



Синтез трифторида алюминия: механизм фазовых превращений минералов

О. Б. Котова, А. В. Понарядов, И. Н. Размыслов

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия

kotova@geo.komisc.ru

Трифторид алюминия широко применяется в различных отраслях промышленности (химической, стекольной, керамической и др.). Промышленные способы основаны на фторировании гидроксида алюминия плавиковой кислотой, фтористым водородом. Стоимость сырья и экологические риски производства AlF_3 стимулируют поиск альтернативных схем, основанных на использовании некондиционных алюминиевых руд и отходов их переработки.

Технологии синтеза трифторида алюминия были разработаны на примере высокожелезистых и маложелезистых бокситов (Средний Тиман, Россия) и гидрофторида аммония. Выявлена последовательность фазовых превращений бёмита и других минеральных фаз, определены их температурные интервалы. Определены размеры и морфоструктурные особенности AlF_3 . Показано, что фторидные технологии переработки позволяют эффективно вскрывать минеральное сырьё и получать высоколиквидные продукты.

Ключевые слова: трифторид алюминия, алюминиевое сырьё, фторидные технологии, бёмит

Synthesis of aluminum trifluoride: mechanism of phase transformations of minerals

O. B. Kotova, A. V. Ponaryadov, I. N. Razmyslov

Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar, Russia

Aluminum trifluoride is widely used in various industries (chemical, glass, ceramics, etc.). Industrial methods are based on the fluorination of aluminum hydroxide with hydrofluoric acid and hydrogen fluoride. The cost of raw materials and the environmental risks of AlF_3 production motivate the search for alternative processes based on the use of substandard aluminum ores and their processing waste.

Aluminum trifluoride synthesis technologies were developed using high-iron and low-iron bauxites (Middle Timan, Russia) and ammonium hydrofluoride. The sequence of phase transformations of boehmite and other mineral phases was identified, and their temperature ranges were determined. The size and morphostructural features of AlF_3 were determined. It was shown that fluoride processing technologies allow for the efficient recovery of mineral raw materials and the production of highly marketable products.

Keywords: aluminum trifluoride, aluminum raw materials, fluoride technologies, boehmite

Введение

Трифторид алюминия занимает центральное место в технологии электролитического получения алюминия, выполняя функции флюса и корректирующей добавки к криолитовому электролиту. AlF_3 снижает температуру электролитической ванны, компенсирует потери фтора и поддерживает оптимальное криолитовое отношение, что напрямую влияет на энергоёмкость и стабильность процесса электролиза (Храпкова и др., 2013).

В Российской Федерации промышленные способы получения трифторида алюминия основаны на «мокрых» схемах, при этом потребность в нем удовлетворяется лишь наполовину. В качестве источника фтора используется плавиковая кислота, фтористый водород, полученный серноокислотным разложением флюоритового концентрата, и кремнефтористо-водород-

ная кислота. В качестве алюминиевого сырья во всех способах используют гидроксид алюминия (Старостин, Островский, 2022). Стоимость и доступность сырья, а также экологические ограничения стимулируют поиск альтернативных схем, основанных на использовании бокситов и алюминиевых отходов. Вовлечение нещелочного алюминиевого сырья — бокситов различного качества — в процессы получения AlF_3 позволяет более полно использовать потенциальное содержание алюминия в руде и снизить ресурсные и транспортные затраты за счет интеграции с существующей инфраструктурой глиноземного и алюминиевого производства (Калинин, 2015).

Расширение направлений использования бокситового сырья рассматривается как один из перспективных путей повышения ресурсной эффективности алюминиевой отрасли и снижения техногенной на-

Для цитирования: Котова О. Б., Понарядов А. В., Размыслов И. Н. Синтез трифторида алюминия: механизм фазовых превращений минералов // Вестник геонаук. 2026. 5(377). С. 26–31. DOI: 10.19110/geov.2026.5.3

For citation: Kotova O. B., Ponaryadov A. V., Razmyslov I. N. Synthesis of aluminum trifluoride: mechanism of phase transformations of minerals. Vestnik of Geosciences, 2026, 5(377), pp. 26–31 DOI: 10.19110/geov.2026.5.3



грузки на окружающую среду (Куровцев и др., 2022; Дампилов, 2008). Наряду с традиционным применением бокситов (получения глинозема по Байер-процессу) все большее внимание уделяется вовлечению низкосортных алюминиевых руд и бокситсодержащих отходов в производство высоколиквидных фторсодержащих и алюмосодержащих продуктов с высокой добавленной стоимостью (Lv и др., 2023; De Bellis и др., 2022; Дьяченко, Петлин, 2011).

Высокая дисперсность бокситов и глин послужила обоснованием для наших исследований в области получения наноструктурированных материалов типа AlF_3 и FeF_3 . Исследование процессов структурообразования в алюмосиликатной системе Al-Si-O-Fe (гематит-бёмитовая руда) в процессе синтеза композитов с использованием методов трансформации минеральных фаз при физико-химических воздействиях имеет важное прикладное значение, включая разработку схем переработки упорных руд и проектирование новых материалов в экологических и энергетических технологиях (Размыслов и др., 2025). В этом контексте перспективным направлением является получение трифторида алюминия (AlF_3) непосредственно из бокситового сырья, что позволит повысить глубину переработки руды и уменьшить объемы складированных отходов.

Одним из подходов к синтезу трифторида алюминия из бокситового сырья может являться ступенчатое фторирование и последующая термическая обработка в условиях конвективного нагрева (муфельные или шахтные печи). Такой режим обеспечит хорошо контролируемый и воспроизводимый температурно-временной профиль, что важно для поэтапного протекания процессов дегидроксилирования, удаления примесей (Fe, Si, Ti) и формирования фторидных фаз алюминия с заданным фазовым составом. Реализации метода способствуют технологическая простота, адаптируемость к существующему термическому оборудованию и возможность обработки значительных объемов сырья.

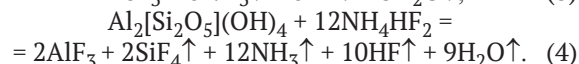
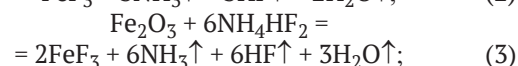
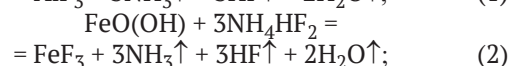
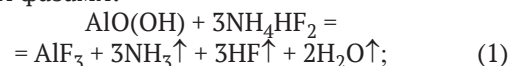
Цель работы — исследование фазовых превращений минералов алюминиевых руд в процессе синтеза AlF_3 , выявление температурных интервалов процессов взаимодействия фторирующего агента с компонентами минеральной системы и влияния вещественного состава исходного сырья на морфологию конечного продукта.

Материалы и методы

Использованы образцы двух разновидностей бокситов (Средний Тиман, Россия): высокожелезистого (GB) и маложелезистого (B), растертых до фракции -0.08 мм. Указанные разновидности бокситов характеризуются высоким содержанием алюминия и значением кремниевого модуля. Образец GB представляет собой высокожелезистую разновидность боксита

с кремниевым модулем 12.7. Основными фазами являются бёмит (41 %), гематит (28 %), гётит (9 %), каолинит (16 %) и рутил (6 %). Кремниевый модуль образца маложелезистого боксита ниже (7.7), выше — содержания бёмита, каолинита и рутила (51, 38 и 8 % соответственно), гематит практически отсутствует (менее 3 %). Химический состав образцов приведен в табл. 1.

Расчет количества фторирующего агента — гидрофторида аммония (XCH_3 , ЗАО «Химреактив») — проведен по реакциям взаимодействия с основными минеральными фазами:



Навеску смеси образца и фторирующего агента помещали в стеклоуглеродный тигель, термическую обработку проводили в окислительной атмосфере в муфельной печи МИМП-75П в интервале температур 220–450 °C (скорость нагрева 10 °C/мин, время изотермической выдержки 30 мин). Полученные образцы маркированы с указанием температуры реакции, например: GB CH 220 — высокожелезистый боксит, температура выдержки 220 °C.

Фазовый состав образцов определялся по дифрактограммам неориентированных образцов. Съемка проводилась на рентгеновском дифрактометре Наоуан DX-2700BH, излучение $\text{CuK}\alpha$, Ni-фильтр, 40kV, 30mA, SDD-детектор, область сканирования 2–65° 2 θ . Диагностика синтезированных фаз проводилась с использованием базы данных ICDD PDF-4. Оценка среднего размера области когерентного рассеяния (ОКР) проводилась по полуширине определенных диагностических отражений. Расчет ОКР осуществлялся по формуле Дебая–Шеррера (Ghadamnan и др., 2019) без учета эталона:

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta},$$

где D — средний размер ОКР в нм, K — безразмерный коэффициент формы частиц (0.893), λ — длина волны рентгеновского излучения ($\lambda_{\text{CuK}\alpha} = 1.5406 \text{ \AA}$), θ — угол дифракции (угол Брэгга), β — ширина рефлекса на полувысоте по Лауэ самого интенсивного пика (в радианах и в единицах 2 θ).

Химический состав был определен рентгенофлуоресцентным методом (энергодисперсионный рентгенофлуоресцентный спектрометр Clever A17). Термогравиметрический анализ проведен в окислительной атмосфере с помощью NETZSCH STA 449F5 TGA/DSC (интервал температур 30–1000 °C, скорость нагрева 10 °C/мин). Морфология синтезированных частиц AlF_3 исследована с помощью сканирующей электронной

Таблица 1. Химический состав образцов бокситов (мас. %)

Table 1. Chemical composition of bauxite samples (wt. %)

Образец Sample	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	TiO_2	V_2O_5	MnO	Прочие* Other*	Ппп LOI
GB	58.79	1.26	35.14	2.71	0.35	1.12	0.63	11.81
B	85.41	4.52	2.54	6.08	1.09	0.04	0.59	15.50

микроскопии (Tescan VEGA-3 с энергодисперсионным спектрометром X-MAX 50 mm²).

Результаты и обсуждение

При исследовании кривых синхротронного термического анализа (рис. 1) установлено, что взаимодействие минералов алюминиевой руды и гидрофторида аммония протекает в три этапа.

На первом этапе в интервале температур 125–140 °С происходит плавление гидрофторида аммония с высвобождением фторирующего агента (HF, эндотермический пик) и инициализация химических реакций с бёмитом, каолинитом и гематитом — образование гексафторалюмината аммония (экзотермический пик). Потеря массы образцов на этом этапе составляет ~15 %.

На втором этапе с ростом температуры реакционной смеси увеличивается выделение газообразных продуктов (HF, NH₃, H₂O). Бёмит и каолинит обладают схожим кристаллическим строением. В структуре бёмита диоктаэдрические слои соединяются ребрами октаэдров в пары. Эти слои связаны между собой довольно прочными водородными связями между атомами кислорода и группами гидроксила (Боева и др., 2022). Каолинит также имеет слоистую структуру, в которой каждый слой состоит из двух сеток: тетраэдрической — из ионов кремния и кислорода, где каждый атом кремния окружен четырьмя атомами кислорода, и октаэдрической — из ионов алюминия, кислорода и гидроксильных групп, где каждый атом алюминия окружен шестью атомами кислорода или гидроксильными группами. Связи между слоями сформированы за счет водородных связей и ван-дер-ваальсовых сил (Сахаров, Дриц, 2023). Благодаря сильным водородным связям обе структуры обладают большой устойчивостью, и при нагревании выделение конституционной воды происходит в интервале 500–600 °С (Котова и др., 2022). Однако вскрытие минерального сырья гидрофторидом аммония во многих случаях протекает при более низких температурах (Крысенко и др., 2015; Perovskiy

и др., 2022). Поэтому второй этап, определяемый по эндотермическому пику в области ~300 °С, следует связать с нарушением кристалличности бёмита и каолинита, потерей конституционной воды (на что указывает значительная потеря массы образцов ~35 %), дальнейшей реакцией с продуктами плавления гидрофторида аммония и образованием тетрафторалюмината аммония.

На третьем этапе фиксируется экзотермический пик, положение которого отличается для высокожелезистых и маложелезистых бокситов (392 и 378 °С соответственно). Наблюдаемый эффект наиболее вероятно связан с реакцией разложения тетрафторалюмината аммония и образования трифторида алюминия (Старостин, Островский, 2022).

Для уточнения механизма взаимодействия гидрофторида аммония с минеральными фазами бокситовой руды был проведен термодинамический анализ химических реакций (1) — (4): исследованы температурные зависимости изменения энергии Гиббса ΔG° с помощью программы HSC Chemistry 6.0 (рис. 2). Из анализа полученных кривых установлено, что бёмит первым связывается с продуктами расплава гидрофторида аммония. Температура начала реакции взаимодействия каолинита с расплавом несколько выше и, судя по всему, протекает параллельно с разложением каолинита. При этом из системы полностью удаляется конституционная вода и кремний. Гематит и гётит характеризуются примерно одинаковой температурой начала реакции взаимодействия. Рассматриваемые реакции относятся к гетерогенным процессам и могут быть описаны моделью с фронтальным перемещением зоны реакции. Поскольку фторирующий агент находится в газообразном агрегатном состоянии и может легко удаляться из открытой системы, фторирование железосодержащих фаз может происходить не полностью.

Проведенные измерения химического состава образцов с контролем изменения их массы представлены в табл. 2. По потере массы выбранные температурные режимы обработки полностью соответствуют обозначенным выше этапам. Полное удаление кремния из системы сдерживается необходимостью разруше-

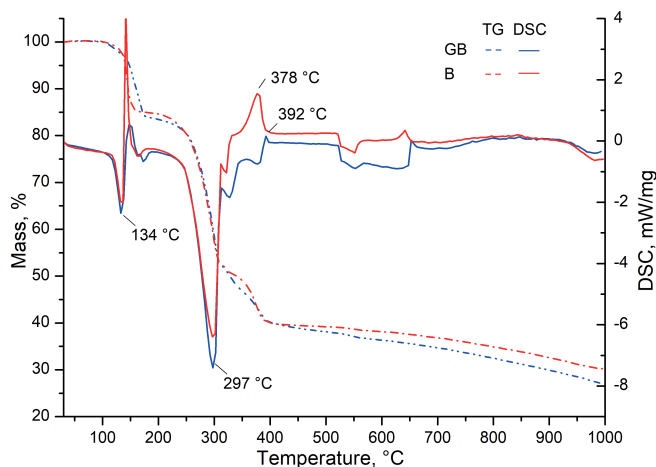


Рис. 1. Кривые ТГ и ДСК взаимодействия образцов высокожелезистых (GB) и маложелезистых (B) бокситов с гидрофторидом аммония

Fig. 1. TG and DSC curves for the interaction of high-iron (GB) and low-iron (B) bauxite samples with ammonium hydrogen fluoride

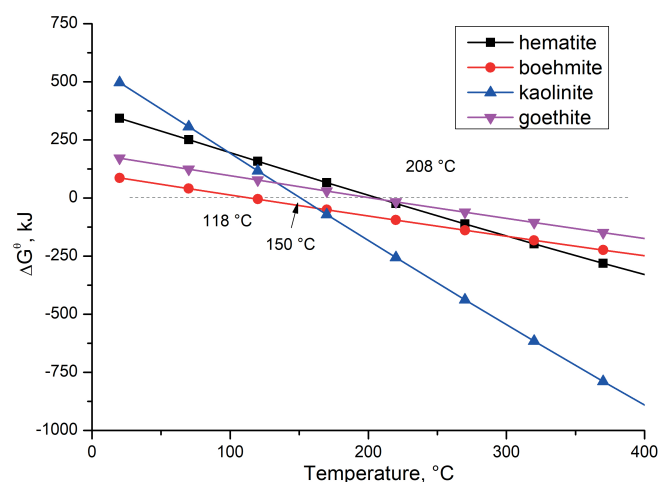


Рис. 2. Кривые температурной зависимости изменения энергии Гиббса ΔG°

Fig. 2. Temperature dependence curves of the Gibbs energy change ΔG°



Таблица 2. Химический состав синтезированных образцов (мас. %)

Table 2. Chemical composition of the synthesized samples (wt. %)

Образец Sample	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	V ₂ O ₅	MnO	Прочие Other	Потеря массы, % Mass loss, %
GB_CH_220	43.58	3.35	47.95	2.40	0.37	1.41	0.94	20.0
GB_CH_370	51.96	0.09	43.36	2.57	0.40	1.42	1.80	53.3
GB_CH_450	52.31	0.04	42.21	2.60	0.40	1.43	1.01	62.8
B_CH_220	72.09	12.58	4.29	8.42	1.19	0.03	1.40	22.2
B_CH_370	84.13	0.10	4.09	7.59	1.16	0.06	2.87	54.3
B_CH_450	86.17	0.07	3.72	7.41	1.11	0.06	1.46	64.7

ния кристаллической структуры каолинита и происходит на втором этапе. Для обоих образцов после термической обработки при 220 °С наблюдается повышение содержания кремния по сравнению с исходным бокситом, что может объясняться изменением координации одного элемента (например, алюминия) и оказывать влияние на интенсивность флуоресценции другого элемента (кремния).

Исследование фазовых превращений в системе «боксит — гидрофторид аммония» при конвективном нагреве с помощью РФА позволило установить влияние содержания минеральных фаз (бемита, каолинита, гематита, рутила) в исследованных образцах на процесс формирования трифторида алюминия. Так, для образца GB (рис. 3, а) на первом этапе зафиксировано образование только гексафторалюмината аммония. Для образца В (рис. 3, б) процесс фторирования протекает более интенсивно, и уже на первом этапе образуется тетрафторалюминат аммония. Помимо этих фаз идентифицированы рефлексы исходных бемита и рутила, а также корунда — продукта разложения каолинита. Мы не обнаружили фаз, связанных с кварцем или другими соединениями кремния, которые также должны были образовываться при разложении каолинита. Кварц имеет одну из самых низких температур начала реакции фторирования, которая понижается с уменьшением степени кристалличности SiO₂ (Крысенко и др., 2015).

С повышением температуры обработки до 370 °С в обеих исследованных системах остается только тет-

рафтоалюминат аммония. Полученный результат хорошо соотносится с данными (Abdel-Rehim, 2012): температурный интервал полного разложения гексафторалюмината аммония не ниже 350 °С. Рефлексы корунда исчезают.

На третьем этапе формируется трифторид алюминия, кристалличность образцов снижается. Для образца GB зафиксирована рентгеноаморфная фаза, средний размер ОКР составил 24 нм. Образец В характеризуется более высокой кристалличностью, однако средний размер ОКР оказывается ниже (16 нм).

В кривых всех образцов присутствуют рефлексы рутила. Это в сочетании с данными химического анализа (табл. 1) показывает, что фторирование рутила практически не происходит. При относительно невысокой температуре (ниже 300 °С) процесс протекает медленно: при таких условиях могут образовываться промежуточные продукты, которые формируют пленку на поверхности рутила и практически останавливают реакцию. С заметной скоростью фторирование начинается примерно при 450 °С (Карелин, Каменева, 2006).

На СЭМ-изображениях прослеживается изменение морфоструктурных характеристик синтезированных частиц. Для образца GB на втором этапе (рис. 4, а) происходит формирование рыхлых агрегатов хлопье-подобных частиц, которые с повышением температуры трансформируются в уплощенные кристаллы трифторида алюминия неправильной формы (третий этап, рис. 4, б). Средний размер ~200 нм. При использова-

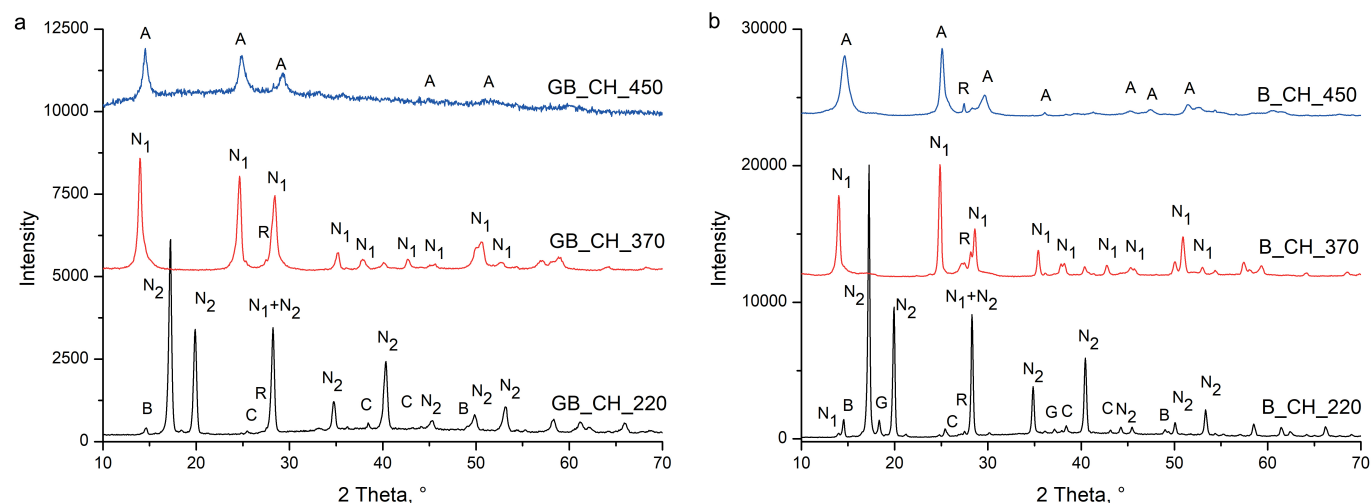


Рис. 3. Дифрактограммы продуктов фторирования образцов GB (а) и В (б), конвективный нагрев при различных температурах (N₁ — NH₄AlF₄, N₂ — (NH₄)₃AlF₆, В — бемит, G — гиббсит, C — корунд, R — рутил, A — AlF₃)

Fig. 3. Diffraction patterns of fluorination products of samples GB (a) and B (b), convective heating at various temperatures (N₁ — NH₄AlF₄, N₂ — (NH₄)₃AlF₆, B — boehmite, G — gibbsite, C — corundum, R — rutile, A — AlF₃)

нии маложелезистого боксита (рис. 4, с, d) формирование подобных кристаллов начинается на втором этапе, однако их размер меньше (~80 нм). На третьем этапе синтеза кристаллы увеличиваются в размерах. Во всех исследованных образцах обнаружены механические включения удлиненных кристаллов рутила. Железо (образец GB) фторируется частично, встречаются единичные кристаллы неправильной формы. Также на поверхности обнаружены сконцентрированные выделения частиц железа размером до 40 мкм, по химическому составу соответствующие гематиту (рис. 5).

Измеренный с помощью энергодисперсионной приставки химический состав образцов (табл. 3) подтверждает описанный выше механизм фазовой трансформации: гексафторалюминат аммония — тетрафторалюминат аммония — трифторид алюминия. Так, для всех образцов азот фиксируется только после обработ-

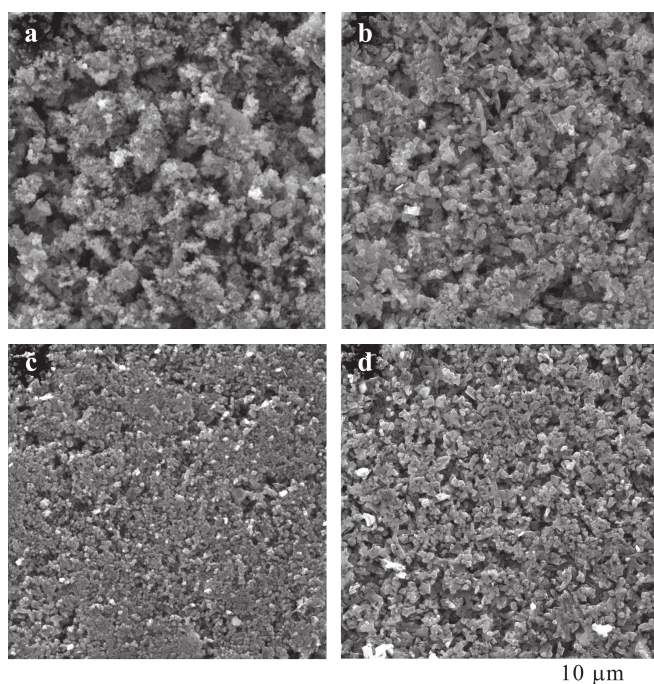


Рис. 4. СЭМ-изображения продуктов синтеза: А — GB_CH_370, В — GB_CH_450, С — B_CH_370, D — B_CH_450

Fig. 4. SEM images of synthesis products: А — GB_CH_370, В — GB_CH_450, С — B_CH_370, D — B_CH_450

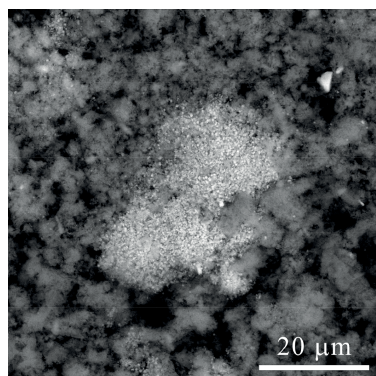


Рис. 5. СЭМ-изображение выделения частиц железа, образец GB_CH_450

Fig. 5. SEM image of iron particles on surface of sample GB_CH_450

Таблица 3. Химический состав образцов (EDS, ат. %)

Table 3. Chemical composition of the samples (EDS, at. %)

Образец Sample	Al	Fe	Ti	F	N	O
GB_CH_370	17.64	5.02	0.38	65.98	10.78	0.00
GB_CH_370, выделение железа iron precipitation	9.88	15.83	0.58	62.74	5.21	5.94
GB_CH_450	20.63	6.35	0.29	67.34	0.00	4.99
GB_CH_450, выделение железа iron precipitation	5.56	26.64	2.67	24.37	0.00	40.54
B_CH_370	21.13	0.24	0.42	67.05	10.94	0.00
B_CH_450	25.74	0.33	0.83	70.27	0.00	2.70

ки при температуре 370 °С (второй этап) и полностью уходит из системы на третьем этапе.

Выводы

Трифторид алюминия был получен из алюминиевого сырья — высокожелезистых и маложелезистых бокситов — с использованием гидрофторида аммония. Прослежена последовательность фазовых превращений бёмита и других минеральных фаз.

Выделено три этапа:

- 1) плавление гидрофторида аммония и образование гексафторалюмината аммония;
- 2) формирование тетрафторалюмината аммония при дальнейшем взаимодействии с фторирующим агентом HF;
- 3) образование трифторида алюминия.

Определены характеристические размеры получаемых частиц AlF_3 . При использовании маложелезистых бокситов в качестве исходного сырья удастся получить более дисперсные частицы.

Таким образом, гидрофторид аммония является эффективным фторирующим агентом. Фторидные технологии переработки позволяют эффективно вскрывать минеральное сырье, не только с высоким выходом извлекать все ценные компоненты в виде конечных оксидов, но и формировать в процессе высоколиквидные востребованные продукты, что повышает комплексность использования упорного и техногенного сырья.

Работа выполнена в рамках тем государственного задания Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН с использованием оборудования ЦКП «Геонаука» и «Химия».

Литература / References

- Боева Н. М., Макарова М. А., Шипилова Е. С., Слукин А. Д., Соболева С. В., Жегалло Е. А., Зайцева Л. В., Бортников Н. С. Гибсит и бёмит в латеритизированных корах выветривания разного возраста: особенности условий нахождения и образования // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 504. № 2. С. 145–155. DOI: 10.31857/S2686739722060044
- Boeva N. M., Makarova M. A., Shipilova E. S., Slukin A. D., Soboleva S. V., Zhegallo E. A., Zaitseva L. V., Bortnikov



- N. S. Gibbsite and boehmite in lateritized weathering crusts of different ages: specific features of occurrence and formation conditions. *Doklady Earth Sciences*. 2022;504(2):145–155. Russian.
- Дампильон Ж. В. Влияние производства алюминия в России на окружающую среду // Вестник Чувашского университета. 2008. № 3. С. 349–354.
- Dampilon Zh. V. Environmental impact of aluminum production in Russia. *Bulletin of Chuvash State University*. 2008;3:349–354. Russian.
- Дьяченко А. Н., Петлин И. В. Техничко-экономическая оценка эффективности производства фторида алюминия // Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 318. № 6. С. 36–39.
- Dyachenko A. N., Petlin I. V. Techno-economic assessment of aluminum fluoride production efficiency. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University*. 2011;318(6):36–39. Russian.
- Калинин Е. П. Проблема комплексного использования бокситов Тимана // Известия Коми научного центра УРО РАН. 2015. № 4 (24). С. 56–60.
- Kalinin E. P. The problem of integrated utilization of Timan bauxites. *Proceedings of the Komi SC UB RAS*. 2015;4(24):56–60. Russian.
- Карелин В. А., Каменева О. В. Фторидный метод переработки рутилового концентрата // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2006. Т. 309. Вып. 3. С. 94–98.
- Karelin V. A., Kameneva O. V. Fluoride method for processing rutile concentrate. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Geo-resource Engineering*. 2006;309(3):94–98. Russian.
- Котова О. Б., Устюгов В. А., Шиенг Сан, Понарядов А. В. Получение муллита: фазовые трансформации каолинита, термодинамика процесса // Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 129–135. DOI: 10.31897/PMI.2022.43
- Kotova O. B., Ustyugov V. A., Shieng San, Ponaryadov A. V. Mullite synthesis: phase transformations of kaolinite and process thermodynamics. *Journal of Mining Institute*. 2022;254:129–135. Russian.
- Крысенко Г. Ф., Эпов Д. Г., Медков М. А. Гидрофторид аммония — перспективный реагент для вскрытия и концентрирования полезных компонентов полиметаллического и техногенного сырья // Труды Кольского научного центра РАН. 2015. Т. 5. Вып. 31. С. 75–80.
- Krysenko G. F., Epov D. G., Medkov M. A. Ammonium hydrogen difluoride: a promising reagent for the decomposition and concentration of valuable components from polymetallic and technogenic raw materials. *Proceedings of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences*. 2015;5(31):75–80. Russian.
- Куросhev И. С., Бахтина И. С., Скобелев Д. О. (2022). Ресурсная и экологическая эффективность производства алюминия на принципах НДТ // Компетентность. 2022. № 4. С. 10–15. DOI: 10.24412/1993-8780-2022-4-10-15
- Kuroshev I. S., Bakhtina I. S., Skobelev D. O. Resource and environmental efficiency of aluminum production based on BAT principles. *Kompetentnost*. 2022;4:10–15. Russian.
- Размыслов И. Н., Котова О. Б., Кочева Л. С. Минералогические особенности высокодисперсных минеральных систем. Твердофазный синтез Fe-Al-F-композилов (Вежаю-Ворыквинское месторождение бокситов) // Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья (Плаксинские чтения — 2025), Екатеринбург, 29 сентября — 4 октября 2025 г.: Материалы междунар. конф. Екатеринбург: Форт-Диалог Исет, 2025. С. 157–159.
- Razmyslov I. N., Kotova O. B., Kocheva L. S. Mineralogical and technological features of highly dispersed mineral systems. Solid-phase synthesis of Fe-Al-F composites (Vezhayu-Vorykva bauxite deposit). *Innovative processes of complex and deep processing of natural and non-traditional mineral raw materials (Plaksin Readings - 2025)*, Yekaterinburg, September 29 — October 4, 2025: *Proc. int. conf. Yekaterinburg: Fort-Dialog Iset*; 2025. p. 157–159. Russian.
- Сахаров Б. А., Дриц В. А. Структурная неоднородность и индексы «кристалличности» природных каолинитов // Литология и полезные ископаемые. 2023. № 4. С. 319–337. DOI: 10.31857/S0024497X23700118
- Sakharov B. A., Drits V. A. Structural heterogeneity and “crystallinity” indices of natural kaolinites. *Lithology and Mineral Resources*. 2023;4:319–337. Russian.
- Старостин А. Г., Островский С. В. Синтез фторида алюминия по сухому способу из гидроксида алюминия и фторида аммония // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2022. Т. 65. Вып. 3. С. 43–51. DOI: 10.6060/ivk-kt.20226503.6514
- Starostin A. G., Ostrovsky S. V. Dry-process synthesis of aluminum fluoride from aluminum hydroxide and ammonium fluoride. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya*. 2022;65(3):43–51. Russian.
- Храпкова А. Н., Сизяков В. М., Бажин В. Ю. Использование фторидов алюминия с высокой насыпной плотностью для систем автоматизированного питания электролизеров // Записки Горного института. 2013. Т. 202. С. 173–177.
- Khrapkova A. N., Sizyakov V. M., Bazhin V. Yu. Use of high-bulk-density aluminum fluorides for automated feeding systems of electrolytic cells. *Journal of Mining Institute*. 2013;202:173–177. Russian.
- Abdel-Rehim A. M. Thermal and XRD analysis of synthesis of fluoro-topaz. *Thermochim. Acta*. 2012;538:29–35. DOI: 10.1016/j.tca.2012.03.006
- De Bellis J., Ochoa-Hernández C., Farès C., Petersen H., Ternieden J., Weidenthaler C., Amrute A. P., Schüth F. Surface and Bulk Chemistry of Mechanochemically Synthesized Tohdite Nanoparticles. *Journal of the American Chemical Society*. 2022;144(21):9421–9433. DOI: 10.1021/jacs.2c02181
- Ghadamnan E., Nabavi S. R., Abbasi M. Nano LTA Zeolite in Water Softening Process: Synthesis, Characterization, Kinetic studies and process optimization by Response Surface Methodology (RSM). *J. Water Environ. Nanotechnol*. 2019;4(2):1190–138. DOI: 10.22090/jwent.2019.02.004
- Ly X., Tan X., Han Z., Luo L., Wu Y. Preparation of AlF₃ from waste aluminum electrolyte via leaching, electrolysis, and roasting. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. 2025;35:2777–2789. DOI: 10.1016/S1003-6326(25)66847-6
- Perovskiy I. A., Burtsev I. N., Ponaryadov A. V., Smorokov A. A. Ammonium fluoride roasting and water leaching of leucocoxe concentrates to produce a high grade titanium dioxide resource (of the Yaregskoye deposit, Timan, Russia). *Hydrometallurgy*. 2022. V. 210. DOI: 105858, doi: j.hydromet.2022.105858