Information about authors

Adiliya Dinmuhamedkyzy Moldashi – Student, GEMS International School Al Khail; e-mail: adilyamoldash7@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-5258-4737.

Yerbolat Sailaukhanuly – PhD, Satpayev University, Senior researcher of the Laboratory of Engineering Profile; e-mail: s.erbolat@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8417-4136.

Azat Seitkhan – PhD, Professor, Satpayev University, Head of the Laboratory of Engineering Profile; e-mail: seytkhan.azat@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9705-7438.

Kainaubek Toshtay – PhD, Associate professor, KazNU named after Al-Farabi, Department of Physical Chemistry, Catalysis, and Petrochemistry; e-mail: kainaubek.toshtay@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1182-7460.

Nurzhan Nurlybekovich Nurgaliyev* – PhD, associate professor-researcher, Shakarim University, Department of Chemistry and Ecology; e-mail: n.nurgaliyev@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1216-7150.

Сведения об авторах

Адилия Динмухамедовна Молдаши – студент, Международная школа GEMS Al Khail; e-mail: adilyamoldash7@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-5258-4737.

Ерболат Сайлауханулы – PhD, научный сотрудник лаборатории инженерного профиля, Сатпаев университет; e-mail: s.erbolat@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8417-4136

Азат Сейтхан – PhD, Профессор, Директор лаборатории инженерного профиля, Сатпаев университет; e-mail: seytkhan.azat@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9705-7438.

Кайнаубек Тоштай – PhD, Ассоц. профессор, кафедра физической химии, катализа и нефтехимии; e-mail: kainaubek.toshtay@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1182-7460.

Нуржан Нурлыбекович Нургалиев* – PhD, доцент-исследователь, кафедра химии и экологии, Шәкәрім университет, кафедры химии и экологии; e-mail: n.nurgaliyev@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003 1216-7150.

Авторлар туралы мәліметтер

Адилия Дінмұхамедқызы Молдаши – оқушы, GEMS International School Al Khail; e-mail: adilyamoldash7@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-5258-4737.

Ерболат Сайлауханулы – PhD, аға ғылыми қызметкер, инженерлік бейінді зертханы, Сатпаев университеті; e-mail: s.erbolat@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8417-4136.

Сейтхан Азат – PhD, профессор, Инженерлік бейінді зертханы басшысы, Сатпаев университеті; e-mail: seytkhan.azat@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9705-7438.

Кайнаубек Тоштай – PhD, Қауымдастырылған профессор, физикалық химия, катализ және мұнайхимия кафедрасы, Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті; e-mail: kainaubek.toshtay@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1182-7460.

Нұржан Нұрлыбекұлы Нұрғалиев* – PhD, доцент-зерттеуші, Шәкәрім университеті, Химия және экология кафедрасы; e-mail: n.nurgaliyev@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003 1216-7150.

Received 01.06.2026
Revised 26.06.2026
Accepted 29.06.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-84

МРНТИ: 53.37.29

CC BY 4.0
Check for updates

Н.К. Ахмадиева[1]*, Е.Б. Абикак[1], Н.М. Бурабаева[2], Т.К. Сагынтаева[1], Н. Оракбай[2]

[1]Институт металлургии и обогащения, 050010, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Шевченко 29

[2]Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
070004, Республика Казахстан, г. Усть -Каменогорск, ул. Серикбаева, 19

*e-mail: akhmadiyeva141@gmail.com

КАРБОНАТНО-ГИДРОТЕРМАЛЬНАЯ АКТИВАЦИЯ АЛЮМОСИЛИКАТНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ГЛИНОЗЁМА

Аннотация: *В статье приведены результаты исследования карбонатно-гидротермальной активации смеси нефелиновой руды и красного шлама как эффективного способа предварительной активации алюмосиликатного сырья перед щелочным выщелачиванием. Актуальность работы*

©Н.К. Ахмадиева, Е.Б. Абикак, Н.М. Бурабаева, Т.К. Сагынтаева, Н. Оракбай, 2026

обусловлена необходимостью расширения глиноземсодержащей сырьевой базы в Казахстане, в том числе за счет возможного использования небокситового сырья – нефелинов и отходов глиноземного производства – красного шлама. Исследовано влияние обработки смеси нефелиновой руды и красного шлама раствором $NaHCO_3$ при температуре 260 °C на изменение фазового состава. Установлено, что в результате предварительной активации происходят образование канкринита в количестве около 19 % и бемита около 2,8 %, что свидетельствует о частичной перекристаллизации исходных алюмосиликатов. Для дальнейшей переработки активированного материала предложена двухстадийная схема щелочного выщелачивания с добавлением кальция. Целью первой стадии является извлечение калия, с последующим извлечением алюминия на второй. В результате переработки степень извлечения калия составляет 82-87% и извлечения алюминия 92-94%. Полученные результаты подтверждают тесную взаимосвязь между фазовыми преобразованиями и эффективностью извлечения ценных компонентов, создавая научную основу для совершенствования технологий комплексного получения глинозёма из сложных алюмосиликатных материалов и промышленных отходов.

Ключевые слова: *карбонатно-гидротермальная активация, фазовые превращения, щелочное выщелачивание, извлечение глинозёма, удаление калия, нефелиновая руда, красный шлам, канкринит.*

Введение

Устойчивое развитие глинозёмного производства связано с необходимостью расширения сырьевой базы и вовлечения в переработку техногенных отходов. Мировое производство глинозема базируется в основном на переработке высококачественных бокситов с кремниевым модулем выше 7 по способу Байера. Однако постепенное истощение богатых месторождений и ухудшение качества руд, понижение кремниевого модуля, требуют поиска альтернативных природных и техногенных алюмосодержащих материалов [1, 2]. К таким видам сырья относятся нефелины, глины, каолины, алуниты, аргиллиты, бентониты, низкокачественные бокситы, запасы которых имеются в достаточно больших количествах и месторождения их повсеместно распространены. Промышленная переработка данных руд может быть целесообразной при комплексном использовании сырья.

С этой точки зрения актуальна работа по изучению возможности разработки комплексной технологии переработки нефелиновых сиенитов Кубасадырского месторождения Республики Казахстан. Основным методом переработки нефелинов является обжиг из-за высокой устойчивостью его кристаллической структуры в щелочных средах. При традиционном щелочном выщелачивании растворение таких минералов протекает медленно, что требует повышенных температур, высоких концентраций щёлочи или предварительной активации материала [3]. Дополнительной технологической проблемой является присутствие калия, который способен накапливаться в алюминатных растворах и отрицательно влиять на процессы осаждения гидроксида алюминия [4-7].

Красный шлам является отходом глинозёмного производства, образующимся при переработке бокситов по процессу Байера. Извлечение Al_2O_3 в раствор в процессе выщелачивания боксита по способу Байера составляет порядка 70%, остальное количество остается в красном шламе. Помимо глинозема в его составе присутствуют оксиды железа, титана, а также остаточные алюмосиликаты. Красный шлам является трудновскрываемым при гидрохимической переработке в щелочном растворе, поэтому его перерабатывают методом спекания. [8]. Одновременно длительное хранение красного шлама сопровождается экологическими рисками, поэтому разработка способов его комплексной переработки представляет практический интерес [9, 10].

В последние годы большое внимание уделяется термохимической активации алюмосиликатного сырья. Показано, что обработка в карбонатных и гидрокарбонатных средах способствует частичному разрушению исходной структуры минералов и образованию более реакционноспособных фаз [11, 12]. В частности, для нефелиновых материалов характерно формирование канкринита и оксигидроксидов алюминия. Совместная переработка нефелиновой руды и красного шлама представляет отдельный интерес, поскольку взаимодействие компонентов различного состава может способствовать более глубоким фазовым превращениям в процессе термохимической активации. Однако сведения о поведении подобных систем в карбонатно-гидротермальных условиях остаются ограниченными [8, 13].

Помимо извлечения алюминия, важным технологическим фактором является поведение калия в щелочных растворах. Повышенное содержание калия ухудшает стабильность алюминатных растворов и влияет на эффективность технологического цикла [19, 20]. В связи с этим практический интерес представляет разработка схем, обеспечивающих одновременно высокое извлечение алюминия и калия. Целью настоящей работы является исследование фазовых превращений, протекающих при карбонатно-гидротермальной активации смеси нефелиновой руды и красного шлама, а также оценка влияния этих преобразований на эффективность двухстадийного щелочного выщелачивания.

Методы исследования

2.1. Сырьевые материалы

Нефелиновая руда была получена с месторождения Кубасадыр (Казахстан), а красный шлам, образующийся по процессу Байера, предоставлен Павлодарским алюминиевым заводом (Казахстан). Перед проведением экспериментов оба материала высушивали при температуре 105 °C до постоянной массы. Исходные материалы измельчали до крупности менее 74 мкм с использованием лабораторной шаровой мельницы для обеспечения равномерной реакционной способности.

Химический состав нефелиновой руды, красного шлама и их смеси определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа (XRF) с использованием волнодисперсионного спектрометра Venus 200 (PANalytical B.V., Алмело, Нидерланды). Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав исходных продуктов

Компонент	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	CaO	Na_2O	K_2O	MgO	TiO_2	SO_3	ппп
Красный шлам (мас.%)	19.83	20.29	29.34	0.69	13.7	0.28	0.24	6.96	2.01	6,66
Нефелинсодержащая руда (мас.%)	20.83	59.45	3.84	3.27	5.08	3.32	0.35	0.51	0.33	1.02
Смесь (мас.%)	21.72	35.87	18.86	1.76	11.52	2.37	0.37	4.71	1.61	1.21

Минералогический состав нефелиновой руды, красного шлама и их смеси определяли методом рентгеновской дифракции (XRD) с использованием дифрактометра D8 Advance (Bruker, Billerica, MA, США) с Cu-Kα излучением при напряжении 40 кВ и токе 40 мА.

Количественный фазовый состав исследуемых материалов приведён в таблице 2.

Таблица 2 – Фазовый состав нефелиновой руды, красного шлама и их смеси

Фаза	Нефелинсодержащая руда (мас.%)	Красный шлам (мас.%)	Смесь (мас.%)
Альбит	16.7		28.8
Гематит	-	24.6	23.5
Микроклин	75.3	-	23.1
Гидроксид диоксида кремния	3.8	-	
Железо-кальциевый оксид	4.2	-	-
Гидрат алюмосиликата натрия	-	21.2	-
Гидрат алюмосиликата натрия с карбонат- и сульфид-ионами	-	-	20.6
Силикат натрия-кальция	-	21.2	
Аллофан	-	16.9	1.9
Анатаз	-	7.7	2.0

2.2. Подготовка смеси

Перед термохимической активацией нефелиновую руду и красный шлам смешивали в массовом соотношении 1:1. Данное соотношение выбрано с целью уравновешивания кремнезёмсодержащего нефелина и железосодержащего красного шлама.

2.3. Термохимическая активация

Термохимическую активацию проводили в автоклаве из нержавеющей стали, оснащённом механическим перемешиванием в растворе $NaHCO_3$ 120 г/дм³, Ж:Т = 3:1. Пульпу

нагревали до температуры 260-280 °С и выдерживали в течение 4-6 ч после достижения заданной температуры. По завершении процесса автоклав охлаждали до комнатной температуры. Твёрдый продукт отделяли фильтрацией, промывали дистиллированной водой до нейтрального pH и сушили при 105°С.

2.4. Двухстадийное щелочное выщелачивание

Двухстадийное щелочное выщелачивание проводили в том же автоклаве из нержавеющей стали, который использовался для термохимической активации.

Стадия 1: селективное удаление калия. Кек, полученный в результате химической активации, обрабатывали оборотным щелочным раствором, содержащим 150 г/л Na_2O, при температуре 200 °С. Количество необходимого кальция был стехеометрически рассчитан для достижения соотношения $CaO:SiO_2$ = 1,5 в пульпе. После выщелачивания пульпу фильтровали для отделения кека от раствора. Раствор упаривали с целью осаждения сульфата калия. Полученный обеднённый по калию алюминатный раствор, обогащённый растворёнными формами алюминия, направляли на вторую стадию процесса.

Стадия 2: извлечение оксида алюминия. Алюминатный раствор после удаления калия подвергали дополнительному выщелачиванию при температуре 260 °С оборотным алюминатным раствором с концентрацией 240-260 г/л Na_2O. В раствор так же добавляли кальций в виде гидроксида кальция, для получения соотношения $CaO:SiO_2$ до 1,5 с учётом кальция, добавленного на первой стадии.

Обсуждение научных результатов

В результате химической активации произошло частичное разрушение алюмосиликатного каркаса нефелина и фаз красного шлама. Одновременно алюминий переходил в растворимые алюминатные формы.

В ходе обработки наблюдалось образование вторичных карбонатсодержащих фаз, главным образом канкринита. Формирование бемита, вероятно, связано с локальным пересыщением раствора по алюминию в процессе гидротермальной обработки. Для оценки фазовых изменений после термохимической активации был проведён рентгенофазовый анализ обработанных образцов. Согласно данным рентгенофазового анализа (рис. 5), после обработки в смеси присутствовали гематит, альбит, микроклин, канкринит и бемит.

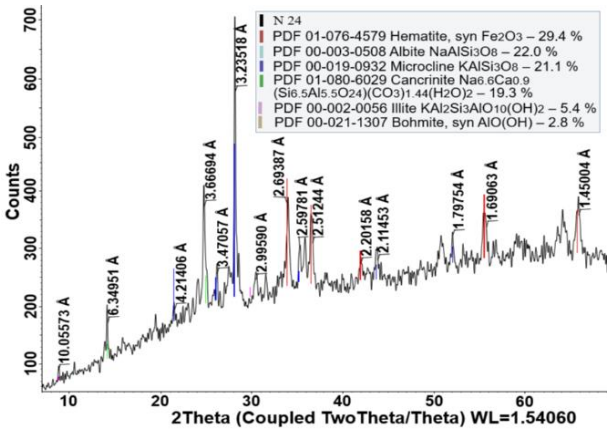
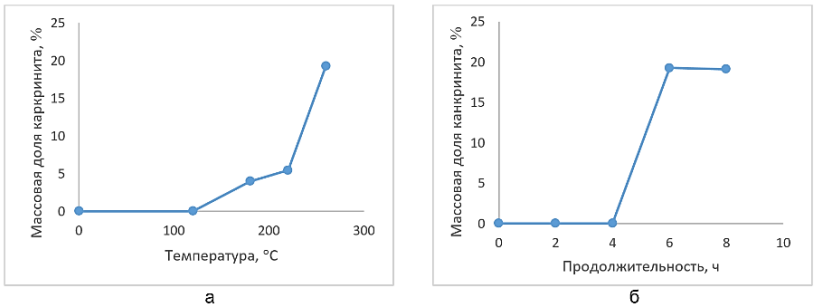


Рисунок 1 – Рентгенограмма смеси нефелиновой руды и красного шлама после термохимической активации

Появление канкринита и бемита, отсутствующих в исходной смеси, указывает на протекание процессов перекристаллизации в карбонатно-гидротермальной среде. При этом часть полевошпатовых минералов сохранялась, что свидетельствует о неполном разрушении алюмосиликатного каркаса. Гематит в исследуемых условиях оставался устойчивой фазой.

Совместная гидротермальная обработка нефелиновой руды и красного шлама приводила к более выраженному перераспределению фаз по сравнению с индивидуальной обработкой компонентов. Исследовано влияние температуры и продолжительности гидротермальной обратотки на содержание канкринита в кеке (рис. 2).



а б

Рисунок 2 – Зависимость содержания канкринита
а) от температуры гидротермальной обработки б) от продолжительности

Повышение температуры до 260°С сопровождалось заметным увеличением содержания канкринита, что свидетельствует об интенсификации процессов перекристаллизации. Дальнейшее повышение температуры практически не изменяло фазовый состав, что может указывать на приближение системы к равновесному состоянию. Увеличение продолжительности гидротермальной обработки до 6 ч также способствовало росту содержания канкринита. После 6 ч фазовый состав изменялся незначительно, что свидетельствует о завершении основной части фазовых превращений.

На основании полученных результатов оптимальные условия активации определены как: 260°С, 6 ч, 120 г/л $NaHCO_3$ и Ж:Т = 3:1. Важно отметить, что совместная активация нефелиновой руды и красного шлама приводит к более высокому содержанию канкринита по сравнению с раздельной обработкой компонентов.

Первая стадия выщелачивания проводилась в щелочном растворе, содержащем 150 г/л Na_2O, при температуре 200°С с добавлением $CaSO_4$ (20-30% от расчётного количества CaO). В этих условиях 82-87% оксида калия и 7-8% оксида алюминия переходит в раствор, а раствор, очищенный от калия идет на вторую стадию выщелачивания для извлечения оксида алюминия. Такой подход предотвращает накопление калия в алюминатном контуре и обеспечивает постепенное обогащение раствора алюминием.

Вторая стадия выщелачивания проводилась в оборотном алюминатном растворе с концентрацией 240 г/л Na_2O при температуре 260°С с добавлением $Ca(OH)_2$ для поддержания соотношения $CaO:SiO_2$ = 1,5. В этих условиях происходит интенсивное растворение бемита и активированных карбонатсодержащих алюмосиликатов. Одновременно связывание кремния в кальциевые силикаты подавляет вторичное осаждение алюминия и способствует его переходу в раствор.

Химический состав твёрдого остатка после второй стадии выщелачивания составляет, мас.%: Al_2O_3 – 1,52; SiO_2 – 31,48; Fe_2O_3 – 16,23; CaO – 39,0; Na_2O – 4,0; K_2O – 0,37; MgO – 0,37; TiO_2 – 4,71; SO_3 – 1,61; прочие – 0,71. Содержание калия в исходной смеси составляло 2,37 мас.% и снижалось до 0,37 мас.% в твёрдом остатке после второй стадии выщелачивания.

Заключение

Проведённые исследования показали, что карбонатно-гидротермальная активация смеси нефелиновой руды и красного шлама приводит к изменению фазового состава алюмосиликатного материала и повышению его реакционной способности при последующем щелочном выщелачивании.

Установлено, что обработка в растворе $NaHCO_3$ при 260-280°С сопровождается образованием канкринита и бемита. Показано, что повышение температуры и продолжительности обработки способствует увеличению содержания канкринита до достижения состояния, близкого к равновесному. Оптимальными условиями активации являются температура 260°С, продолжительность 6 ч, концентрация $NaHCO_3$ 120 г/л и соотношение Ж:Т = 3:1.

Предложенная двухстадийная схема щелочного выщелачивания обеспечивает селективное удаление калия и высокую степень извлечения алюминия. Степень извлечения глинозёма достигает 92-94%, тогда как удаление калия составляет 82-87%.

Полученные результаты подтверждают перспективность совместной переработки нефелиновой руды и красного шлама с использованием предварительной карбонатно-

гидротермальной активации. Предложенный подход может быть использован при разработке технологий комплексной переработки алюмосиликатного сырья и техногенных отходов.

Список литературы

1. Valorisation of bauxite residue (red mud): A review / C.R. Borra et al // Journal of Sustainable Metallurgy. – 2016. – Т. 2. – P. 255-278.
2. Bauxite residue treatment / L. Wang et al // Science of the Total Environment. – 2024. – Т. 912. – P. 168847.
3. Hydrothermal processing of nepheline syenite / J. Samantray et al // Separation Science and Technology. – 2023. – Т. 58. – P. 2505-2518.
4. Behavior of potassium in Bayer process / Y. Gao et al // Mineral Engineering. – 2026. – Т. 235. – P. 109870.
5. Pre-activation of nepheline before enrichment / N. Akhmadiyeva et al // Complex Use of Mineral Resources. – 2023. – № 327. – P. 82-89.
6. Activation of mineral composition via thermochemical disintegration / N. Akhmadiyeva et al // Minerals. – 2025. – Т. 15. – P. 1000.
7. Evans K. The history and challenges of bauxite residue management / K. Evans // Journal of Sustainable Metallurgy. – 2016. – Т. 2. – P. 316-331.
8. Karimi Z. Utilization of red mud via stepwise leaching / Z. Karimi, A. Rahbar-Kelishami // Scientific Reports. – 2023. – Т. 13. – P. 8527.
9. Zhao D. Thermal activation of red mud / D. Zhao, Y. Ma, P. Hou // Journal of Building Engineering. – 2025. – Т. 104. – P. 112376.
10. Phase transformation of aluminosilicates in red mud / X. Wang et al // Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. – 2022. – Т. 109. – P. 186-193.
11. Red mud-based synergistic fabrication / F. Li et al // Processes. – 2025. – Т. 13. – P. 2249.
12. Grundy H.D. Carbonate-rich cancrinite crystal structure / H.D. Grundy, I. Hassan // Canadian Mineralogist. – 1982. – Т. 20. – P. 239-251.
13. Boehmite solubility and aluminum speciation in hydrothermal solutions / S. Castet et al // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1993. – Т. 57. – P. 4869-4884.
14. Removal of potassium from sodium aluminate solution / J. Liu et al // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2024. – Т. 12. – P. 113330.

Информация о финансировании

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (AP26100479 «Разработка инновационной гидрохимической технологии совместной переработки бокситов и нефелинов с термохимической активацией красного шлама»).

Н.К. Ахмадиева[1]*, Е.Б. Абикак[1], Н.М. Бурабаева[1], Т.К. Сагынтаева[1], Н. Оракбай[2]

[1]Металлургия және кен байыту институты,
050010, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Шевченко көш., 29
[2]Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті,
070004, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ., Серікбаев көш., 19
*e-mail: akhmadiyeva141@gmail.com

ГЛИНОЗЕМДІ АЛУДЫ ҚАРҚЫНДАТУ ҮШІН АЛЮМОСИЛИКАТТЫ ШИКІЗАТТЫ КАРБОНАТТЫ-ГИДРОТЕРМИЯЛЫҚ АКТИВАЦИЯЛАУ

Мақалада нефелин кені мен қызыл шлам қоспасын карбонатты-гидротермиялық белсендірудің сілтілік шаймалау алдындағы алюмосиликатты шикізатты алдын ала минералогиялық дайындаудың тиімді әдісі ретіндегі зерттеу нәтижелері келтірілген. Зерттеудің өзектілігі алюминийдің алыну дәрежесін арттыру және сілтілік жүйелердегі калийдің мінез-құлқын реттеу мақсатында табиғи және техногендік шикізатты кешенді өңдеу тиімділігін жоғарылату қажеттілігімен негізделеді. Нефелин кені мен қызыл шламның массалық қатынасы 1:1 болатын қоспаны 260 °С температурада натрий гидрокарбонаты ерітіндісімен өңдеудің әсері зерттелді. Белсендіру барысында елеулі минералогиялық түрленулер жүретіні анықталды, олар шамамен 19 масс.% канкринит пен 2,8 масс.% бемиттен тұратын екіншілік фазалардың түзілуімен қатар жүреді, бұл бастапқы алюмосиликаттардың ішінара

қайта кристалданғанын көрсетеді. Белсендірілген материалды одан әрі өңдеу үшін кальций қосылған екі сатылы сілтілік шаймалау сызбасы ұсынылды, ол бірінші сатыда калийді селективті түрде жоюды, ал екінші сатыда алюминийді қарқынды түрде бөліп алуды қамтамасыз етеді. Минералогиялық түрленулер материалдың реакциялық қабілетін арттырып, негізгі компоненттердің қатты және сұйық фазалар арасындағы таралуын өзгертетіні көрсетілді. Қол жеткізілген глиноземді алу дәрежесі 92–94%-ды, ал калийді жою деңгейі 82-87%-ды құрайды. Алынған нәтижелер фазалық түрленулер мен бағалы компоненттерді бөліп алу тиімділігі арасындағы тығыз байланысты растайды және күрделі алюмосиликатты материалдар мен өнеркәсіптік қалдықтардан глинозем өндірудің кешенді технологияларын жетілдірудің ғылыми негізін қалыптастырады.

Түйін сөздер: *карбонатты-гидротермиялық активация, фазалық түрленулер, сілтілік шаймалау, глиноземді алу, калийді бөлу, нефелин кені, қызыл шлам; канкринит.*

N.K. Akhmadiyeva*, E.B. Abikak[1], N.M. Burabayeva[1], T.K. Sagyntayeva[1], N. Orakbay[2]
[1]Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation, 29 Shevchenko St., Almaty 050010, Republic of Kazakhstan
[2]D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University,
19 Serikbayev St., Ust-Kamenogorsk 070004, Republic of Kazakhstan
*e-mail: akhmadiyeva141@gmail.com

CARBONATE-HYDROTHERMAL ACTIVATION OF ALUMINOSILICATE RAW MATERIALS FOR INTENSIFIED ALUMINA RECOVERY

The article presents the results of a study on the carbonate-hydrothermal activation of a mixture of nepheline ore and red mud as an effective method of preliminary mineralogical preparation of aluminosilicate raw materials prior to alkaline leaching. The relevance of the work is determined by the need to improve the efficiency of integrated processing of natural and technogenic raw materials in order to increase aluminum recovery and regulate potassium behavior in alkaline systems. The effect of treating a nepheline ore–red mud mixture at a mass ratio of 1:1 with a sodium bicarbonate solution at 260°C was investigated. It was established that significant mineralogical transformations occur during activation, accompanied by the formation of secondary phases, including approximately 19 wt.% cancrinite and 2.8 wt.% boehmite, indicating partial recrystallization of the initial aluminosilicates. For further processing of the activated material, a two-stage alkaline leaching scheme with calcium addition was proposed, providing selective potassium removal at the first stage and intensive aluminum extraction at the second stage. The mineralogical transformations were shown to enhance the reactivity of the material and alter the distribution of major components between the solid and liquid phases. The achieved alumina extraction rate reached 92-94%, while potassium removal attained 82-87%. The obtained results confirm the close relationship between phase transformations and the efficiency of valuable component recovery, providing a scientific basis for improving technologies for the integrated production of alumina from complex aluminosilicate materials and industrial wastes.

Key words: *carbonate-hydrothermal activation; phase transformations; alkaline leaching; alumina recovery; potassium removal; nepheline ore; red mud; cancrinite.*

Сведения об авторах

Назым Канатовна Ахмадиева* – ассоциированный профессор, Институт металлургии и обогащения, г. Алматы, Казахстан; e-mail: akhmadiyeva141@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3154-9816.

Еркежан Баймуратовна Абикак – PhD, Институт металлургии и обогащения, г. Алматы, Казахстан; e-mail: abikak.erkezhan@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8705-4092.

Нурила Муратовна Бурабаева – ассоциированный профессор, Институт металлургии и обогащения, г. Алматы, Казахстан; e-mail: nuri_eng@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2183-2239.

Таңшолпан Қазыбекқызы Сағынтаева – младший научный сотрудник, Институт металлургии и обогащения, г. Алматы, Казахстан; e-mail: tsagyntayeva00@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-5922-4172.

Нуржан Оракбай – «Металлургия және кен байыту институты» инженері, Алматы қ., Қазақстан, докторант, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: n.orakbay@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-6043-0936.

Авторлар туралы мәліметтер

Назым Канатовна Ахмадиева* – қауымдастырылған профессор, Металлургия және кен байыту институты, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: akhmadiyeva141@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3154-9816.

Еркежан Баймұратқызы Абиқақ – PhD, Металлургия және кен байыту институты, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: abikak.erkezhan@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8705-4092.

Нурила Муратовна Бурабаева – қауымдастырылған профессор, Металлургия және кен байыту институты, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: nuri_eng@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2183-2239.

Таншолпан Казыбеккызы Сагынтаева – младший научный сотрудник, магистр, Институт металлургии и обогащения, г. Алматы, Казахстан; e-mail: tsagyntayeva00@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-5922-4172.

Нұржан Орақбай – инженер, Институт металлургии и обогащения, г. Алматы, Казахстан, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті докторанты, Өскемен қ., Қазақстан; e-mail: n.orakbay@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-6043-0936.

Information about the authors

Nazym Kanatovna Akhmadiyeva* – Associate Professor, Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation, Almaty, Kazakhstan; e-mail: akhmadiyeva141@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3154-9816.

Yerkezhan Baimuratovna Abikak – phD, Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation, Almaty, Kazakhstan; e-mail: abikak.erkezhan@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8705-4092.

Nurila Muratovna Burabayeva – Associate Professor, Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation, Almaty, Kazakhstan; e-mail: nuri_eng@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2183-2239.

Tangsholpan Kazybekkyzy Sagyntayeva – junior researcher, master degree, Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation, Almaty, Kazakhstan; e-mail: tsagyntayeva00@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-5922-4172.

Nurzhan Orakbay – Engineer of Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation, Almaty, Kazakhstan, Doctoral student of D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: n.orakbay@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-6043-0936.

Поступила в редакцию 05.06.2026
Поступила после доработки 20.08.2026
Принята к публикации 24.08.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-85

ҒТАХР: 61.31.43

Д. Мұқталы[1,2*], Б.Х. Мусабаева[3], А. Батқал[1], Қ. Қамұнұр[1], А. Абылайхан[2]
[1]Жану проблемалары институты,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Бөгенбай батыр көшесі, 172
[2]Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
Жаңа химиялық технологиялар мен материалдар ғылыми-зерттеу институты,
050040, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы, Әл-Фараби даңғылы, 71
[3]Астана халықаралық университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қаласы, Қабанбай батыр даңғылы, 8
*e-mail: dinara.muktaly@mail.ru

МЕХАНОХИМИЯЛЫҚ ЖӘНЕ ӨЗДІГІНЕН ТАРАЛАТЫН ЖОҒАРЫ ТЕМПЕРАТУРАЛЫҚ СИНТЕЗ КЕЗІНДЕ БОР КАРБИДІНІҢ ТҮЗІЛУ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ

Аңдатпа: *B_2O_3–Al–C және B_2O_3–Mg–C жүйелерінде механохимиялық және өздігінен таралатын жоғары температуралық синтез (ӨЖС) кезінде бор карбидінің түзілу заңдылықтары зерттелді. B_2O_3–Al–C жүйесін механохимиялық өңдеу планетарлық шарлы диірменде 350–500 айн/мин айналу жылдамдығында, 30–90 мин өңдеу ұзақтығында және шарлар массасының ұнтақ шихта массасына қатынасы (BPR) 10-30 болған жағдайда жүргізілді. Механикалық активтендіру ұнтақ қоспасының ұсақталуы және құрылымдануымен, сондай-ақ бороалюминаттық, оксидтік және карбидтік фазалардың түзілуімен жүретін қатты фазалық түрленулердің дамуымен қатар жүретіні анықталды. 450 айн/мин, 30 мин және BPR = 20 режимінде алынған өнімде рентгендік фазалық талдау арқылы $Al_{12}B_6O_{36}$, Al_2O_3, қалдық Al және алюминий-көміртекті фазамен қатар B_4C фазасы анықталды.*

©Д. Мұқталы, Б.Х. Мусабаева, А. Батқал, Қ. Қамұнұр, А. Абылайхан, 2026