданган никель кени; антигорит; нипуит; пимелит; серпентинит; күкүрт кислотасы менен шакарсыздандыруу.

SULFURIC ACID LEACHING OF LATERITIC NICKEL ORE FROM THE BELOGORSKOYE DEPOSIT

P.A. Osipov, R.A. Shayakhmetova, A.A. Mukhametzhanova

Abstract. The aim of this study was to investigate the mineralogical composition of the oxidized iron–nickel ore from the Belogorskoye deposit, determine the local elemental composition of individual particles and fragments, and evaluate changes in their mineralogical and chemical composition after sulfuric acid leaching using scanning electron microscopy coupled with energy-dispersive X-ray spectroscopy (SEM–EDS). The results showed that the initial ore is composed predominantly of serpentine minerals, quartz, and iron-bearing phases of various compositions. Local EDS analysis revealed the presence of both nearly monomineralic particles of quartz, serpentine, and iron minerals, as well as complex iron-silicate aggregates with a heterogeneous distribution of elements. Examination of the solid residue after sulfuric acid leaching demonstrated the almost complete dissolution of nickel-bearing and serpentine minerals, together with partial dissolution of iron-bearing phases. The residue was enriched mainly in quartz, antigorite, and stable iron-bearing minerals. The obtained results confirm the high efficiency of sulfuric acid leaching for the extraction of nickel-bearing minerals and are in good agreement with the X-ray diffraction (XRD) data.

Keywords: oxidized nickel ore; antigorite; nepouite; pimelite; serpentine; sulfuric acid leaching.

Введение. Никель является одним из стратегически важных металлов современной промышленности благодаря широкому применению в производстве нержавеющих и жаропрочных сталей, специальных сплавов, катодных материалов для литий-ионных аккумуляторов, а также как основа для создания композитных гальванопокрытий [1, 2]. Рост производства электромобилей и систем накопления энергии обусловливает устойчивое увеличение спроса на никель, что делает актуальным вовлечение в переработку все более бедных латеритных руд [3, 4].

Казахстан располагает значительными запасами окисленных никелевых руд, представленных преимущественно латеритными месторождениями, одним из которых является Белогорское. Руда характеризуется высоким содержанием магнийсодержащих силикатов и железистых минералов, при этом никель находится главным образом в составе серпентинов и никелевых гидросиликатов [5]. Из-за значительной взаимной прорастаемости минералов друг в друга применение традиционных методов обогащения оказывается малоэффективным, поэтому переработке подвергается практически вся добытая руда.

Промышленное производство никеля из латеринтовых никелевых руд основано как на пирометаллургических [6–8], так и на гидрометаллургических [9–11] или совместных процессах [12–14]. Наиболее перспективным направлением переработки латеритных никелевых руд являются гидрометаллургические методы. По сравнению с пирометаллургическими процессами они отличаются меньшими энергозатратами и позволяют извлекать никель из бедных силикатных руд. Обогащение руд традиционными физико-химическими методами неэффективно, поэтому на металлургическую переработку поступает огромная масса первичной руды.

Среди них наибольшее промышленное применение получило сернокислотное выщелачивание, основанное на разрушении никельсодержащих силикатов с переводом никеля и магния в раствор [15, 16]. Эффективность процесса определяется минералогическим составом руды, концентрацией кислоты, температурой, продолжительностью выщелачивания и соотношением твердой и жидкой фаз [17, 18].

При сернокислотном выщелачивании в первую очередь разрушаются никелевые гидросиликаты и минералы группы серпентина, тогда как кварц и тальк остаются преимущественно в твердом остатке. Одновременно растворяются магний и часть железа, что существенно влияет на расход кислоты и последующую очистку продуктивных растворов [19].

Целью настоящей работы являлось исследование минералогического состава руды Белогорского месторождения, локального поэлементного состава отдельных частиц и фрагментов, а также изучение изменений их минералогического и химического состава после сернокислотного выщелачивания методами сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (СЭМ–ЭДС).

Методы исследований. Объектом исследования являлась окисленная магнезиально-железистая никелевая руда Белогорского месторождения, представленная порошкообразными образцами. Морфологию поверхности и локальный элементный состав образца исследовались методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) в сочетании с энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией (ЭДС) с использованием системы INCA Energy 450, установленной на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM 6490LA. Метод позволяет с высокой точностью идентифицировать элементный состав поверхностей и срезов исследуемых материалов. Электронно-микроскопическую съемку проводили в режиме контраста по атомному номеру (BED-C) при ускоряющем напряжении 15,0 кВ и рабочем расстоянии 12,0 мм.

Фазовый состав исследовали методом рентгеновской дифрактометрии (РФА) на дифрактометре ДРОН 4-07, оснащённом кобальтовой анодной трубкой. Съёмку проводили при 30 кВ и 20 мА, со скоростью развёртки 2°/мин. Интерпретацию дифрактограмм осуществляли с использованием базы данных ASTM Powder Diffraction File и эталонных образцов минералов.

Выщелачивание образцов окисленной никельсодержащей магнезиальной руды проводили при оптимальных технологических параметрах процесса: концентрация серной кислоты 20 %, температура 85–90 °С, соотношение твердого и жидкого состояний 1:4, скорость перемешивания 400 об/мин и времени выщелачивания 180 минут, позволяющие извлечь из окисленных руд никель на 82–85 % и на 92–93 % магний [18].

Результаты и обсуждение. Внешний вид поверхности исследуемой руды, характерная ЭДС-спектрограмма и суммарный элементный состав образца представлены на рисунке 1. Визуализацию микроструктуры получали при увеличении × 200.

На представленных микрофотографиях наблюдаются частицы различной формы и размеров, что свидетельствует о гетерогенном строении исследуемого образца (рисунок 1, *а*). Отдельные частицы имеют развитую пористую структуру, обусловленную природной анизотропией кристаллов и особенностями процессов выветривания и окисления минералов. Микроструктурный анализ образца в режиме отраженных электронов выявил выраженную фазовую и химическую неоднородность. Основная матрица характеризуется темно-серым контрастом, на фоне которого распределены яркие

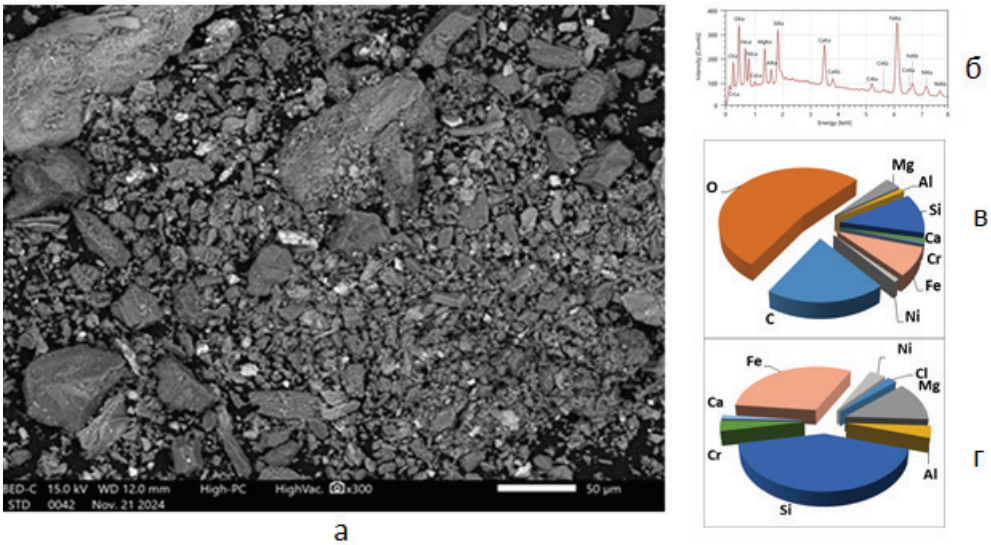


Рисунок 1 – Вид поверхности руды (а), полученный методом СЭМ (× 200),
характерная ЭДС – спектрограмма (б), суммарный поэлементный состав рассматриваемого образца (в, г)

высококонтрастные микровключения неправильной формы размером от 2 до 10 мкм. Локальное ЭДС-картирование и точечный анализ подтвердили, что различие контраста обусловлено существенным отличием средних атомных номеров элементов, входящих в состав данных фаз, что хорошо видно на характерной ЭДС-спектрограмме (рисунок 1, *б*). Суммарный поэлементный состав рассматриваемого образца в виде диаграмм распределения элементов приведен на рисунках 1, *в* и 1, *г*.

На представленных диаграммах отчетливо видно распределение основных химических элементов, формирующих исследуемый участок руды. По данным ЭДС-анализа исследованный фрагмент представляет собой железистую силикатную руду с высоким содержанием кислорода, что свидетельствует о преобладании оксидных и силикатных минералов. Поскольку суммарное содержание кислорода и углерода составляет практически три четверти общего состава (см. рисунок 1, *в*), здесь и при дальнейшем обсуждении результатов основное внимание уделено остальным элементам с учетом их присутствия преимущественно в составе кислородсодержащих соединений (см. рисунок 1, *г*). Углерод, вероятнее всего, связан с углеродсодержащей подложкой.

На основании полученных результатов можно предположить, что исследуемая руда представлена комплексом окисленных железисто-магнезиальных силикатных минералов. Высокое содержание кислорода подтверждает принадлежность исследуемого материала к окисленным никелевым рудам. Значительные концентрации железа и кислорода позволяют предположить присутствие таких минералов, как гематит, магнетит и гетит. Повышенное содержание кремния и магния свидетельствует о наличии серпентиновых минералов и магний-железистых силикатов. Остальные элементы, в частности алюминий и кальций, вероятнее всего, входят в состав алюмосиликатных и кальцийсодержащих минералов и присутствуют в относительно небольших количествах.

Никель является характерным компонентом ультраосновных пород и в исследуемой руде может находиться в составе гарниерита, никельсодержащих разновидностей серпентина, а также изоморфно замещать магний и железо в структуре силикатных минералов. Полученное содержание никеля соответствует значениям, характерным для окисленных железисто-силикатных никелевых руд Белогорского месторождения.

Следует учитывать, что метод ЭДС не позволяет однозначно идентифицировать минеральные фазы, поскольку определяет только локальный элементный состав исследуемого участка. Для достоверного установления фазового состава необходимы данные рентгенофазового анализа (XRD), которые в комплексе с результатами растровой электронной микроскопии обеспечивают надежную минералогическую интерпретацию.

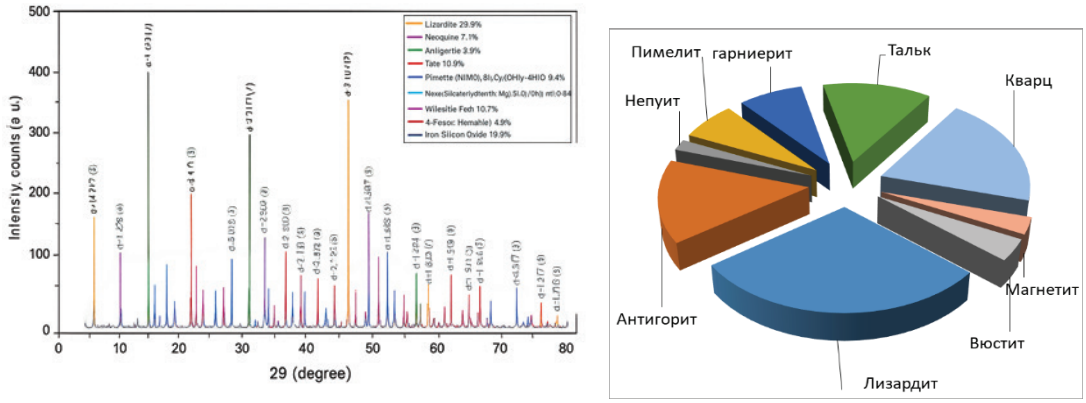
Проведенный рентгенофазовый анализ позволил установить минералогический состав окисленной магнезиально-железистой никелевой руды Белогорского месторождения (рисунок 2).

Результаты анализа показали, что исследуемый образец относится к серпентинитовой никелевой силикатной руде, в которой преобладают минералы группы серпентина при заметном содержании никелевых гидросиликатов и кварца. Полученные данные хорошо согласуются с результатами ЭДС-анализа и подтверждают силикатный тип никелевой минерализации.

Основными минералами руды являются лизардит, антигорит, непуит, пимелит, никелевые гидросиликаты, тальк, кварц, а также железосодержащие оксидные минералы.

Лизардит является преобладающей минеральной фазой. Это магнийсодержащий филлосиликат группы серпентина, в кристаллической структуре которого никель может изоморфно замещать магний. Антигорит также относится к минералам группы серпентина и характеризуется широкими возможностями изоморфного замещения магния железом, никелем и другими элементами.

Основными носителями никеля являются непуит, пимелит и никелевые гидросиликаты. Непуит представляет собой никелевую разновидность серпентина, пимелит-никельсодержащий слоистый силикат, близкий по строению к тальку, а гарниерит является собирательным названием комплекса никелевых гидросиликатов магния, образующихся в процессе выветривания ультраосновных пород.



а б

Рисунок 2 – Рентгеновская дифрактограмма никелевой руды (а);
количественный фазовый состав (б)

Именно эти минералы наиболее активно взаимодействуют с серной кислотой и определяют извлечение никеля при выщелачивании.

Кремнеземистая составляющая представлена преимущественно кварцем, который характеризуется высокой кристалличностью и химической устойчивостью, вследствие чего практически не взаимодействует с разбавленной серной кислотой. Тальк относится к вторичным магнийсиликатам, образовавшимся при гидротермальном преобразовании серпентинитов, и также отличается высокой устойчивостью в кислой среде, сохраняясь в составе твердого остатка после выщелачивания.

Таким образом, исследуемый материал относится к окисленным силикатным никелевым рудам латеритного типа, сформировавшимся в результате гипергенного преобразования ультраосновных пород. Основную массу руды составляют минералы группы серпентина, тогда как никель сосредоточен преимущественно в непуите, пимелите и никелевых гидросиликатах. Наличие кварца и талька свидетельствует о развитии процессов окремнения и талькизации, а присутствие железистых оксидных минералов отражает высокую степень окисления исходной породы.

Рассмотрим более подробно локальный элементный состав отдельных фрагментов исследуемого образца, определённый методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС), визуализация микроструктуры проводились при увеличении × 2000 (рисунок 3, *а*), а характерные ЭДС-спектрограммы приведены на рисунке 3, *б*.

На спектре Spc 001 (см. рисунок 3, *а*) хорошо различима светлая частица, характеризующаяся очень высоким содержанием железа при незначительных количествах кремния и магния, вероятно в виде серпентинита и малой примеси алюминия, что хорошо видно на спектрограмме (см. рисунок 3, *б* – красная линия) и отражено на локальном поэлементном составе рассматриваемого образца (рисунок 4, *а*). Результаты анализа свидетельствует о том, что данный участок представлен практически железистым минералом (железной рудой).

Спектр Spc 002 соответствует более тёмной области поверхности образца (см. рисунок 3, *а*). Наряду с высоким содержанием железа здесь фиксируются значительные количества кремния и магния (см. рисунок 3, *б* – синяя линия), что характерно для минералов группы серпентина, а также никельсодержащих силикатов, таких как непуит или гарниерит. Кроме того, в составе участка присутствуют небольшие количества алюмосиликатных и кальцийсодержащих минеральных фаз.

Спектр Spc 003 охватывает сравнительно крупную область различных частиц (см. рисунок 3, *а*) и поэтому характеризуется более сложным составом минералов и химических элементов.

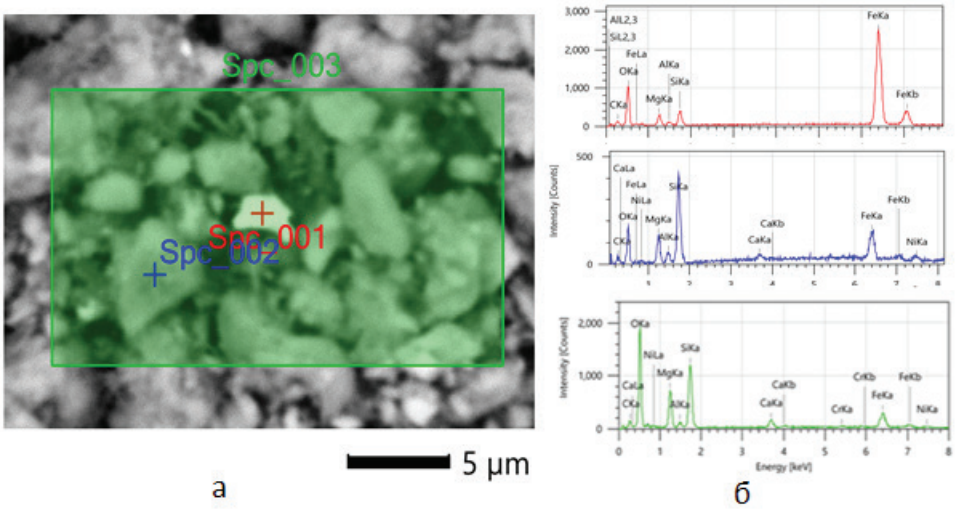


Рисунок 3 – СЭМ изображение фрагмента поверхности руды с указанием областей локального микроанализа (а), соответствующие ЭДС-спектрограммы (б)

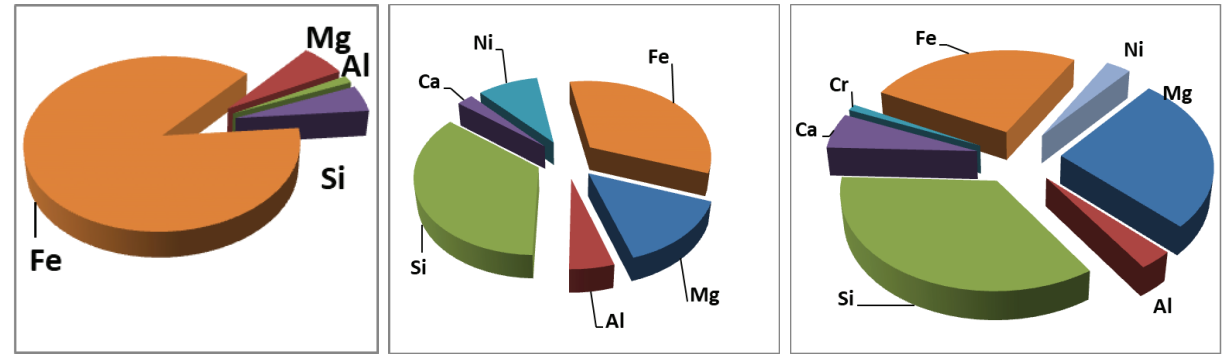


Рисунок 4 – Локальный поэлементный состав исследуемых участков:
а – Spc 001; б – Spc 002; в – Spc 003

ЭДС-спектрограмма (см. рисунок 3, *б* – зелёная кривая) подтверждает присутствие тех же основных компонентов, которые были выявлены в предыдущих спектрах. Высокие содержания железа, кремния и магния указывает на преобладание уже рассмотренных минералов (рисунок 4, *в*). При этом содержание никеля понижено, также зарегистрированы небольшие количества алюминия, кальция и хрома, указывающие на присутствие алюмосиликатных, кальцийсодержащих и хромсодержащих минералов.

Внешний вид частиц и отдельных фрагментов следующей области исследуемой поверхности руды, полученный методом СЭМ и характерные ЭДС-спектрограммы рассматриваемых частиц и отдельных фрагментов, представлены на рисунках 5, *а, б*. Масштабирование и визуализация микроструктуры проводились при увеличении × 200. Составы частиц и отдельных фрагментов исследуемой руды приведены на рисунке 6.

Состав частицы Spc 004 (см. рисунок 5, *а*) практически полностью представлен кремнезёмом, что хорошо видно на ЭДС-спектрограмме (см. рисунок 5, *б* – малиновая линия). По соотношению кремния

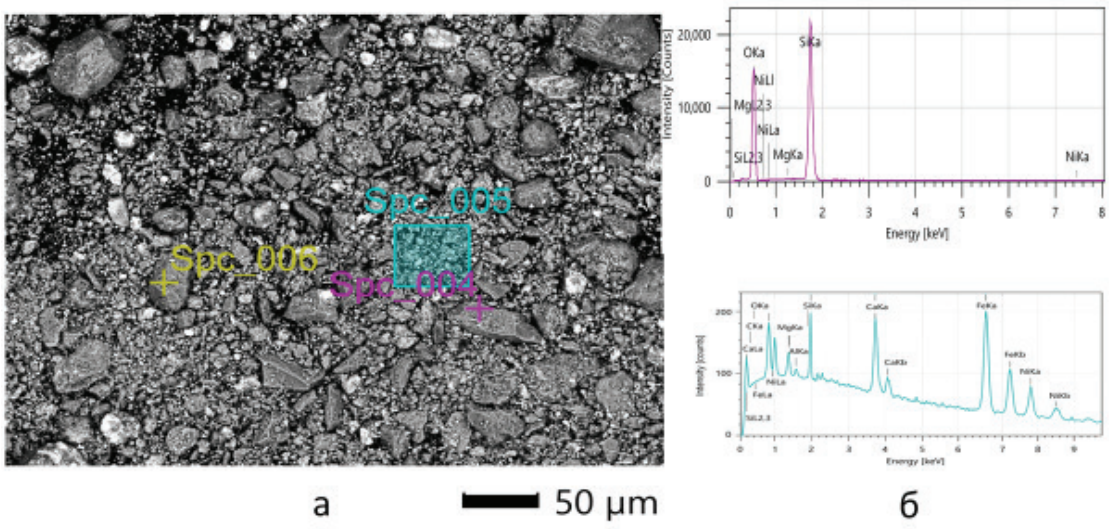
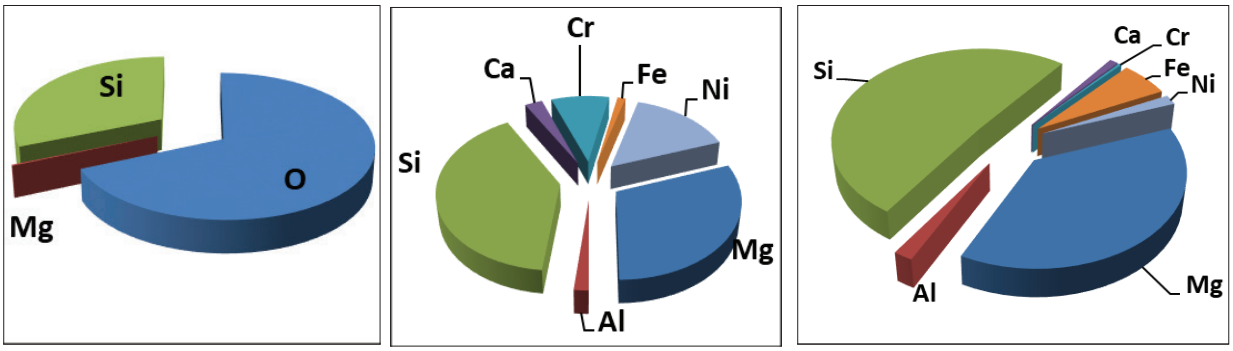


Рисунок 5 – Внешний вид поверхности руды с локализацией спектров, полученный методом СЭМ × 200, (а) и характерные спектрограммы (б)



а б в

Рисунок 6 – Локальное распределение элементов в частицах и отдельных фрагментах исследуемой руды: а – Spc 004; б – Spc 005; в – Spc 006

и кислорода (рисунок 6, *а*), с учётом погрешности метода ЭДС, исследуемая частица соответствует составу кварца (SiO_2). Незначительные примеси магния могут быть обусловлены присутствием небольшого количества серпентина.

Фрагмент Spc 005 аналогично Spc 003 охватывает относительно большую область с различными минеральными частицами (см. рисунок 5, *а*), и также характеризуется сложным элементным составом заметным на ЭДС-спектрограмме (см. рисунок 5, *б* – зелёная линия). Высокое содержание никеля вместе с магнием и кремнием указывают на наличие пимелита или гарниита (рисунок 6, *б*). Также фиксируется присутствие хромсодержащих минералов, вероятно хромита. Железо, алюминий и кальций присутствуют лишь в незначительных количествах.

Частица Spc 006 представлена преимущественно минералами группы серпентина. Незначительное содержание никеля свидетельствует скорее об изоморфном замещении магния никелем

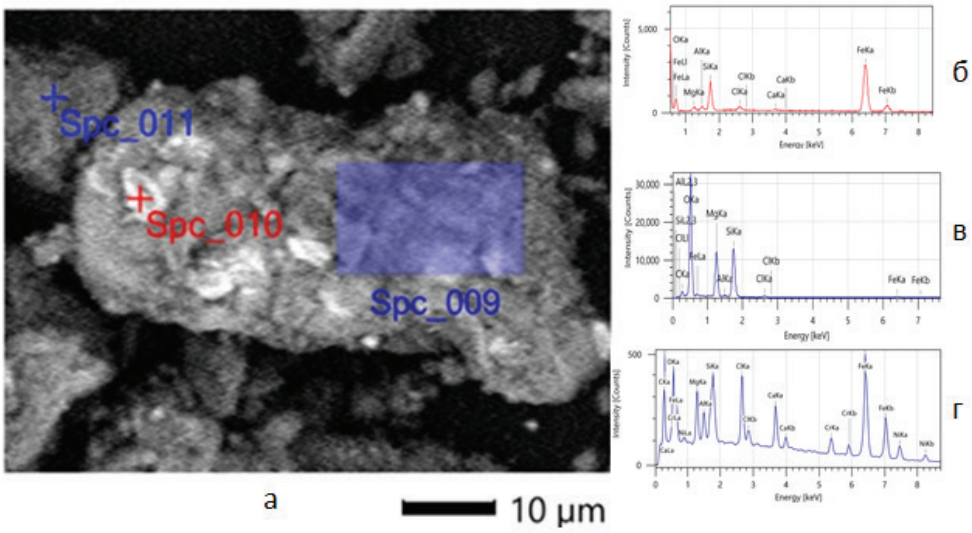
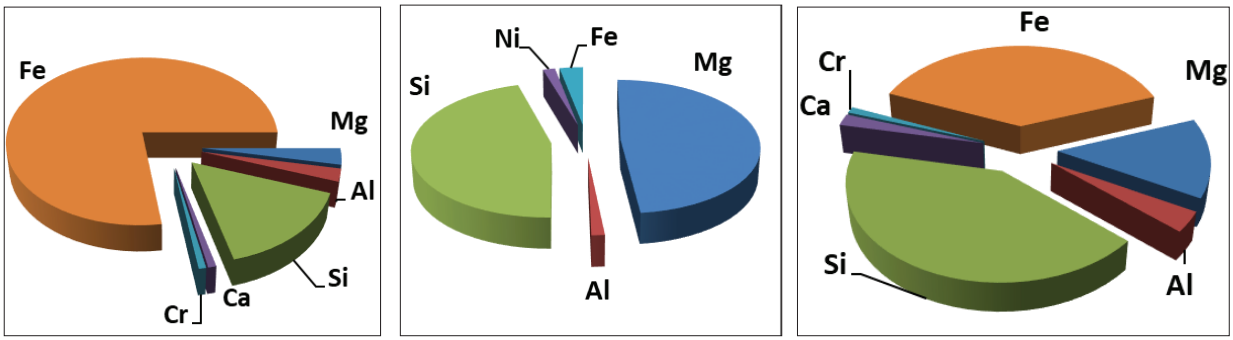


Рисунок 7 – СЭМ изображение (×1000) частиц руды (а),
характерные спектрограммы (б, в и г)



а б в

Рисунок 8 – Локальный поэлементный состав исследуемых участков:
а – спектр Spc 010; б – спектр Spc 011; в – спектр Spc 009

в кристаллической структуре серпентина (рисунок 6, *в*). Алюмосиликаты и железосодержащие минералы обнаруживаются лишь в виде незначительных примесей.

Следующая исследуемая частица характеризуется сложным строением и состоит из большого количества мелких включений, различающихся контрастом на СЭМ-изображении, что свидетельствует об их неоднородном фазовом составе. Внешний вид исследуемой частицы с многочисленными мелкими включениями, полученный методом СЭМ, а также результаты локального ЭДС микроанализа отдельных включений и фрагментов представлены на рисунках 7 и 8. Визуализация микроструктуры проводились при увеличении × 1000.

Спектр Spc 010 представлен преимущественно железосодержащей фазой, что хорошо видно на спектрограмме (см. рисунки 7, *а* и 7, *б*). По соотношению железа и кислорода, в пределах погрешности метода ЭДС, можно предположить присутствие магнетита (Fe_3O_4) (рисунок 8, *а*). Наряду

с этим выявляется примесь минералов группы серпентина, в которых никель, вероятно, находится в виде изоморфной примеси. Кроме того, фиксируются незначительные количества алюмосиликатных минералов.

Спектр Spc 011 (рисунок 8, *б*) характеризуется преобладанием легких элементов – магния, кремния и кислорода, что указывает на доминирование минералов группы серпентина. Небольшое содержание никеля позволяет предположить присутствие никельсодержащей фазы, вероятнее всего непуита, либо изоморфное вхождение никеля в структуру серпентина. Кроме того, обнаружены незначительные количества хромсодержащих минералов, а также следовые содержания железа, алюмосиликатов и кальцийсодержащих соединений.

Анализ спектра Spc 009 (рисунок 8, *в*) в совокупности с результатами исследования соседних участков показывает, что данный фрагмент представляет собой механическую смесь железистых минералов и серпентина. Рассмотрение только локального элементного состава могло бы привести к предположению о присутствии железосиликатной (ферросиликатной) фазы. Однако комплексная интерпретация данных СЭМ–ЭДС свидетельствует о том, что исследуемый участок является механическим срастанием железной руды с серпентиновыми минералами, а не самостоятельной железосиликатной минеральной фазой.

На следующем участке микрофотографии (рисунок 9) отчетливо выделяются две частицы, резко различающиеся по контрасту на СЭМ-изображении – светлая и темная. Такое отличие обусловлено существенными различиями в их химическом составе и среднем атомном номере.

Даже на характерной ЭДС-спектрограмме (см. рисунок 9, *б* – красная кривая) хорошо видно, что светлая частица Spc 012 представлена практически чистой железосодержащей фазой. Основными элементами являются железо и кислород, что позволяет предположить присутствие железного оксида (магнетита либо гематита). Это подтверждается результатами локального элементного анализа, приведенными на рисунке 10, *а*.

Тёмная частица Spc 013, (рисунок 10, *б* – синяя кривая), напротив, характеризуется высоким содержанием кремния, магния и кислорода при практически полном отсутствии железа. По своему элементному составу она соответствует кварцу с незначительной примесью минералов группы серпентина

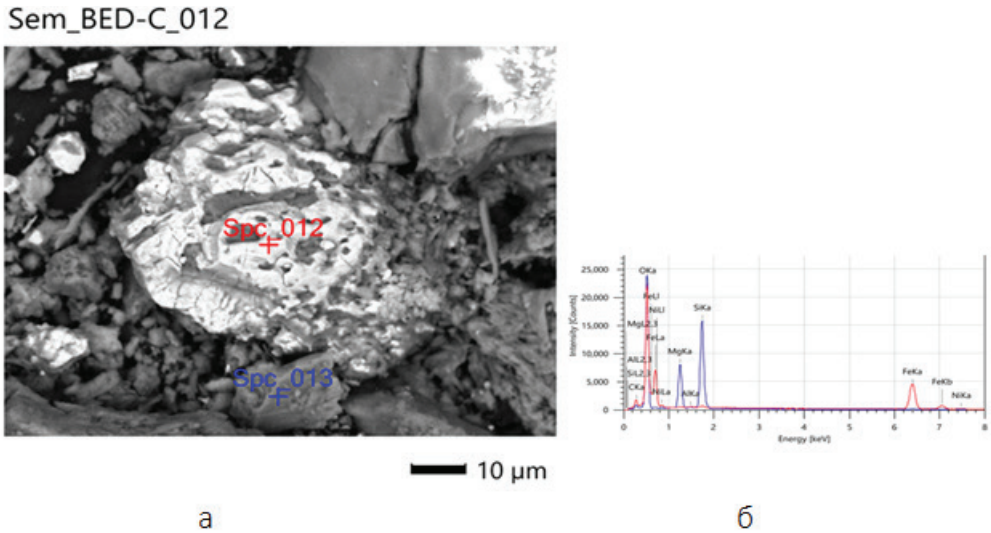
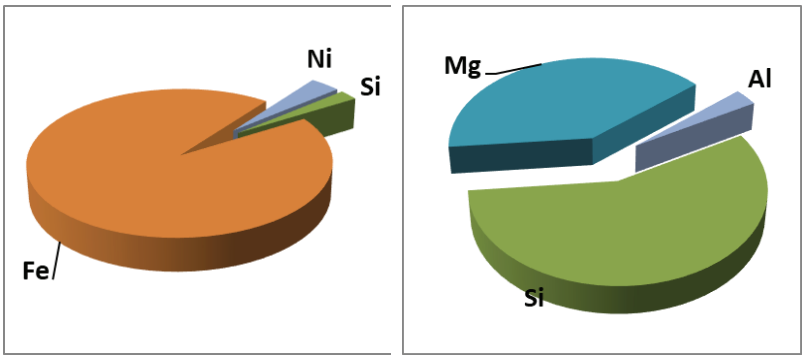
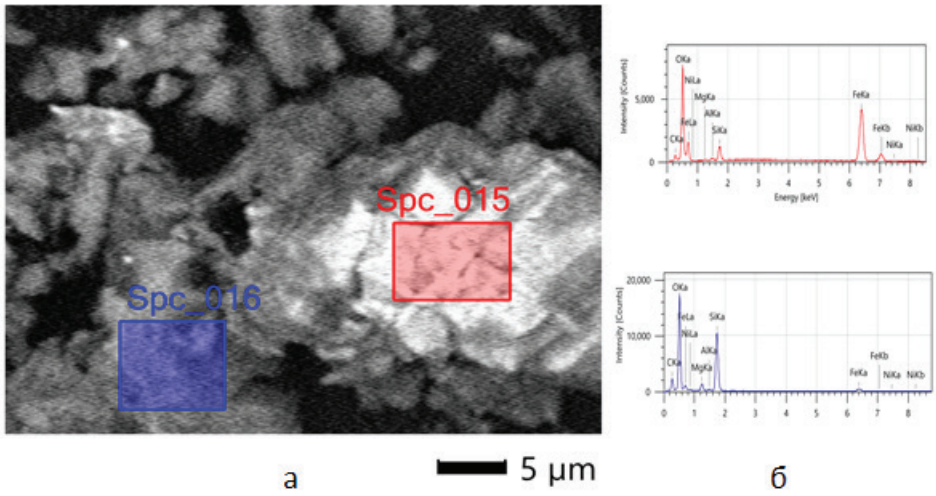


Рисунок 9 – СЭМ (× 1000) изображение фрагмента поверхности руды
с указанием областей локального микроанализа (а), характерные ЭДС-спектры (б)



а б

Рисунок 10 – Локальный элементный состав светлой (а)
и темной (б) частиц исследуемого образца



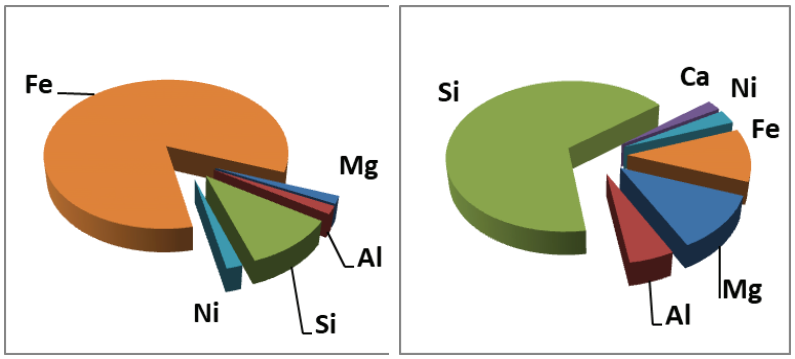
а б

Рисунок 11 – СЭМ изображение фрагмента поверхности руды (а)
и характерные ЭДС-спектры (б) (увеличение × 2000)

либо серпентину, обогащенному кремнеземом (рисунок 11, *б*). Окончательная идентификация данной минеральной фазы возможна только по результатам рентгенофазового анализа.

Следует отметить, что обе частицы имеют четко выраженную границу раздела. Признаки взаимного проникновения железистой и силикатной фаз практически отсутствуют. Железо в силикатной частице не обнаруживается, тогда как кремний в железистой фазе присутствует лишь в следовых количествах. Это свидетельствует о высокой степени минеральной обособленности исследуемых фаз и отсутствии заметного взаимного прорастания на данном участке образца.

Однако анализ следующего фрагмента поверхности (спектры Spc 015 и Spc 016, рисунок 11, *а*) выявляет иную картину локального распределения элементов между светлой и темной частицами исследуемого образца (рисунок 12).



а б

Рисунок 12 – Локальный элементный состав светлой (а)
И темной (б) фаз исследуемого участка

В отличие от предыдущего участка, контраст между частицами выражен значительно слабее: светлая фаза имеет менее интенсивную яркость, а темная характеризуется менее выраженным контрастом. Это хорошо прослеживается на ЭДС-спектрах (рисунок 11, *б*) и подтверждается результатами локального энергодисперсионного анализа. В спектре светлой (железистой) частицы отмечается повышенное содержание кремния, тогда как в темной (силикатной) частице возрастает содержание железа (см. рисунки 12 *а, б*).

Полученные результаты свидетельствуют о частичном взаимном проникновении компонентов железистой и силикатной фаз, что свидетельствует о наличии переходной зоны между железистыми и силикатными минералами. В отличие от предыдущего участка, где граница раздела фаз была практически идеальной, здесь наблюдается взаимное проникновение компонентов железной и силикатной фаз.

Наиболее вероятно, что это обусловлено взаимным образованием микровключений или частичным изоморфным замещением элементов на контакте фаз. Подобные участки отражают неоднородность строения исследуемой руды и подтверждают сложный характер ее минеральной ассоциации.

Таким образом, анализ различных фрагментов исходного образца руды Белогорского месторождения показывает, что она представлена преимущественно серпентиновыми минералами и железистыми соединениями, а также в меньшей степени тальком, кварцем и другими силикатными фазами. Исследование выявило значительную неоднородность минерального состава. Наряду с практически мономинеральными частицами (железистыми минералами, серпентинами и тальком) широко распространены частицы сложного строения, в которых наблюдается различная степень взаимного срастания и проникновения железистых и силикатных минералов. Подобное распределение элементов и характер межминеральных контактов свидетельствуют о сложном строении минеральной ассоциации руды, что необходимо учитывать при выборе и оптимизации технологии ее переработки.

После сернокислотного выщелачивания окисленной магнезиально-железистой никелевой руды Белогорского месторождения при оптимальных условиях полученный кек был дважды промыт дистиллированной водой и высушен. Минералогический состав кека после сернокислотного выщелачивания окисленной магнезиально-железистой никелевой руды Белогорского месторождения определяли методом рентгенофазового анализа. Дифрактограмма и результаты количественного фазового анализа приведены на рисунке 13.

Анализ рентгеновской дифрактограммы показал, что в процессе сернокислотного выщелачивания происходит практически полное растворение наиболее реакционноспособных никельсодержащих минералов – лизардита, непуита, пимелита, никелевого гидросиликата, а также вюстита. В результате

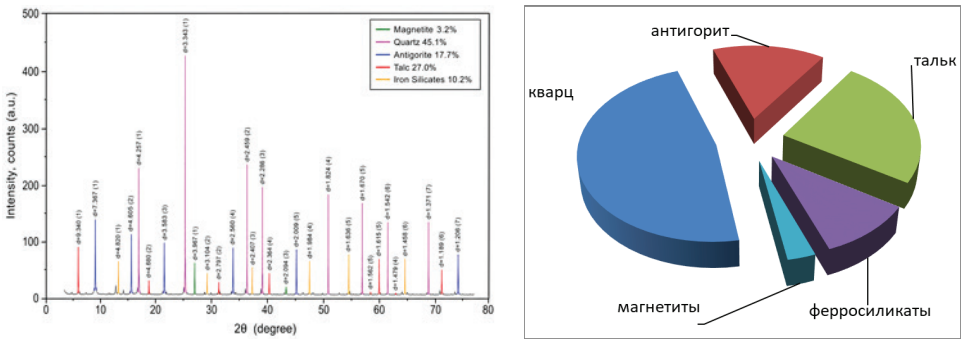


Рисунок 13 – Рентгеновская дифрактограмма кека (а)
и количественный фазовый состав кека (б)

этого в твердом остатке существенно возрастает относительное содержание кислотоустойчивых минеральных фаз.

Наиболее интенсивные дифракционные максимумы принадлежат кварцу, что свидетельствует о его преобладании в составе кека. Узкие и хорошо выраженные пики указывают на высокую степень кристалличности данной фазы.

Второй по распространенности минеральной фазой является тальк. Его характерные рефлексы также обладают высокой интенсивностью, что свидетельствует о значительном содержании этого минерала в остатке после выщелачивания.

Основным представителем минералов серпентиновой группы в кеке является антигорит. Несмотря на частичное разрушение серпентинов при кислотной обработке, его дифракционные максимумы отчетливо фиксируются на рентгенограмме, что указывает на сохранение наиболее устойчивой части серпентиновой матрицы.

Железосодержащие силикаты представлены менее интенсивными рефлексами, распределенными по широкому диапазону углов дифракции. Это свидетельствует о присутствии остаточных железистосиликатных фаз, сохранившихся после выщелачивания или образовавшихся в результате структурных преобразований серпентиновых минералов.

Магнетит присутствует в небольшом количестве. Его наличие подтверждается характерными малоинтенсивными рефлексами, указывающими на незначительное содержание кристаллических оксидов железа в исследуемом образце.

Таким образом, минеральный состав кека после сернокислотного выщелачивания представлен преимущественно кварц-тальк-серпентиновой ассоциацией, в которой доминируют кварц, тальк и антигорит. Железо сосредоточено главным образом в составе железистых силикатов и в значительно меньшей степени – в магнетите.

Полученные результаты хорошо согласуются с известными закономерностями сернокислотного выщелачивания силикатных никелевых руд. Наиболее реакционноспособные никельсодержащие гидросиликаты и значительная часть серпентиновых минералов переходят в раствор, тогда как кварц, тальк и наиболее устойчивые разновидности серпентинов практически не взаимодействуют с серной кислотой. Вследствие этого данные минералы концентрируются в твердом остатке, что приводит к существенному увеличению их относительного содержания в кеке.

Для уточнения минерального состава кека были выполнены локальные исследования методом энергодисперсионного рентгеновского микроанализа (SEM–EDS). Электронные изображения характерных участков поверхности кека, характерные ЭДС-спектрограммы и соответствующие спектры локального химического анализа представлены на рисунках 14 и 15.

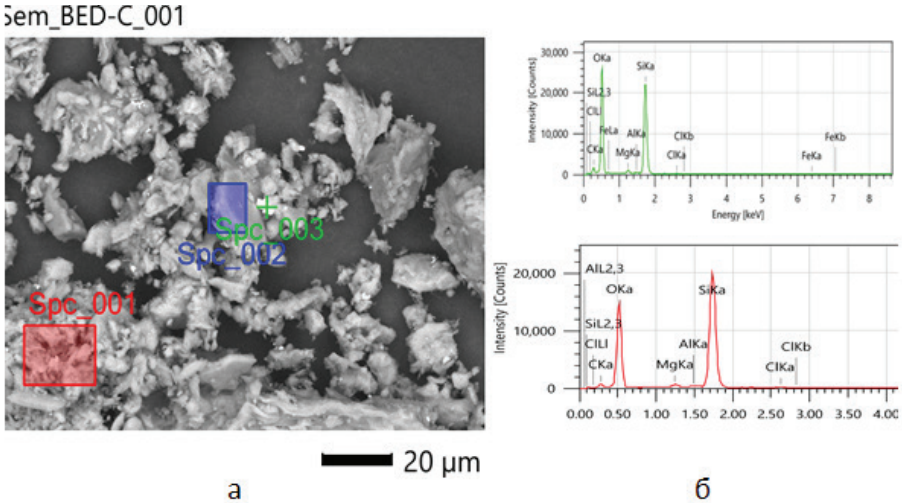


Рисунок 14 –СЭМ-изображение (× 500) поверхности кека (а),
характерные ЭДС-спектрограммы (б)

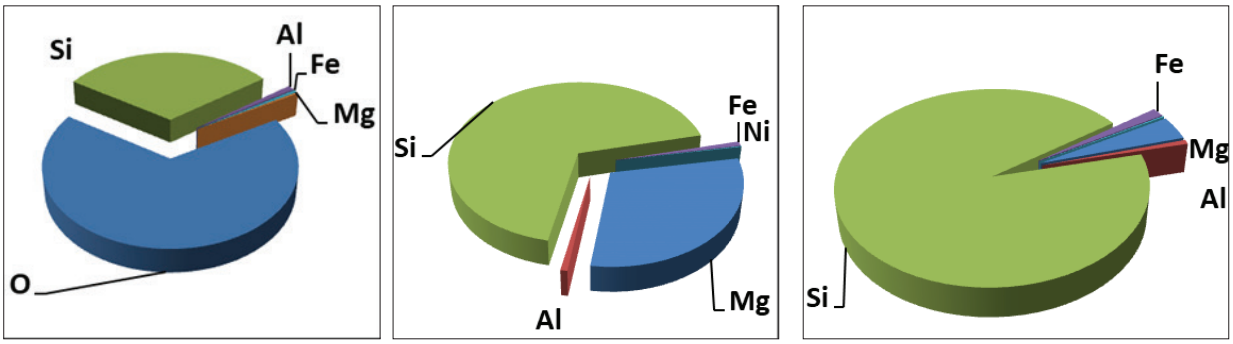


Рисунок 15 – Локальный поэлементный состав исследуемых участков:
а – Spc 001; б – Spc 002; в – Spc 003

На приведенном спектре частицы Spc 001 (рисунке 14, б – красная линия) отчетливо наблюдаются интенсивные Kα-линии кислорода и кремния, тогда как пики магния, железа, никеля и алюминия практически отсутствуют. Полученный элементный состав соответствует практически чистому кварцу (рисунок 15, *а*). Стехиометрическое соотношение кремния и кислорода в пределах погрешности анализа соответствует формуле SiO_2.

На рисунке 15, б представлен спектр Spc 002. Основными элементами являются магний, кремний и кислород. Соотношение магния и кремния хорошо согласуется с химическим составом талька. Незначительные примеси железа и алюминия, вероятно, обусловлены изоморфными замещениями или присутствием соседних минеральных фаз.

Частица Spc 003 (рисунок 15, *в*) представляет собой кварц с незначительным содержанием железа. На электронном изображении она имеет более светлый оттенок, что связано с более высоким средним атомным номером составляющих элементов. По данным ЭДС можно предположить, что данная

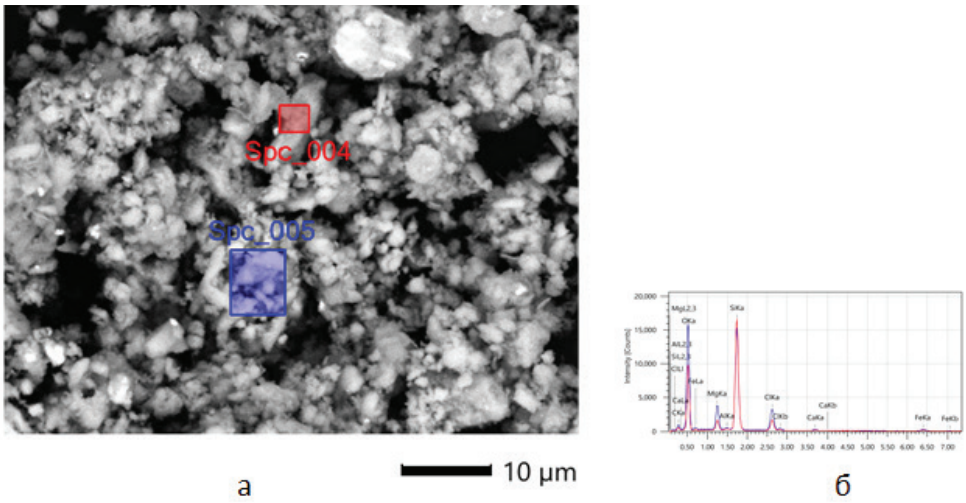


Рисунок 16 – СЭМ-изображение поверхности кека (× 1000) с указанием областей локального микроанализа (а); ЭДС-спектрограмма (б)

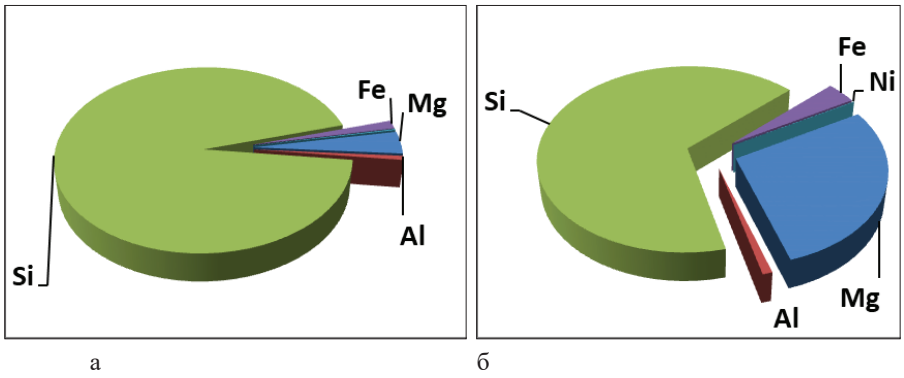


Рисунок 17 – Локальный поэлементный состав исследуемых участков: а – Spc 004; б – Spc 005

примесь относится к железистым силикатам. Однако метод энергодисперсионного анализа не позволяет однозначно идентифицировать минеральную фазу, поэтому окончательное определение возможно только при комплексной интерпретации результатов СЭМ–ЭДС и рентгенофазового анализа.

На рисунке 16 представлен другой участок поверхности кека с двумя точками локального анализа и характерной ЭДС-спектрограммой, а суммарный поэлементный состав этих точек рассматриваемого образца на рисунке 17.

Спектр Spc 004 (рисунок 16, *б* – красная линия) характеризуется практически исключительно присутствием кремния и кислорода. Незначительные пики магния, алюминия, кальция и железа находятся на уровне следовых количеств (рисунок 17, *а*). Такой состав хорошо соответствует кварцу и согласуется с результатами рентгенофазового анализа, показавшими высокое содержание данной минеральной фазы в кеке.

Спектр Spc 005, (см. рисунок 16, *б* – синяя линия), отличается наличием интенсивных пиков магния, кремния и кислорода. Содержание остальных элементов незначительно, никель находится в следовых количествах. По соотношению основных компонентов данная частица может быть идентифицирована как антигорит, содержащий небольшие количества никеля в виде изоморфного замещения и небольшие количества примесных элементов.

Таким образом, локальный СЭМ–ЭДС анализ подтверждает результаты рентгенофазового исследования. Среди исследованных пяти участков поверхности три частицы соответствуют кварцу, одна частица идентифицирована как тальк, одна – как антигорит. Железо, вероятнее всего в виде феросиликата, присутствует как примесь во всех рассмотренных объектах. Полученные данные хорошо отражают данные минералогического анализа и свидетельствуют о том, что после сернокислотного выщелачивания в твердом остатке концентрируются преимущественно кислотоустойчивые минералы – кварц, тальк и антигорит, тогда как железо- и никельсодержащие минералы практически полностью переходят в раствор.

Заключение. В настоящей работе исследованы минералогический состав окисленной железо-никелевой руды Белогорского месторождения, локальный элементный состав отдельных частиц и изменения фазового состава после сернокислотного выщелачивания с использованием методов сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (СЭМ–ЭДС).

Установлено, что исходная руда характеризуется сложным минералогическим строением и представлена преимущественно серпентиновыми минералами (лизардитом и антигоритом), никелевыми гидросиликатами (непуитом, пимелитом), кварцем, железосодержащими силикатами и оксидными фазами железа. Локальный ЭДС-анализ выявил наличие как практически мономинеральных частиц кварца, серпентинов и железистых минералов, так и сложных железосиликатных агрегатов с различной степенью взаимного прорастания и неравномерным распределением химических элементов. Полученные результаты свидетельствуют о неоднородности минеральной ассоциации исследуемой руды, что оказывает существенное влияние на процессы гидрометаллургической переработки.

Исследование твердого остатка после сернокислотного выщелачивания показало, что в процессе обработки практически полностью растворяются никельсодержащие гидросиликаты, включая непуит, пимелит и гидратированные никелевые силикаты, а также минералы группы серпентина, прежде всего лизардит. Одновременно происходит значительное растворение железосодержащих фаз, тогда как кварц, антигорит и тальк сохраняют высокую устойчивость к воздействию серной кислоты и концентрируются в твердом остатке.

Результаты локального СЭМ–ЭДС-анализа хорошо согласуются с данными рентгенофазового анализа, подтверждая эффективность сернокислотного выщелачивания для селективного извлечения никеля из окисленной железо-никелевой руды Белогорского месторождения. Полученные данные могут быть использованы при оптимизации гидрометаллургических технологий переработки латеритных никелевых руд, выборе рациональных режимов выщелачивания и прогнозировании поведения отдельных минеральных фаз в процессе кислотной обработки.

Данное исследование проведено в рамках программы (BR-23991563) «Создание инновационных ресурсосберегающих технологий добычи и комплексной переработки минерального и техногенного сырья», финансируемой Комитетом промышленности Министерства промышленности и строительства Республики Казахстан.

Поступила: 25.06.2026; рецензирована: 09.07.2026; принята: 10.07.2026.

Литература

1. *Osipov P. et al*. Electroplating Composite Coatings of Nickel with Dispersed WO3 and MoO3 on Al Substrate to Increase Wear Resistance // Materials. 2025. Т. 18. № 12. С. 2781.
2. *Zheng Y. et al*. Challenges and Advancements in High-Nickel Layered Oxides Cathode Material for Lithium-Ion Batteries // Energy & Environmental Materials. 2026. Т. 9. № 2. С. e70152.

3. *Fan Q. et al*. Review on comprehensive utilization of nickel laterite ore // Minerals Engineering. 2024. Т. 218. С. 109044.
4. *Caetano G.C., Ostroski I.C., de Barros M.A.S.D.* Lateritic nickel and cobalt recovery routes: Strategic technologies // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2025. Т. 46. № 3. С. 400–414.
5. *Майшина Ж.Г.* Результаты предварительной оценки возможности электрометаллургической переработки казахстанских никелевых руд / Ж.Г. Майшина, А.С. Байсанов // Металлургия XXI столетия глазами молодых. 2019. С. 32–34.
6. *Хасанов М.Ш.* Исследование термодинамики восстановительного обжига железистых латеритных руд / М.Ш. Хасанов, К.Г. Анисонян, Ю.В. Заблоцкая // Новые материалы и перспективные технологии. 2020. С. 470–472.
7. *Zevgolis E.N., Daskalakis K.A.* The nickel production methods from laterites and the Greek ferronickel production among them // Materials Proceedings. 2022. Т. 5. № 1. С. 104.
8. *Zhihong L.* Nickel laterite metallurgy // The ECPH Encyclopedia of Mining and Metallurgy. Singapore: Springer Nature Singapore, 2026. С. 1427–1432.
9. *Stanković S. et al*. Review of the past, present, and future of the hydrometallurgical production of nickel and cobalt from lateritic ores // Metallurgical & Materials Engineering. 2020. Т. 26. № 2. С. 199–208.
10. *Shayakhmetova R., Mukhametzhanova A., Osipov P. et al*. Mechanism, kinetics and thermodynamics of nickel, iron, and magnesium hydrochloric acid leaching from laterite ore // Scientific Reports. 2025. Т. 15. № 1. С. 41342.
11. *Pandey N. et al*. Recent progress in hydrometallurgical processing of nickel lateritic ore // Transactions of the Indian Institute of Metals. 2023. Т. 76. № 1. С. 11–30.
12. *Садыхов Г.Б.* Исследования по разработке нового комбинированного процесса извлечения никеля и кобальта из железистых латеритных руд / Г.Б. Садыхов [и др.] // Металлы. 2019. № 2. С. 3–10.
13. *Хасанов М.Ш.* Влияние температуры восстановительного обжига железистой латеритной руды на степень извлечения никеля и кобальта в раствор / М.Ш. Хасанов [и др.] // Химия, физика, биология: пути интеграции. 2020. С. 68–68.
14. *Basturkcu H., Acarkan N., Gock E.* The role of mechanical activation on atmospheric leaching of a lateritic nickel ore // International Journal of Mineral Processing. 2017. Т. 163. С. 1-8.
15. *Пунишко А.М.* Сернокислотное кучное выщелачивание окисленной никелевой руды / А.М. Пунишко [и др.] // iPolytech Journal. 2017. Т. 21. № 7 (126). С. 152–157.
16. *Ribeiro P.P.*M. *et al*. Roasting and leaching behavior of nickel laterite ore // Metallurgical and Materials Transactions B. 2021. Т. 52. № 3. С. 1739–1754.
17. *Шаяхметова Р.А.* Определение кинетических закономерностей выщелачивания никеля из окисленных никельсодержащих магнезиальных руд / Р.А. Шаяхметова, А.А. Мухаметжанова, А.А. Қали [и др.] // Материалы V Международной научно-практ. конф. «Интеграция современной науки, цифровых технологий, искусственного интеллекта и промышленного производства в горно-металлургическом комплексе Республики Казахстан». Алматы, 2026. С. 157–159.
18. *Шаяхметова Р.А.* Оптимизация технологических параметров процесса вскрытия окисленных никельсодержащих магнезиальных руд / Р.А. Шаяхметова, А.Б. Сагындыков, П.А. Осипов, А.А. Кали // Материалы V Международной научно-практ. конф. «Интеграция современной науки, цифровых технологий, искусственного интеллекта и промышленного производства в горно-металлургическом комплексе Республики Казахстан». Алматы, 2026. С. 160–163.
19. *Осипов П.А., Шаяхметова Р.А.* Выделение железа из продуктивных растворов выщелачивания руд Белогорского месторождения / П.А. Осипов, Р.А. Шаяхметова // Материалы V Международной научно-практ. конф. «Интеграция современной науки, цифровых технологий, искусственного интеллекта и промышленного производства в горно-металлургическом комплексе Республики Казахстан». Алматы, 2026. С. 136–138.