

Нефелиновые породы-

комплексное
алюминиевое
сырье



Нефелиновые породы- комплексное алюминиевое сырье



МОСКВА "НЕДРА" 1988



4963

Нефелиновые породы — комплексное алюминиевое сырье / С.Я. Данциг, Е.Д. Андреева, В.В. Пивоваров и др. — М.: Недра, 1988. — 190 с. ил.

Охарактеризованы геология и минералогия нефелиновых пород как комплексных руд для производства глинозема, содопродуктов и цемента, приведены требования к их вещественному составу, изложены технологические особенности переработки и обогащения. Разработаны критерии оценки качества руд, предложена основанная на этих критериях классификация. Рассмотрены геолого-экономические предпосылки расширения глиноземного и сопутствующих производств на основе использования нефелиновых руд на Кольском полуострове, в зоне влияния БАМа, а также современные представления о перспективах промышленного использования этого сырья.

Для научных работников — геологов, технологов, экономистов, занимающихся изучением, оценкой и использованием нефелиновых руд.

Табл. 29, ил. 38, список лит. — 35 назв.

Авторы:

*С.Я. ДАНЦИГ, Е.Д. АНДРЕЕВА, В.В. ПИВОВАРОВ,
Э.А. АМАН, Н.С. ШМОРГУНЕНКО, Л.Д. ТУГОЛЕСОВ.*

Рецензент: *Е.Д. Осокин*, канд. геол.-минер. наук (Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов)

И $\frac{1904050000 - 004}{043(01) - 88}$ 99-87

ISBN 5-247-00568-6

© Издательство "Недра", 1988

Литература, посвященная породам щелочного ряда (в том числе и нефелиновым), касается широкого круга проблем: особенностей их классификации, геологии, петрографии, минералогии и др. Эти же вопросы рассматриваются в появившихся в 60—80-х гг. обобщающих работах по щелочным провинциям как отечественных (Л.С. Бородин, О.А. Воробьева, В.И. Герасимовский, Т.Н. Иванова, А.А. Конев, В.А. Кононова, А.А. Кухаренко, М.П. Орлова, Ю.М. Шейнман и др.), так и зарубежных ученых (Дж. Б. Аллена, Д.С. Беркера, К.Л. Курри, В.С. Кинга, Д.С. Сазерленда, Д. Тейлора и др.).

Практическая значимость этих пород оценивается главным образом с точки зрения приуроченности к ним определенной минерализации и месторождений ряда полезных ископаемых (редкие металлы, апатит, флогопит, железо и др.). Вместе с тем в СССР нефелинсодержащие породы начиная с 20-х гг. изучаются, а с 40-х гг. используются в качестве глиноземсодержащих. В настоящее время они являются важнейшим комплексным сырьем, обеспечивающим существенную часть общего выпуска глинозема, соды и весь объем производства поташа.

В последние десятилетия все больший интерес к указанным вопросам проявляется и в ряде зарубежных стран. Однако в литературе (как в отечественной, так и в зарубежной) освещены либо сугубо специальные вопросы технологии комплексной переработки нефелинового сырья, либо геологические особенности отдельных месторождений и проявлений (реже определенных регионов). Практически единственной обобщающей работой по этим вопросам можно считать монографию И.Н. Китлера и Ю.А. Лайнера, причем и в ней основное внимание уделено технологическим аспектам. Вместе с тем накопленный за последние три десятилетия обширный фактический материал по изучению, оценке и промышленному использованию щелочного алюмосиликатного сырья ряда регионов СССР и многих зарубежных стран требует анализа и обобщения. Именно эту цель и преследует предлагаемая работа, при написании которой были использованы прежде всего материалы авторов, данные различных геологических (в первую очередь региональных производственных объединений — "Запсибгеология", "Красноярскгеология", "Бурятгеология", "Читагеология", Кия-Шалтырского нефелинового рудника и др.) и научно-исследовательских организаций, а также литературные данные [7, 12, 29, 31, 32].

Научное руководство авторским коллективом осуществляли С.Я. Данциг и Н.С. Шморгуненко.

Алюминий является одним из важнейших по промышленному значению конструкционных материалов. По объему производства и потребления в мире, уже давно превысившему 10 млн. т в год, он занимает второе место среди других металлов после чугуна и стали.

Высокие эксплуатационные свойства алюминия в сочетании с относительно благоприятными технико-экономическими показателями производства обуславливают значительный, измеряемый сотнями рублей (в расчете на 1 т металла) эффект от его использования взамен других материалов. В результате алюминий и его сплавы нашли широкое применение практически во всех отраслях современной техники, а также в бытовой сфере. Только за 1950—1985 гг. мировое потребление алюминия (без стран социалистического содружества) увеличилось в 11 раз. Еще более высокими темпами характеризуется рост потребления этого металла в СССР.

В перспективе алюминий будет играть еще более важную роль в мировой экономике, в том числе в народном хозяйстве нашей страны, далекою пока от насыщения этим важнейшим конструкционным материалом. Ожидается, что к 2000 г. производство и потребление первичного алюминия в капиталистических и развивающихся странах увеличится по сравнению с уровнем 1985 г. в 2 раза и достигнет 25—30 млн. т в год.

В этих условиях все возрастающее значение приобретает проблема обеспечения сырьем алюминиевой промышленности, удовлетворения ее требований как в количественном, так и в качественном отношении.

Алюминий — один из господствующих в неорганической природе элементов. По расчетам А.П. Виноградова, по содержанию в земной коре (около 8,1 %) он занимает третье место, уступая лишь кислороду (47,1 %) и кремнию (29 %), и почти в 2 раза превосходит наиболее употребляемый в настоящее время металл — железо (4,7 %). Однако в промышленных концентрациях самородный алюминий не обнаружен. Вследствие высокой химической активности он встречается обычно в связанном виде в составе очень большого числа минералов (около 250): корунда, диаспора, бемита, гидрагиллита, кванита, силлиманита, каолинита, алунита, нефелина, серицита и др.

Особенно часто алюминий связан с кремнием, поэтому алюминийсодержащие минералы наиболее широко представлены алюмосиликатами (полевые шпаты и фельдшпатоиды, минералы дистен-силлиманитовой группы и др.). Все они, так же, как и корунд, имеют эндогенное происхождение.

Широко распространены породы, образовавшиеся в результате выветривания первичных горных пород и характеризующиеся, как правило, более высоким содержанием алюминия. К ним принадлежат бокситы и различные глинистые породы.

Современный промышленный способ получения металлического алюминия заключается в извлечении из алюминийсодержащего сырья технического оксида алюминия (глинозема) и последующего электролиза его совместно с криолитом. Поэтому возможность использования той или иной горной породы в качестве алюминиевой руды определяется экономической эффективностью ее переработки на глинозем. В современных условиях к алюминиевым рудам могут быть отнесены бокситы, нефелиновые и некоторые другие щелочные алюмосиликатные, алунитовые, каолиновые, анортзитовые и дистен-силлиманитовые породы. Сырьевой базой для производства глинозема могут также служить содержащие алюминий золы, образующиеся при сжигании углей, высокоглиноземистые отходы обогащения углей и руд, металлургические шлаки.

С момента возникновения и становления во второй половине прошлого столетия промышленного производства алюминия и до настоящего времени основной алюминиевой рудой во всем мире являются бокситы. Зарубежная алюминиевая промышленность использует исключительно это сырье.

Бокситы представляют собой сложную горную породу осадочного происхождения, состоящую в основном из гидроксидов алюминия, оксидов и гидроксидов железа, кремния и других элементов. Содержание наиболее важных в промышленных бокситовых рудах компонентов — глинозема и оксида кремния — изменяется в среднем в пределах 45—60 и 1—10 % соответственно.

Длительное время мировая алюминиевая промышленность ориентировалась на использование бокситов очень высокого качества — с содержанием Al_2O_3 60—75 % и SiO_2 1—3 %. В связи с тем, что запасы бокситов такого качества были недостаточно, сырьевая база алюминиевой промышленности считалась ограниченной.

Высококачественными бокситами считаются руды, содержащие 50—60 % Al_2O_3 и до 6 % SiO_2 , с кремневым модулем (отношением содержания оксидов алюминия и кремния) более 15. Именно на переработке подобных бокситов преимущественно (на 95 %) базируется зарубежное алюминиевое производство. Общие (включая прогнозные) запасы таких бокситов за рубежом оцениваются в настоящее время в размере около 70 млрд. т, в том числе достоверные — около 13 млрд. т. Наиболее крупные ресурсы бокситов выявлены в развивающихся странах и Австралии, расположенных в тропическом и субтропическом поясах, в том числе достоверные запасы в отдельных странах составляют (в млрд. т): в Гвинее — 4,5; Австралии — 2,7; на Ямайке — 1,5; в Бразилии — 1,3; Индии и Гайане — по 0,7 и

т. д. Крупная бокситоносная провинция обнаружена в последние годы в южной части Вьетнама. В названных странах сосредоточена в настоящее время и подавляющая часть мощностей по добыче боксита — свыше 62 млн. т в год, или 91 % общей добычи капиталистических и развивающихся стран. При этом на долю основных добывающих стран приходится (в млн. т): Австралии — около 25; Гвинеи — 13; Ямайки — 9; Бразилии — 5,5; Суринама — 4.

В то же время наиболее развитые капиталистические государства, обладающие мощной алюминиевой промышленностью, либо располагают крайне незначительными собственными ресурсами бокситов (Франция и США — по 3 % от мировых запасов), либо не имеют таковых вовсе. В результате эти страны, исключая Францию, практически полностью (на 90 % и более) удовлетворяют свою потребность в бокситах за счет импорта из Латинской Америки, Африки, Азии и Австралии. Тем не менее на их долю приходится около половины суммарного производства глинозема в капиталистических и развивающихся странах. В целом это имеет исторические причины, заключающиеся прежде всего в том, что традиционные компании по производству алюминия длительное время стремились посредством протекционных тарифов воспрепятствовать импорту глинозема и в то же время не желали инвестировать большие капиталовложения в страны, добывающие боксит.

Положение начало меняться с 50—60-х гг. текущего столетия, когда все более растущая зависимость развитых стран от импорта бокситов привела к необходимости расположения глиноземных заводов в непосредственной близости от рудной базы с целью минимизации транспортных расходов. В эти годы были построены глиноземные заводы на Ямайке, в Суринаме, Гвинее, Бразилии, Индии, на Тайване. В последние годы тенденция, направленная на отказ от размещения новых мощностей по производству глинозема в индустриально развитых странах (за исключением Австралии), стала господствующей. Утвердилась практика создания на месте — в бокситодобывающих странах — собственного глиноземного и все чаще — алюминиевого производства. Это предопределяет сокращение в дальнейшем удельного веса экспорта боксита в страны — производители алюминия, который в настоящее время составляет около 40 % от общей его добычи. В то же время вывоз глинозема будет возрастать, поскольку в течение одного-двух ближайших десятилетий, видимо, сохранится ориентация на преимущественное использование бокситового сырья.

Сложившаяся ситуация является следствием в основном двух факторов: исключительно высоких запасов качественных бокситов и относительно низких цен на них. Бокситодобывающие рудники только достоверными запасами обеспечены в настоящее время на 165 лет, прогнозными — на 360 лет — положение беспрецедентное по сравнению как с другими металлами, так и с прошедшими года-

ми (в 1965 г., например, обеспеченность достоверными запасами составляла 70 лет). Низкий уровень цен объясняется в большинстве случаев благоприятными условиями и значительными масштабами добычи бокситов*. Вследствие относительно незначительного воздействия инфляции на показатели добычи не следует ожидать существенно увеличения цен на бокситы и в перспективе. Так, в 1980—1985 гг. цены не только не выросли, но даже испытали тенденцию к снижению.

Заслуживают внимания и довольно крупные запасы низкокачественных бокситов (с кремневым модулем от 8 до 5), которые во все более широких масштабах используются мировой алюминиевой промышленностью. Для их переработки разработаны специальные технологические схемы, характеризующиеся повышенными капиталовложениями и энергоемкостью, применяется обогащение на рудниках или глиноземных заводах.

Однако с течением времени становится очевидным стремление развитых капиталистических стран к использованию собственного небокситового сырья: каолинов, глинистых сланцев, щелочных алюмосиликатных пород алунитов, зол электростанций и других продуктов, ресурсы которых в этих странах велики. Это обусловлено рядом факторов и прежде всего следующими: желанием достижения экономической независимости в отношении обеспечения себя алюминиевым сырьем, неуверенностью ведущих капиталистических фирм в возможности сохранения благоприятных для них условий использования природных ресурсов развивающихся стран; стремлением ведущих производителей алюминия избежать значительных затрат по транспортировке боксита и глинозема из удаленных бокситодобывающих стран; возможностью получения при переработке небокситовых руд не только глинозема, но и соизмеримых с ним по стоимости побочных продуктов.

Заблаговременная подготовка к новым условиям уже ведется крупными зарубежными фирмами: интенсифицируются исследования (нередко — с проверкой в опытно-заводском масштабе) по переработке небокситового сырья различными способами: щелочными, кислотными, термическими и др., принимаются меры к использованию (путем закупки лицензий) технологических способов, разработанных в СССР и др.

В отличие от зарубежной практики алюминиевая промышленность СССР с момента зарождения и до настоящего времени в значительной степени ориентируется на переработку относительно бедного алюминиевого сырья: бокситов низкого качества, щелочных алюмосиликатных пород и алунитов.

* В большинстве бокситодобывающих стран добыча осуществляется открытым способом при очень большой мощности карьеров (до 11 млн. т в год).

Первые отечественные алюминиевые заводы — Волховский и Днепровский — были созданы на базе низкокачественных бокситов Тихвинского месторождения, единственного в то время источника алюминиевого сырья в стране. Организация переработки таких бокситов методом спекания позволила впервые в мировой практике решить проблему промышленного производства качественного глинозема из высококремнистых бокситов. Однако этому производству свойственны относительно высокие капитальные и эксплуатационные затраты.

В конце 30-х гг. было разведано Североуральское месторождение бокситов, характеризующихся высоким содержанием глинозема и низким — кремнезема, вследствие чего эти бокситы могут перерабатываться по способу Байера. Однако повышенное содержание CO_2 (2,5—3,2 %) и S (около 1 %) снижает качество этого сырья и в сочетании с относительно неблагоприятными условиями добычи (подземный способ) существенно ухудшает технико-экономические показатели его переработки.

Еще менее благоприятны показатели использования бокситов южноуральских месторождений, которые отличаются повышенным содержанием кремнезема, высокой твердостью и добываются также подземным способом.

Ряд месторождений бокситов низкого качества выявлен в Северном Казахстане. Несмотря на то, что добыча этих бокситов осуществляется дешевым открытым способом, переработка их сопряжена со сравнительно высокими производственными издержками.

Из перспективных бокситовых проявлений наибольший практический интерес представляют месторождения в Архангельской области и в Коми АССР. Однако вовлечение их в промышленное использование также характеризуется относительно неблагоприятными технико-экономическими показателями: первого — в силу высокого содержания оксида кремния и низкого кремневого модуля (~3), второго — в связи с большими затратами на строительство объектов инфраструктуры, прежде всего железнодорожной ветки.

Трудности обеспечения алюминиевой промышленности СССР высококачественными отечественными бокситами, относительно неблагоприятные показатели использования их, а также бокситов низкого качества обусловили повышенный интерес к небокситовым видам алюминиевого сырья. Некоторые виды его стали известны еще задолго до Октябрьской революции (алуниты Закавказья, Украины и Средней Азии) или в первые послереволюционные годы (нефелиновые породы Кольского полуострова).

Отличительная особенность небокситового сырья — низкое содержание в нем Al_2O_3 (20—30 %) и в то же время повышенное содержание ряда других полезных компонентов, прежде всего щелочей, серного ангидрида и др., которые используются не только в технологи-

3644

ческом процессе, но и для побочного получения самостоятельных товарных продуктов.

К настоящему времени в СССР накоплен большой положительный опыт переработки в крупном промышленном масштабе алунитовых и нефелиновых пород.

Алуниты представляют собой один из новых перспективных видов алюминиевого сырья. Различают натриевую и калиевую разновидности этих пород. В промышленных месторождениях обычно преобладает последняя. Алуниты бедны глиноземом (содержание Al_2O_3 в рудах Загликского месторождения — около 22 %), однако с учетом входящих в их состав щелочей (4—5 %) и серного ангидрида (около 20 %) суммарное содержание полезных составляющих находится на уровне 50 %.

Ранее алуниты использовались только в качестве сырья для производства квасцов. На протяжении последних десятилетий как в СССР, так и за рубежом разрабатывалось и испытывалось большое число различных способов (в большинстве случаев кислотных) переработки алунитов на глинозем и другие продукты, однако до настоящего времени эти способы не вышли за пределы лабораторных и опытно-заводских исследований. Исключение составляет щелочной или восстановительный метод, разработанный в СССР и в промышленном масштабе реализованный на Кировабадском алюминиевом заводе. Переработка алунитов по этой схеме позволяет наряду с глиноземом получать серную кислоту, сульфат калия (удобрения) и некоторые другие продукты.

Помимо Закавказья, крупные месторождения алунитов разведаны и в ряде других районов СССР: на западе Украины, Дальнем Востоке, в Средней Азии и Казахстане; они также могут послужить основой для организации комплексного производства глинозема и побочных продуктов.

Наша страна располагает предпосылками для промышленного использования и других видов небокситового алюминиевого сырья: зол твердого топлива, каолинов, кианитов и др. Однако наибольший интерес как с точки зрения технико-экономических показателей, так и в отношении возможных масштабов производства, несомненно, представляют щелочные алюмосиликатные породы и в первую очередь апатит-нефелиновые руды и уртиты Хибинского массива (Кольский полуостров) и нефелинсодержащие, особенно высококалийные, породы Сибири.

Основы комплексной переработки нефелинового сырья — концентрата, получаемого из апатит-нефелиновых руд Хибинских месторождений путем обогащения хвостов апатитового производства, были разработаны в 30-х гг. Нефелиновый концентрат ($\sim 29\% Al_2O_3$; $\sim 20\% \Sigma Na_2O + K_2O$; $\sim 44\% SiO_2$) перерабатывается способом, не имеющим аналогов в зарубежной практике — прямым спеканием

с известняком — и освоенным в нашей стране в широком промышленном масштабе на Волховском алюминиевом заводе (ВАЗе), Пикалевском производственном глиноземном объединении "Глинозем" имени 50-летия СССР (ППГО). При этом кроме глинозема получают содопродукты и белитовый шлам для производства цемента.

Достаточно широкие масштабы использования щелочного алюмосиликатного сырья в СССР обусловлены весьма благоприятными технико-экономическими показателями его переработки, что в свою очередь предопределяется следующими причинами:

1) большой ценностью побочно получаемых продуктов, лишь не существенно уступающих по суммарной стоимости основному продукту — глинозему;

2) высокой степенью комплексности переработки сырья (на ВАЗе и ППГО — полностью безотходные производства), в то время как на всех глиноземных и содовых заводах, перерабатывающих традиционное сырье, образуются большие количества неиспользуемого шлама и дистиллерной жидкости, наносящей вред окружающей среде и здоровью людей;

3) незначительными затратами по добыче и производству нефелинового сырья (концентрата), в несколько раз меньшими по сравнению с таковыми при добыче отечественных бокситов высокого качества.

Наконец, необходимо учитывать, что использование щелочных алюмосиликатных пород позволяет вследствие их широкого распространения на территории СССР существенно улучшить структуру размещения алюминиевой промышленности.

Особое внимание при этом должно быть обращено на нефелиновое сырье Кольского полуострова и на месторождения щелочных алюмосиликатных пород Сибири.

НЕФЕЛИНОВЫЕ* РУДЫ — КОМПЛЕКСНОЕ СЫРЬЕ
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ГЛИНОЗЕМА И ДРУГИХ ПРОДУКТОВ

Минерал нефелин, как известно, представляет собой алюмосиликат натрия и калия и состоит из трех основных компонентов — кремнезема (40—48 %), глинозема (30—35 %) и щелочей (17—20 %). В ассоциации с другими минералами нефелин слагает ряд горных пород, применяющихся как сырье для различных отраслей промышленности. На нефелин, близкий по составу полевым шпатам — прекрасному керамическому сырью — не могли не обратить внимание технологи. Однако использовать нефелин и породы, содержащие его, стали лишь после открытия сначала значительных скоплений так называемого нефелинового песка на берегу оз. Имандра у подножия Хибин, а затем — в 1921 г. — богатейших месторождений апатит-нефелиновых руд. Заслуга "открытия" хибинского нефелина для промышленности принадлежит П.А. Борисову (1926 г.) и Т.А. Земятчинскому (1928 г.), которые не только предложили технологические методы его переработки, но и частично внедрили использование нефелиновых песков в стекольной промышленности. Однако с особой остротой проблема промышленного использования нефелина возникла вследствие значительности масштаба переработки апатитовых руд Хибинских месторождений, в состав которых входит и значительное (до 60 %) количество нефелина.

Академик А.Е. Ферсман, руководивший изучением и освоением Хибинских месторождений, указал на необходимость утилизации всех составляющих апатитовых руд, в том числе и нефелина. Уникальные запасы этих руд и огромная для того времени мощность построенных обогатительных фабрик (комбинат "Апатит" в г. Кировске, ныне производственное объединение "Апатит") поставили перед учеными задачу использования нефелиновых хвостов. В результате научных поисков была разработана технология обогащения последних флотацией, позволяющей получать нефелиновый концентрат, содержащий два наиболее ценных компонента — оксиды алюминия (до 30 %) и щелочей (до 20 %). По сравнению с полевыми шпатами, применяемыми в стекольной и керамической промышленности, нефелин обладает рядом преимуществ: содержит больше ок-

* Здесь и в дальнейшем для краткости так называются щелочные высокоглиноземистые алюмосиликатные породы (в основном фельдшпатоидные).

сида алюминия (~ в 1,6 раза), щелочей и при этом может легко разлагаться даже слабыми кислотами.

Поисками путей "расщепления" нефелина занимались многие исследователи. Д.И. Щербаков писал: "Влодавец Н.И. простым спеканием нефелина с известняком при 1300° добился разложения нефелина. Получаются с одной стороны алюминат щелочей, а с другой силикат кальция, являющийся цементным сырьем.

В дальнейшем щелочи отделяются от алюминия пропусканием в раствор углекислоты, выделяемой в процессе спекания шихты. В конечном итоге получается окис алюминия, углекислые щелочи и цементное сырье, т. е. три продукта большого значения. Экономическая сторона предложенного метода выдерживает конкуренцию со способом переработки тихвинских бокситов".

Способ спекания, использованный Н.И. Влодавцем, был впервые применен в 1858 г. Луи Ле Шателье к бокситам, которые он спекал с водой. В 1897 г. русским исследователем Л. Пеняковым предложен способ спекания "алюминатных" руд, богатых кремнеземом, с известняком.

Всестороннее развитие и усовершенствование способа спекания применительно к высококремнистым алюминиевым рудам (бокситы, нефелиновые породы и др.) связано с именами советских ученых А.А. Яковкина, И.С. Лилеева, В.А. Мазеля, Ф.Н. Строкова и др.

Способ комплексной переработки нефелиновых концентратов в промышленном масштабе впервые освоен на Волховском алюминиевом заводе (1952 г.) и Пикалевском глиноземном комбинате (1959 г.). Опыт этих предприятий был применен при пуске (1970 г.) Ачинского глиноземного комбината (АГК), перерабатывающего природные нефелиновые руды — уртиты, близкие по составу к нефелиновому концентрату, получаемому по ПО "Апатит" (так называемому кольскому).

Принципиальная аппаратурно-технологическая схема комплексной переработки кольского нефелинового концентрата на глинозем, соду, поташ и цемент (см. гл. 2) применима практически ко всем высокоглиноземистым силикатным породам с ограниченным содержанием оксидов железа. Однако экономическая целесообразность ее использования в значительной степени определяется содержанием щелочей. Нефелиновые руды эксплуатируемых и большинства перспективных месторождений и проявлений представляют собой преимущественно полнокристаллические щелочные и недосыщенные кремнекислотой породы магматического генезиса. В качестве потенциальных сырьевых источников могут рассматриваться и их излишние или гипабиссальные аналоги. Они приурочены обычно к крупным щелочным комплексам (Хибинский, Кузнецко-Алатауский, Сангиленский, Витимский и т. д.). На территории СССР щелочные породы, включая нефелиновые, составляют более 0,7 % площади,

занимаемой интрузивными породами [16]. В силу морфологических особенностей нефелиновые руды слагают обычно месторождения с огромными (по сравнению с бокситами) запасами, позволяющими создавать предприятия экономически целесообразной мощности. Практически все известные рудопроявления характеризуются и благоприятными горнотехническими условиями отработки (открытая добыча, небольшой коэффициент вскрыши, малая обводненность и др.).

Указанные особенности позволяют считать нефелинсодержащие породы наиболее перспективными алюминиевыми рудами. Они сложены преимущественно минералами, представляющими собой щелочные алюмосиликаты, — фельдшпатоидами, основным из которых является нефелин, и полевыми шпатами. Эти породы объединены, согласно последней классификации [10], в семейства основных фойдолитов, щелочных габброидов и фельдшпатоидных сиенитов. В последнем выделяется вид псевдолейцитовый сиенит, в котором главную роль играет калиевая разность нефелина — кальсилит (сынныриты). Важная особенность щелочных алюмосиликатных пород как алюминиевых руд заключается также в том, что полезные компоненты (Al, Na, K, Ca) распределены почти во всех минеральных составляющих породы, но разработанная технология спекания позволяет извлекать их, в какой бы минеральной форме они ни находились (особенностям вещественного состава этих руд и их влиянию на оценку качества, а также на технологический процесс посвящены следующие главы).

Еще одна особенность нефелинового и вообще щелочного алюмосиликатного сырья — комплексный характер, предполагающий совместное получение при его переработке глинозема и ряда других продуктов, прежде всего соды кальцинированной, поташа (в сумме свыше 1 т на 1 т глинозема) и цемента (7—8 т на 1 т глинозема). Именно это обстоятельство существенно улучшает технико-экономические показатели производства. В то же время сущность разработанной технологии и экономическая эффективность ее использования при переработке данного сырья исключают возможность и целесообразность получения какого-либо одного из перечисленных продуктов. В этом заключается сложность оценки щелочных глиноземсодержащих руд и двойственность проблемы освоения новых месторождений.

ППГО, перерабатывающее дешевый нефелиновый концентрат, который получают при небольших затратах из отходов апатитового производства на Кольском полуострове, — одно из наиболее рентабельных предприятий подотрасли (табл. 1). Для производства 1 т глинозема здесь расходуется:

Нефелинового концентрата, т	4,0—4,1
Известняка, т	7,4—7,7

Топлива (условного), т.....	1,6—1,7
Теплоэнергии, ГДж.....	7,12
Электроэнергии, кВт·ч.....	1000— 1050

При сравнении основных технико-экономических показателей ППГО, Богословского алюминиевого завода (БАЗ), работающего на базе высококачественных бокситов, и Павлодарского алюминиевого завода (ПАЗ), использующего низкокачественные бокситы (см. табл. 1), необходимо учесть, что в общей стоимости товарной продукции ППГО на долю цемента и сопродуктов приходится примерно по 30 %.

Вместе с тем создание промышленного производства на основе нефелиновых руд характеризуется по сравнению с использованием бокситов рядом отрицательных факторов:

1) значительными капитальными вложениями на строительство промышленных комплексов;

2) более продолжительными сроками строительства предприятий и освоения их мощностей, что обусловлено в основном значительным материальным потоком в производстве (около 13 т на 1 т глинозема), сложным аппаратурным оформлением процесса, необходимостью создания крупных объектов инфраструктуры;

3) повышенными расходами сырья, топлива, электроэнергии;

4) значительными объемами производства попутной продукции, в первую очередь белитового шлама, утилизация которого в некоторых районах затруднена (цемент невыгодно транспортировать на расстояние более 700—1000 км).

В результате капитальные вложения на сооружение нефелинового комплекса с годовой производительностью 600 тыс. т глинозема, 650 тыс. т сопродуктов и 4—5 млн. т цемента в 1,5—2 раза превышают затраты на создание аналогичного по мощности специализированного

Таблица 1

Технико-экономические показатели производства глинозема на ППГО, БАЗе и ПАЗе

Показатель	ППГО	БАЗ	ПАЗ
Себестоимость, %	100	174	156
Производительность труда (трудоемкость производства), чел·ч/т	5,0	4,9	6,8
Рентабельность, %	24	16	16
Доля глинозема в общей стоимости товарной продукции, %	38	96	93

производства глинозема из бокситов. Соответственно и приведенные затраты на 1 т глинозема, в том числе удельные капитальные вложения, заметно выше.

В то же время соотношение удельного веса продуктов переработки нефелиновых руд в общей стоимости товарной продукции предприятия (глинозем — 40 %, сода и поташ — химическая продукция — 30 %, цемент — 30 %) указывают на неправомерность квалификации используемого ныне нефелинового сырья как собственно глиноземного, химического или цементного [21]. Отсюда неизбежным следствием организации производства глинозема на базе нефелиновых руд является отвлечение значительной части средств, выделяемых на развитие производства алюминия, для создания мощностей по получению содопродуктов и цемента.

Именно эти обстоятельства в условиях сложившейся отраслевой структуры народного хозяйства и ведомственного принципа финансирования капитального строительства служат основной причиной, препятствующей в последние годы расширению масштабов комплексной переработки нефелинового сырья. Вместе с тем подход к оценке возможности организации производства на базе нефелинового сырья с точки зрения его народнохозяйственной эффективности показывает, что в этом случае может быть достигнута существенная экономия капитальных вложений и эксплуатационных затрат по сравнению с аналогичными суммарными затратами в условиях специализированного производства на базе традиционного сырья и технологии, однако для этого необходимо соблюсти следующие условия:

1) товарная нефелиновая руда по качеству (содержание глинозема $\geq 27\%$, щелочей $\geq 14\%$), запасам и горнотехническим условиям добычи не должна уступать кия-шалтырской;

2) район расположения месторождения должен иметь благоприятные экономико-географические условия, в результате чего при строительстве рудника и перерабатывающего предприятия не потребуются чрезмерно большой объем работ инфраструктурного характера и прежде всего сооружение протяженных железнодорожных линий;

3) должны быть обеспечены условия и возможности сбыта всех получаемых продуктов комплексной переработки.

Следует подчеркнуть, что проведенное во Всесоюзном научно-исследовательском и проектном институте алюминиевой, магниевой и электродной промышленности (ВАМИ) сравнение эффективности производства глинозема из различных видов сырья показало, что сопоставимый с бокситами уровень приведенных затрат на производство 1 т глинозема имеют лишь высококачественные нефелиновые руды или концентраты (см. выше). В то же время проблема увеличения масштабов комплексной переработки нефелинового сырья является общесоюзной в силу наличия его ресурсов в различных районах.

Удельное значение высококачественных нефелиновых руд в сырьевых ресурсах алюминиевой отрасли в нашей стране достаточно велико. В 1950 г. глинозем, получаемый из кольского нефелинового концентрата, составлял ~0,5 % всего производимого в СССР глинозема. В будущем доля нефелиновых руд в его производстве значительно возрастет, что обусловлено рядом факторов:

1) ограниченностью запасов высококачественных бокситов;
2) увеличением спроса на попутно получаемую продукцию (попаш, сода и др.);

3) необходимостью устранения территориальной разобщенности в размещении подотраслей алюминиевой промышленности — сырьевые ресурсы бокситов и глиноземные предприятия, а также потребители алюминия сосредоточены главным образом в европейской части страны, а энергоемкое производство алюминия — в Сибири (Красноярский, Братский, Иркутский, Саянский заводы); это приводит к значительным дополнительным затратам (до 30 руб. на 1 т металла) на транспорт глинозема и готового алюминия;

4) отсутствием промышленных месторождений традиционного глиноземного сырья — высококачественных бокситов — и перспектив их обнаружения в Сибири и на Дальнем Востоке, а также наличием в этих регионах крупнейших проявлений щелочных алюмосиликатных руд;

5) увеличением объема производства апатита на ПО "Апатит" и соответственно нефелинсодержащих отходов (хвостов) апатитовой флотации, которые в большом количестве сбрасываются в отвал;

6) относительной стабильностью качества нефелинового сырья по сравнению с промышленными бокситами.

Поиски, изучение и оценка рудопоявлений нефелиновых пород особенно широко развернулись в 50-х гг. и продолжают до настоящего времени, главным образом в экономически освоенных или осваиваемых (зона влияния БАМа) районах Сибири. На большинстве объектов проведены поисково-оценочные работы, на отдельных — предварительная разведка, а семь месторождений — Кия-Шалтырское в Кемеровской области и шесть апатит-нефелиновых месторождений Хибинской группы — эксплуатируются.

На рис. 1 показано размещение всех месторождений и рудопоявлений СССР, в той или иной степени оцененных как глиноземсодержащее сырье. Краткая их характеристика приведена в табл. 2, в которой известные месторождения и проявления расположены в соответствии с их значимостью или степенью изученности.

Наиболее значительные в СССР запасы промышленных категорий сконцентрированы на Кольском полуострове — Хибинская группа апатит-нефелиновых месторождений (возможности и проблемы расширения сырьевой базы глиноземного производства на основе более полного использования кольского нефелинового концентрата рас-

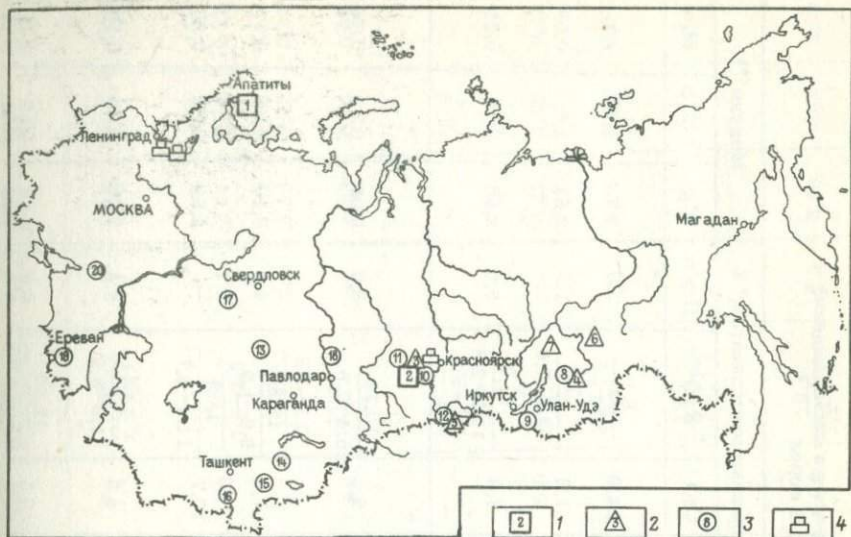


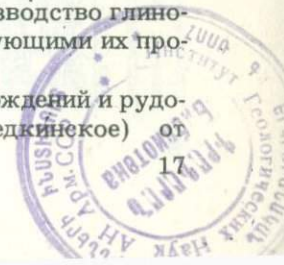
Рис. 1. Размещение эксплуатируемых (1), перспективных (2), технологически оцененных (3) месторождений и рудопроявлений нефелинового сырья СССР и действующих глиноземных комплексов (4):

Месторождения, проявления: 1 — Хибинской группы, 2 — Кия-Шалтырское, 3 — Горячегорское, 4 — Мухальское, 5 — Баянкольское, 6 — Сакунское, 7 — Сын-нырское, 8 — Нижне-Бурульзайское, 9 — Боргойское, 10 — Андриюшкина Речка, Кургусульское, 11 — Тулульской группы: Медведкинское, Тулульское, Петропавловское, 12 — Дахунурское, 13 — Ишимское, 14 — Сандыкское, 15 — Зардалек, 16 — Турпи, 17 — Вишневогорское, 18 — Баянаульское, 19 — Тежсарское, 20 — Октябрьское

смотрены в следующих главах). В той или иной степени изучены многочисленные рудопроявления нефелиновых пород в европейской части страны, Средней Азии, Сибири, представленные низкосортными рудами (III сорт), технико-экономические показатели переработки которых не отвечают существующим требованиям. Они могут рассматриваться как потенциальные сырьевые источники.

К настоящему времени благодаря усилиям геологов, ученых и исследователей ряда организаций Мингео СССР, Минцветмета СССР и АН СССР в районах Сибири с наиболее благоприятными географо-экономическими условиями обнаружены, изучены и в определенной степени оценены крупные проявления щелочных алюмосиликатных руд, на базе которых может развиваться производство глинозема и других продуктов. Факторами, благоприятствующими их промышленному использованию, являются:

1) относительно небольшое удаление ряда месторождений и рудопроявлений (Горячегорское, Баянкольское, Медведкинское) от



4963

Краткая геолого-петрографическая характеристика месторождений и рудопроявлений нефелиновых пород

Массивы, месторождения, рудопроявления	Породы (руды), продукты	Среднее содержание основных компонентов, %						Модули***		
		Al ₂ O ₃	SiO ₂	ΣFe ₂ O ₃	CaO	R ₂ O**	П.п.п.	M _{Si}	M _{R₂O}	M _{Ca}
Хибинские — Куки- вумчорское, Юкс- порское, Расвум- чорское и др. (Мур- манская область) Кия-Шалгырское (Кемеровская об- ласть)	Апатит-нефелиновые породы Концентраты их обо- гащения	13,0	24,0	4,4	24,6	$\frac{8,1}{5,8-3,5}$	5,0	3,2	1,02	1,1
		28,6	44,0	3,5	1,3	$\frac{17,8}{12,8-7,6}$	1,2	2,61	1,0	0,03
	Уртиты, ийолиты	26,7	40,5	5,0	7,9	$\frac{12,9}{11,0-2,8}$	3,2	2,58	0,79	0,21
Тежсарское (Ар- мянская ССР)	Нефелиновые и псевдо- лейцитовые сиениты, пегматиты, гидротер- мально измененные породы	21,0	55,0	3,5	2,3	$\frac{10,14}{5,4-7,6}$	3,0	5,00	0,79	0,04
Горячегорское (Красноярский край)	Плагиоклазовые ийולי- ты и уртиты, ювиты	23,7	43,3	7,6	7,6	$\frac{12,3}{9,9-1,9}$	4,0	3,10	0,85	0,17
		25,7	38,7	4,0	10,7	$\frac{13,8}{11,4-3,7}$	—	2,56	0,88	0,30
Мухальское (Бу- рятская АССР)	Уртиты, ийолиты, мельтейтиты									
Баянкольское (Ту- винская АССР)	Полевошпатовые, ур- титы, ювит-уртиты, их шпреуштейнизиро- ванные и карбонатизи- рованные разновидности	26,1	43,1	3,3	4,6	$\frac{14,4}{11,0-5,2}$	5,4	2,81	0,90	0,10
Сыннырское (Бу- рятская АССР)	Псевдолейцитовые си- ениты	22,7	54,4	1,5	0,5	$\frac{12,80}{0,9-18,00}$	0,5	4,04	0,52	0,01

Сакунское (Чи- тинская область)	То же	20,7	56,8	1,95	1,0	$\frac{12,3}{0,8-17,4}$	1,6	4,66	0,97	0,02
Медведкинское (Ке- меровская область)	Ийолиты, ийолит-урти- ты, полевошпатовые, гранатсодержащие ийо- лит-уртиты	22,4	43,6	7,8	7,4	$\frac{8,48}{6,7-2,7}$	4,7	3,32	0,61	0,18
Андрюшкина Речка (Красноярский край)	Берештиты	22,8	45,8	8,3	4,9	$\frac{9,12}{7,6-2,3}$	5,1	3,41	0,66	0,11
	Тералито-сиениты, юви- ты, фойяиты	25,3	46,6	5,7	4,7	$\frac{11,22}{9,7-2,3}$	3,8	3,13	0,73	0,11
Ишимский — участки Кубасадыр, Таску- дук (Казахская ССР)	Нефелиновые, либенера- товые, эпидейцитовые сиениты	21,3	53,0	3,2	3,0	$\frac{11,0}{-}$	—	4,23	0,85	0,06
	Фойяиты, мариуполиты, микроклин-нефелино- вые пегматиты	22,4	56,4	3,5	—	$\frac{9,8}{7,8-3,2}$	—	4,25	0,72	—
Покрово-Киреевс- кое (Украинская ССР)	Эгириновые ма- линьиты	18,3	46,4	9,6	5,0	$\frac{12,0}{-}$	—	4,31	1,07	0,11
Боргойское (Бу- рятская АССР)	Лепидомелан-эгирино- вые сиениты, их пегмато- идные разности	19,3	56,6	6,7	1,9	$\frac{9,7}{-}$	—	4,98	0,82	0,04
Сандыкский — участки Кумбель, Чечекты, Сандык- тыксу (Киргиз- ская ССР)	Нефелиновые (фойяиты) и псевдолейцитовые сиениты	20,1	56,5	3,6	—	$\frac{13,7}{2,4-11,3}$	—	4,76	0,80	—
	Нефелиновые сиениты: со- далитовые, нефелин-сода- литовые, канкринитовые	22,5	51,1		4,3	$\frac{12,1}{7,2-7,4}$	2,5	3,86	0,88	0,09

Массивы, месторождения, рудопоявления	Породы (руды), продукты	Среднее содержание основных компонентов, %						Модули***		
		Al ₂ O ₃	SiO ₂	ΣFe ₂ O ₃	CaO	R ₂ O**	П. п. п.	M _{Si}	M _{R₂O}	M _{Ca}
Баян-Акульское (Казахская ССР)	Содалит-нефелиновые сиениты	23,5	56,5	7,1	3,4	$\frac{7,3}{-}$	2,2	4,09	0,51	0,06
Ильменское и Вишневогорское — участки Успенский, Потанинский (Урал)	Миаскиты, нефелинолиты	21,6	56,4	4,2	1,2	$\frac{12,1}{7,9-6,3}$	—	4,44	0,92	0,023
		26,2	2	5,4	1,8	$\frac{14,4}{11,4-4,6}$	—	3,37	0,90	0,037
Кургусульское (Красноярский край)	Ювиты	22,0	49,8	7,4	4,5	$\frac{11,9}{-}$	—	3,85	0,89	0,1
Среднетатарское (Красноярский край)	Нефелиновые сиениты	24,3	56,4	3,1	2,0	$\frac{13,1}{-}$	0,9	3,95	0,88	0,04
Турпи (Таджикская ССР)	Биотитовые нефелиновые сиениты (фойяиты)	22,8	51,0	6,6	2,4	$\frac{11,8}{-}$	2,5	3,80	0,79	0,05

* По данным геологоразведочных организаций. ** Здесь и далее в таблицах — в числителе указаны суммарные содержания щелочей R₂O (Na₂O + K₂O); содержание K₂O пересчитано на Na₂O, в знаменателе — содержания соответственно Na₂O и K₂O. *** Модули: M_{Si} — кремниевый (молярное отношение SiO₂/Al₂O₃), M_{R₂O} — щелочной (молярное отношение R₂O/Al₂O₃), M_{Ca} — кальциевый (молярное отношение CaO/SiO₂).

действующих глиноземных (АГК) и алюминиевых (Красноярский, Саянский и др.) заводов;

2) размещение объектов в пределах районов, тяготеющих к крупным перспективным территориально-промышленным комплексам (Мухальское, Сыннырское и Сакунское месторождения).

Необходимо отметить, что возможность вовлечения ряда выявленных месторождений в сферу промышленной оценки обусловлена и современным уровнем развития техники и технологии их обогащения (см. гл. 3).

В настоящее время в районах Сибири запасы нефелиновых руд промышленных категорий составляют почти 20 % общесоюзных запасов (Кия-Шалтырское и Горячегорское месторождения). Наибольший интерес в качестве перспективных сырьевых источников для развития производства глинозема в Сибири представляют Мухальское, Сыннырское, Сакунское и Баянкольское месторождения щелочного алюмосиликатного сырья.

По вещественному составу, особенностям технологии переработки, набору получаемых продуктов и другим факторам руды указанных месторождений могут быть подразделены на два типа. Первый — руды, аналогичные кольскому нефелиновому концентрату и кия-шалтырским уртам (Мухальское и Баянкольское месторождения, а также проявления Кузнецкого Алатау). Как уже указывалось, переработка сырья этого типа освоена на предприятиях Минцветмета СССР (ППГО, ВАЗ, АГК). По ассортименту и соотношению товарной продукции (см. ранее) сырье данного типа должно быть квалифицировано как глиноземно-химическое.

Второй тип — новый вид щелочного алюмосиликатного сырья — так называемые псевдолейцитовые (нефелин представлен калиевым аналогом — кальсилитом, образующим сростания с калиевым полевым шпатом) породы Сыннырского и Сакунского месторождений с уникальным содержанием K_2O (17–18 % против 2–7 % в первом типе руд). Последнее обуславливает преобладающий удельный вес калийных соединений в стоимости товарной продукции при комплексной переработке этих руд — 40–60 %, тогда как на долю глинозема приходится 18–30 %. Подобные руды следует рассматривать как агрохимическое сырье.

Наиболее изученным из перечисленных объектов является Мухальское месторождение.

Следует подчеркнуть, что сырьевые ресурсы нефелиновых руд СССР исключительно велики. Все запланированные мощности предприятий европейской части страны обеспечены высококачественным нефелиновым сырьем. Запасы руд в экономически освоенных и осваиваемых районах Сибири значительны. Однако до настоящего времени не обнаружено месторождений, аналогичных Кия-Шалтырскому. Породы большинства перспективных проявлений Сибири требуют

предварительного обогащения. Поэтому необходимость и целесообразность освоения сырьевых ресурсов в силу их комплексного характера определяются в каждом конкретном случае и в основном географо-экономическими условиями, потребностями региона в тех или иных видах продукции, особенностями конъюнктуры последней. В то же время существенным фактором повышения эффективности использования нефелинового сырья является решение задачи совершенствования технологии его обогащения и переработки.

Далее приведена краткая географо-экономическая и геологическая характеристика эксплуатируемых и находящихся на балансе запасов месторождений, а также наиболее перспективных рудопроявлений Сибири.

Эксплуатируемые месторождения

Месторождения Хибинской группы связаны с крупнейшим в мире (площадь около 1300 км²) Хибинским щелочным массивом (рис. 2), расположенным в центральной части Кольского полуострова на территории Мурманской области.

Массив залегает в зоне контакта гнейсов архея и осадочно-вулкано-генных пород протерозоя, имеет в плане овальную форму протяженностью в широтном направлении около 44 км и в меридиональном около 35 км, характеризуется сложным концентрически-зональным строением. В его пределах выделяется ряд кольцевых дугообразных зон, сложенных несколькими разновидностями нефелиновых сиенитов и ийолит-уртитовыми породами с залежами апатит-нефелиновых руд. Ийолит-уртитовая зона, площадь которой составляет около 6 % общей площади массива, прослеживается в виде узкой прерывистой дугообразной полосы протяженностью около 75 км при максимальной мощности до 1,5 км (в южной и юго-западной частях массива). Она падает к центру интрузива под углом от 20 до 60°. Пластообразные залежи апатит-нефелиновых пород тяготеют к висячему боку ийолит-уртитовой зоны, располагаются вблизи ее контакта с рисчорритами и прослеживаются по простиранию приблизительно на 18 км и на глубину более 2 км.

В настоящее время в пределах массива разведано девять месторождений апатит-нефелиновых руд, шесть из которых разрабатываются ПО "Апатит". Добываемые руды представлены различными текстурными разновидностями, заметно отличающимися по содержанию (в %) апатита (25—75), нефелина (21—46), эгирина (5—17), сфена (0—10), полевых шпатов (1—10), титаномагнетита (0—2), лепидомелана. Повышенное количество в рудах некоторых минералов — полевого шпата, сфена, лепидомелана — отрицательно сказывается на их обогатимости и качестве получаемых концентратов.

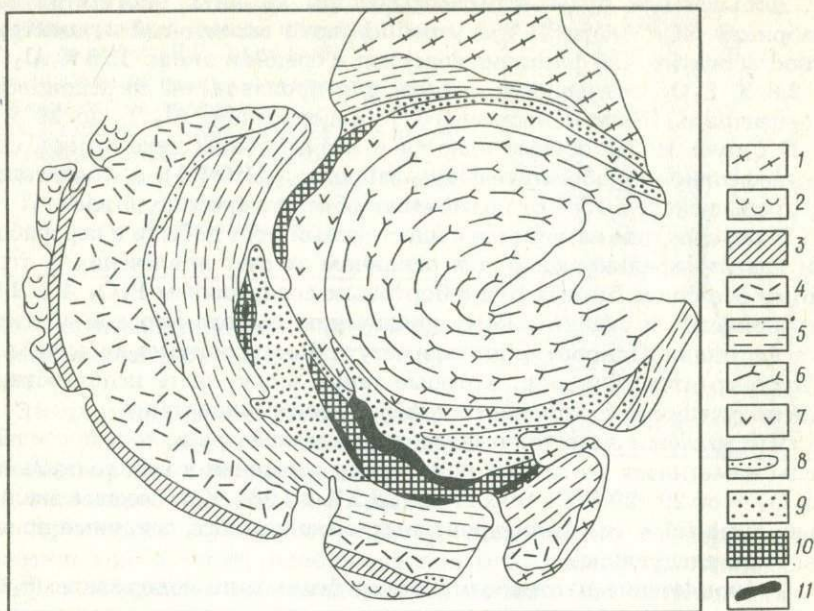


Рис. 2. Схема геологического строения Хибинского массива. По Е.Н. Володину и Н.А. Елисееву.

1-3 — вмещающие породы: 1 — гранитогнейсы, 2 — вулканогенно-осадочные породы, 3 — роговики; 4-5 — хибиниты: 4 — зернистые, 5 — трахитоидные; 6-7 — фойяиты: 6 — трахитоидные, 7 — зернистые; 8 — щелочные нефелинсодержащие сиениты; 9 — рискорриты; 10 — ийолит-уртиты; 11 — апатит-нефелиновые породы

Наряду со свежими, слабо измененными рудами, отмечаются и так называемые окисленные — интенсивно измененные разновидности, в которых нефелин, а нередко и цветные минералы замещены вторичными образованиями (в основном в виде шпреуштейна и гидроксидов железа). Они отличаются пониженным содержанием щелочей и худшей обогатимостью. Химический состав руд различных месторождений заметно варьирует; содержания основных компонентов следующие (в %): Al_2O_3 12,3—14,2; TiO_2 1,6—3; P_2O_5 14,2—18,4, причем с ростом объемов добычи и вовлечением в отработку новых месторождений количество P_2O_5 в рудах заметно снижается. Так, руды планируемого к отработке месторождения Партомчорр-Лявой-окк характеризуются весьма низким содержанием P_2O_5 (около 8%) при несколько повышенном содержании Al_2O_3 (около 15,4%). В состав товарной руды входит и некоторое количество разубоживающих ийолит-уртитовых пород и рискорритов, причем доля их увеличивается по мере снижения бортовых содержаний P_2O_5 .

Добываемые руды перерабатываются на двух обогатительных фабриках ПО "Апатит"; при этом получают апатитовый концентрат. Хвосты апатитовой флотации содержат в среднем около 22,5 % Al_2O_3 и 2,8 % P_2O_5 и являются сырьем для производства нефелинового концентрата. Выпуск последнего (с содержанием Al_2O_3 до 29 % и R_2O около 18 %) осуществляется в нефелиновом цехе первой апатит-нефелиновой обогатительной фабрики (АНОФ-1) в количестве, не превышающем 15 % от возможных объемов производства.

В перспективе намечается существенный рост добычи и переработки апатит-нефелиновых руд в основном за счет вовлечения в отработку все более бедных руд с бортовым содержанием P_2O_5 4 и 2 %, что приведет к значительному увеличению выхода хвостов апатитовой флотации. Одновременно возрастут объемы попутно добываемых ийолит-уртитовых пород, которые также могут быть использованы для получения кондиционного нефелинового концентрата.

Что касается качества нефелинового концентрата, то в последние годы наметилась тенденция некоторого снижения в нем содержания Al_2O_3 — от 29—29,5 % в 60-х гг. до 28,2 % в 1984. Как показал анализ, выполненный в специализированных организациях, основные причины этого следующие:

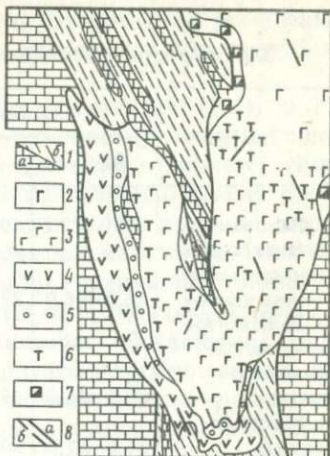
- 1) вовлечение в отработку более бедных по содержанию P_2O_5 и более сложных по минеральному составу руд, что вызвало увеличение содержания полевого шпата в хвостах апатитовой флотации;
- 2) перегрузка (почти в 2 раза по сравнению с проектом) производственных мощностей нефелинового цеха АНОФ-1, технологические резервы которого для получения качественного нефелинового концентрата исчерпаны, а возможности расширения и реконструкции отсутствуют.

Неблагоприятное влияние указанных факторов может быть успешно преодолено путем совершенствования технологии обогащения хвостов: доизмельчения исходного продукта, применения магнитной и пенной сепарации и др. Однако эти мероприятия могут быть реализованы только в условиях строительства новой нефелиновой фабрики или использования по прямому назначению ранее введенных мощностей фабрики в составе АНОФ-2.

Наряду с апатит-нефелиновыми месторождениями Хибинской группы весьма значительны масштабы попутной добычи нефелиновых пород (прежде всего уртитов) и на эксплуатируемых редкометалльных месторождениях соседнего с Хибинским Ловозерского массива. При обогащении руд этих месторождений также возможно попутное получение значительных количеств нефелинового концентрата, однако по качеству последний будет несколько уступать производимому ПО "Апатит". В ближайшей перспективе использование ресурсов нефелинового сырья Ловозерского массива не представляется возможным в связи с ограниченными потребностями глинозем-

Рис. 3. Схема геологического строения Кия-Шалтырского массива. По А.М. Прусевичу и Е.Д. Андреевой:

1 — вмещающие породы: а — известняки, б — плагиоклазовые порфириды; 2—3 — субщелочное габбро: 2 — трахитоидное, 3 — неравномернозернистое; 4 — уртиты; 5 — плагиоклазовые уртиты; 6 — тералиты; 7 — ийолит-уртиты; 8 — дайки: а — фойайтов, б — ийолитов



ной промышленности, полностью удовлетворяемыми за счет ПО "Апатит".

Эксплуатируемое с 1970 г. Ачинским глиноземным комбинатом Кия-Шалтырское месторождение уртитов, являющееся богатейшим в щелочной провинции Кузнецкого Алатау, расположено на территории Кемеровской области, приблизительно в 270 км от г. Ачинска, с которым соединено железнодорожной веткой. Оно связано с одноименным щелочным массивом (площадью 2,1 км²), залегающим в зоне контакта карбонатной и эффузивно-осадочной толщи кембрия и характеризующимся сложной подковообразной формой (рис. 3). Большая часть массива (~ 75 % объема) сложена габброидами, вдоль контакта которых с вмещающими породами локализовано крупное (площадь около 0,3 км²) тело уртитов (собственно Кия-Шалтырское месторождение) и мелкие тела ийолит-уртитов, окаймляющие в западной и южной частях массива габброиды в виде прерывистого полукольца. Основное тело уртитов (длина около 2,3 км при ширине от 20 до 230 м), тяготеющее к западной части массива, имеет линейно вытянутую (в северо-западном направлении) форму и крутопадающие, согласные с залеганием вмещающих пород контакты. С глубиной оно постепенно выклинивается. В габброидах вдоль контакта с уртитамы отмечается нефелинизация, в известняках — скарнирование. Непосредственно в уртитях, в зоне восточного контакта с габброидами, наблюдается увеличение содержания цветных минералов — вплоть до перехода в ийолит-уртиты и ийолиты, а вблизи контакта с известняками — обогащение кальцитом с образованием зоны ийолит-уртитов.

К настоящему времени рудное тело полностью вскрыто и вовлечено в отработку. При этом установлены более сложное (по сравнению с данными разведки) геологическое строение, повышенная (~ 7 %) удельная роль даек в объеме рудного тела и большая степень изменения руд. Это осложняет отработку месторождения, обуслови-

Таблица 3

Характеристика основных типов руд Кия-Шалтырского месторождения

Тип руд	Содержание основных компонентов, %					Распространенность, %
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	R ₂ O	
1. Рядовые	27,0—27,5	40,0—40,6	4,5—5,0	7,0—7,5	13,0—13,5	40
2. Низкоглиноземистые высокожелезистые	25,0—26,0	39,5—41,5	5,5—6,5	7,5—8,0	12,5—13,5	30
3. Высокоглиноземистые маложелезистые	27,5—28,0	40,5—41,0	3,8—4,0	6,0—7,0	13,5—14,0	20
4. Низкощелочные	26,6—27,0	40,0—41,0	4,5—4,6	6,5—7,6	8—10	10

вает увеличение потерь и разубоживания при добыче и соответственно понижение (приблизительно на 0,8 %) содержания глинозема в товарной руде по сравнению с проектными данными. Указанные обстоятельства в перспективе могут уменьшить и срок обеспеченности предприятия балансовыми запасами руд.

В целом уртиты характеризуются довольно выдержанным составом (75—90 % нефелина, 10—25 % титан-авгита) и являются высококачественной нефелиновой рудой (см. табл. 2). Изменение их вещественного состава связано в основном с упомянутыми контактово-метасоматическими преобразованиями и наложенными вторичными процессами. Ийолит-уртиты из приконтактовых зон отличаются от рядовых руд пониженным содержанием Al₂O₃ и повышенным Fe₂O₃. В процессе эксплуатации геологами рудника выделено несколько типов руд (вместо одного по данным разведки), отличающихся по химическому составу (табл. 3), что играет весьма существенную роль при организации и проведении добычных работ.

Максимальная изменчивость качества руд наблюдается вкрест простирания рудного тела и связана с развитием вдоль его контактов руд второго типа (с повышенным количеством Fe₂O₃ и CaO и пониженным Al₂O₃). Кроме этого, пониженные содержания глинозема свойственны рудам северо-западного и юго-восточного флангов, где широким развитием пользуются дайки.

Низкощелочные руды (четвертый тип) отмечаются в различных частях месторождения; их размещение контролируется тектоническими зонами мощностью от десятков сантиметров до 60 м; максимальным распространением подобные руды пользуются на южном фланге рудного тела. Наряду с пониженным содержанием Na₂O 26

(неблагоприятно влияющим на показатели переработки) измененные руды также легко переизмельчаются и смерзаются, что затрудняет усреднение качества товарной руды.

Наряду с тенденцией к уменьшению содержаний Al_2O_3 с 27,3 до 26 % и R_2O с 13,5 до 12 % при одновременном увеличении содержаний CaO , MgO и Fe_2O_3 в течение последних лет отмечается увеличение содержания в рудах сульфидов и соответственно вредного компонента — серы (до 0,15 %). Следует отметить, что проводящиеся в настоящее время мероприятия по поддержанию качества добываемой руды (селекция, разубоживание пород и др.) позволяют только частично решить указанную проблему; одним из путей преодоления сложившегося положения является организация обогащения руды.

Опыты по обогащению рядовых и низкокачественных руд, проведенные институтом "Механобр" с использованием мокрой магнитной сепарации и флотации, дали хорошие результаты и показали возможность получения нефелинового концентрата с содержанием Al_2O_3 до 31 % при выходе его около 70 % (с одновременным существенным снижением содержания серы). По данным ВАМИ, такие концентраты могут перерабатываться с лучшими по сравнению с необогащенной рудой (приблизительно на 3—4 %) показателями извлечения глинозема и щелочей, что дает существенный экономический эффект.

Применение обогащения может также во многом решить проблему стабилизации качества сырья, поступающего на переработку, увеличить производительность предприятия при тех же производственных мощностях, более полно использовать запасы.

Следует учесть, что для реализации обогащения кия-шалтырской руды потребуются предварительно провести дополнительные исследования, опытно-заводскую проверку, решить вопрос об использовании хвостов обогащения и др. Необходимость выделения дополнительных капиталовложений также является серьезным препятствием на пути решения рассматриваемой проблемы. В то же время важность и насущность этого решения несомненна, поскольку наряду с повышением технико-экономических показателей работы АГК позволит продлить жизнь уникального для данного региона месторождения.

Месторождения и рудопроявления Кузнецкого Алатау

Несмотря на наличие в пределах Кузнецкого Алатау значительно числа (около 100) месторождений и рудопроявлений нефелиновых руд, только отдельные из них, расположенные в благоприятных транспортно-экономических условиях и обладающие достаточными запасами качественного сырья, могут представить практический интерес в качестве возможной резервной базы АГК. Вместе с тем не-

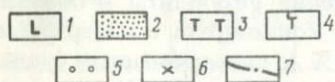
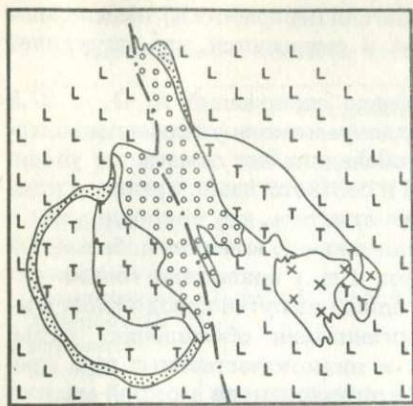


Рис. 4. Схема геологического строения Горячегогорского массива. По Е.Д. Андреевой и В.Г. Михалеву:
1 — порфиры вмещающей толщи; 2 — лейкотералиты; 3 — плагиоклазовые ийолиты; 4 — плагиоклазовые ийолит-уртиты; 5 — ювиты; 6 — нефелиновые сиениты; 7 — разлом

нефелиновые породы даже этих объектов существенно уступают по качеству уртитам Кия-Шалтырского месторождения и требуют обязательного предварительного обогащения, причем получаемые концентраты по составу в большинстве

случаев лишь близки к необогащенной кия-шалтырской руде.

Степень изученности этих объектов различна. Наряду с разведанным Горячегогорским месторождением с балансовыми запасами руд и рудопроявлениями Андрюшкина Речка и Кургусульское, числящимися на балансе в качестве не намечаемых к освоению, известен ряд проявлений, на которых только завершены поисково-оценочные работы (Медведкинское и др.). В течение ряда последних лет проведено геолого-технологическое изучение наиболее перспективных проявлений и выполнены предварительные технико-экономические расчеты использования этих руд в условиях АГК.

Горячегогорское месторождение, изучавшееся как основная сырьевая база АГК еще до открытия Кия-Шалтырского месторождения, расположено в южной части Красноярского края, в 60 км к северо-востоку от Кия-Шалтырского рудника. На месторождении проведена детальная разведка и в 1952 г. утверждены запасы руд промышленных категорий, пересчитанные в 1968 г. Однако по современным требованиям степень изученности месторождения отвечает только стадии предварительной разведки.

Месторождение связано с одноименным щелочным массивом (рис. 4), залегающим среди пород эффузивной толщи нижнего девона. Массив представляет собой штокообразное тело изометричной формы (площадь 1,6x1,7 км) с крутопадающими, близкими к вертикальным, контактами. Нижняя граница массива не установлена, поскольку наиболее глубокие скважины не вышли из нефелиновых пород. Массив имеет сложное зональное строение и образован комплексом пород, относящихся к группе как щелочных габброидов, так и нефелиновых сиенитов. В западной, юго-западной и южной частях

массива развиты тералиты, плагиоклазовые ийолиты и ийолит-уртиты, а в восточной — ювиты и нефелиновые сиениты*. Породы массива секутся множеством даек габброидного и нефелин-сиенитового состава; мощность их до 20 м, протяженность до 500 м. Удельная доля даек в объеме балансовых запасов руд составляет около 3,5 % (преобладают дайки порфиринов, тералитовых порфиринов и нефелиновых сиенит-порфиринов). Все разновидности нефелинсодержащих пород массива, включая дайковые, в значительной степени изменены в результате воздействия постмагматических процессов.

В качестве нефелинового сырья рассматривались плагиоклазовые ийолиты, ийолит-уртиты, ювиты (табл. 4), выделенные в качестве самостоятельных типов руд. Вместе с тем они достаточно близки по содержанию Al_2O_3 и Fe_2O_3 , несколько различаясь по содержанию щелочей (9,5—11,5 % R_2O), а ювиты, кроме того, и по содержанию кремнезема (~46 %). Значительное содержание цветных минералов (и соответственно Fe_2O_3) обуславливает возможность их переработки по промышленно освоенной схеме спекания только после предварительного обогащения.

Разновидности горячегорских руд отличаются как по количественному соотношению основных минералов (содержания нефелина изменяются от 18 до 26 %, вторичных минералов от 20 до 50 %, цветных от 25 до 30 %, полевых шпатов от 8 до 28 %), так и по их составу. Наиболее существенно варьирует состав плагиоклаза — от лабрадора в плагиоклазовых ийолитах до альбита в ювитах — и пироксена — соответственно от фассаита до салита. В составе ювитов, в отличие от двух других разновидностей, заметную роль играет калиевый полевой шпат.

Изучение обогатимости руд Горячегорского месторождения проводилось в лабораторных и опытно-заводских условиях (завод "Сибэлектросталь" и в последние годы — институт "Механобр") по схемам мокрой и сухой магнитной сепарации, флотации, а также комбинированной (магнитно-флотационной) схеме. Установлена предпочтительность использования магнитной сепарации, позволяющей получать концентраты практически с такими же, как и при применении других схем, содержаниями глинозема и щелочей при большем содержании CaO и меньшем SiO_2 .

Достигается также большой выход концентрата при меньших затратах на обогащение и появляется возможность попутного получения магнетитового продукта.

Наиболее высококачественный концентрат (при максимальном

* В основу петрографической типизации нефелиновых пород положена классификация Н.А. Елисеева.

Таблица 4

Характеристика месторождений и рудопроявлений Кузнецкого Алатау

Месторождение, рудопроявление	Руда, продукт	Выход концентрата, %	Содержание основных компонентов, %					
			Al ₂ O ₃	SiO ₂	R ₂ O*	CaO	Fe ₂ O ₃	П. п. п.
Кия-Шалтырское	Уртиты	—	26,7	40,2	$\frac{12,9}{11,0-2,8}$	7,9	4,5	4,3
	Нефелиновый концентрат	75	30,0	39,3	$\frac{14,6}{12,5-3,2}$	6,9	1,6	4,8
Горячегорское	Плагиоклазовые ийолиты, ийолит-уртиты	—	22,0	43,0	$\frac{9,8}{8,7-1,7}$	6,9	9,3	4,0
	Нефелиновый концентрат	61	27,0	45,5	$\frac{11,5}{10,0-2,3}$	5,4	1,9	6,0
Медведкинское	Плагиоклазовые ийолиты	—	20,8	43,0	$\frac{7,9}{6,3-2,4}$	8,8	9,6	4,3
	Нефелиновый концентрат	57	25,8	45,3	$\frac{10,5}{8,7-2,7}$	7,0	2,4	5,4
Андрюшкина Речка	Берешиты	—	22,8	45,8	$\frac{9,1}{7,6-2,3}$	4,9	8,3	5,1
	Нефелиновый концентрат	66	26,9	46,4	$\frac{10,3}{8,1-3,3}$	3,2	4,0	6,0
Кургусульское	Ювиты	—	22,0	49,8	$\frac{11,9}{—}$	4,5	7,4	—

* См. табл. 2.

его выходе), полученный при обогащении плагиоклазовых ийолит-уртитов, по содержанию Al_2O_3 и Na_2O близок к необогащенной кия-шалтырской руде, но уступает ей по содержанию K_2O , CaO и отличается заметно повышенным (на 3,5 %) содержанием SiO_2 . В связи с этим переработка даже этого концентрата в условиях АГК будет характеризоваться заметно худшими технико-экономическими показателями по сравнению с уртитам Кия-Шалтырского месторождения (снижение производительности предприятия, увеличение себестоимости продукции и др.).

Разведанные в настоящее время запасы Горячегорского месторождения могут обеспечить потребности АГК на продолжительный срок. Промышленное освоение месторождения возможно только после проведения детальной разведки с учетом современных требований; в ходе последней следует обратить внимание на возможность максимального прироста запасов плагиоклазовых ийолит-уртитов, которым свойственны лучшие показатели промышленного использования.

Рудопроявление Андрюшкина Речка находится на территории Красноярского края, в 15 км к югу от железнодорожной станции Базыр и Горячегорского месторождения. Оно связано с вулканогенной толщей нижнего — среднего девона, в зоне флексурного перегиба которой, осложненной разрывными нарушениями, отмечается серия сложных пластообразных и линзовидных тел нефелиновых порфиров, получивших название берешитов (по названию реки в районе месторождения). Выходы берешитов прослежены в меридиональной полосе длиной около 10 км и шириной 300—1200 м. Наиболее крупные рудные тела, заключающие основную часть прогнозных ресурсов рудопроявления, имеют пологое ($10-30^\circ$) падение, мощность около 80 и 90—100 м, размеры в плане 300×3700 и $(100-550) \times 2000$ м.

В составе рудных тел выделяются две разновидности берешитов: каменистые (около 60 %) и разрушенные (выветрелые). Вторая разновидность помимо физических свойств отличается повышенным содержанием Al_2O_3 (до 27 % в отдельных пробах) и Fe_2O_3 (до 12 %) при меньшей концентрации щелочей (Na_2O 2—4,5 %, K_2O 1,5—2,7 %). Состав берешитов относительно стабилен (см. табл. 2) и близок к таковому пород Горячегорского месторождения; приблизительно на 40 % берешиты сложены крупными порфировыми выделениями интенсивно измененного нефелина, редко — плагиоклаза и эгирин-авгита, основная мелкозернистая масса представлена теми же минералами. В целом в составе пород резко преобладают вторичные (по нефелину) минералы (~56—67 %). Существенную роль играют также плагиоклаз (10—20 %), цветные — пироксен, роговая обманка, хлорит и другие (11—18 %) и рудные (6—7 %) минералы.

В связи с высоким содержанием оксидов железа берешиты требуют предварительного обогащения, причем эффективно обогащаются по комбинированной магнитно-флотационной схеме только каменистые разности. В результате их переработки получают концентрат с содержанием (в %): $\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 28$; $\text{Na}_2\text{O} - 7,6$; $\text{K}_2\text{O} - 3,6$; $\text{SiO}_2 - 46,5$; $\text{CaO} - 2,7$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 3,5$; выход концентрата около 60 %. Несмотря на достаточно высокое содержание Al_2O_3 и K_2O , концентраты из пород этого рудопроявления заметно уступают горячегорским по содержанию Na_2O , величине щелочного модуля и показателям извлечения глинозема и щелочей (в среднем на 2 %). Учитывая изложенное, а также худшие транспортно-экономические условия, сделано заключение, что рудопроявление Андрюшкина Речка по показателям промышленного использования уступает Горячегорскому месторождению.

Кургусульское рудопроявление находится на территории Красноярского края, в 20 км юго-западнее Горячегорского месторождения и в 30 км северо-восточнее Кия-Шалтырского рудника. Оно связано с одноименным щелочным массивом (площадь около $0,7 \text{ км}^2$), имеющим несколько вытянутую в северо-западном направлении форму, крутопадающие контакты и залегающим среди мраморов кембрия. Массив сложен преимущественно ювитами и нефелиновыми сиенитами, в северо-западной части развиты тералит-эссекситы и другие габброиды, занимающие около 25 % его площади. Нефелиновые породы центральной части массива, оценивавшиеся как нефелиновое сырье, несколько отличаются по составу от типичных сиенитов меньшим содержанием кремнезема ($\sim 49,8 \%$) и сложены нефелином (40–60 %), олигоклазом (15–20 %), калиевым полевым шпатом (15–20 %) и цветными минералами — пироксеном, амфиболом (15–20 %). Вторичные изменения пород проявлены слабо — интенсивность развития даек незначительная.

По содержанию глинозема (22,3 %) руды Кургусульского рудопроявления близки к горячегорским, но отличаются от последних несколько меньшим содержанием Fe_2O_3 (7,1 %), которое тем не менее превышает предельное для промышленной технологии спекания. Вместе с тем обогащение нефелиновых сиенитов, подобных кургусульским, приводит к резкому повышению содержания кремнезема в концентрате и поэтому является малоэффективным. Таким образом, нефелиновые породы Кургусульского рудопроявления существенно уступают горячегорским и не представляют в обозримой перспективе промышленного интереса, несмотря на значительные прогнозные ресурсы.

Из всех изученных в последние годы рудопроявлений Кузнецкого Алатау заслуживает внимания Медведкинское, расположенное в пределах Кемеровской области примерно в 45 км северо-западнее

Кия-Шалтырского рудника на удалении около 10 км от железнодо-
рожной станции Полуторник. Рудопоявление приурочено к северной
части крупного Ударнинского габбро-сиенитового плутона площадью
(5—10) x 35 км. Нередко оно объединяется вместе с размещающимися
поблизости Тулуяльским и Веселинским участками развития нефе-
линовых пород под названием Тулуяльского рудного поля.

Медведкинское рудопоявление представлено телом нефелинсо-
держащих пород субмеридионального простирания (длина около
2 км, мощность от 20 до 300 м, общая площадь 0,3 км²), залегаю-
щим среди габброидов и сложенным в основном плагиоклазовыми
ийолитами и ийолит-уртитам. На севере оно через зону гибридных
пород связано постепенными переходами с нефелиновыми сиенитами.
В южной части, на контакте габброидов и известняков, полевошпа-
товые ийолиты и ийолит-уртиты сменяются гибридными волласто-
нит-пироксен-нефелиновыми породами. Падение контактов — восточ-
ное, западного — пологое под углом 20—40°, восточного — более кру-
тое — под углом 60—70°. На глубине около 250 м от поверхности
тело выклинивается. В центральной части оно нарушено разломами
северо-северо-западного простирания.

Разведочными работами установлено, что тело имеет сложное ге-
ологическое строение, в его пределах широко развиты дайки, ксено-
литы и зоны интенсивного гидротермального изменения. Последнее
существенно сказывается на качестве руд и их обогатимости. Нефе-
линсодержащие породы характеризуются значительной изменчи-
мостью состава и повышенным содержанием цветных и рудных ми-
нералов, в связи с чем требуется их предварительное обогащение
(см. гл. 4). При обогащении руд данного проявления может быть по-
лучен концентрат с содержанием Al_2O_3 26—28 % и $R_2O \sim 11$ %; по
качеству он близок к горячегорскому. Однако от руд Горячегорско-
го месторождения медведкинские отличаются меньшим выходом
концентрата и значительно меньшими ресурсами.

Перспективные и наиболее изученные месторождения и проявления других районов

В сопредельной с Кузнецким Алатау Алтае-Саянской провинции
наибольший интерес представляет Баянкольское месторождение бо-
гатых нефелиновых руд. Оно расположено в юго-восточной части
Тувинской АССР, в 200 км от г. Кызыла, с которым его соединяют
шоссе и временные автодороги. Месторождение связано с одноимен-
ным щелочным массивом (площадь около 2x12 км), залегающим
среди гранитов и мраморов протерозоя (рис. 5). Массив вытянут в
северо-западном направлении, имеет грубоплитообразную форму,
падает к северо-востоку под углами 40—60°. Долиной р. Баян-Гол

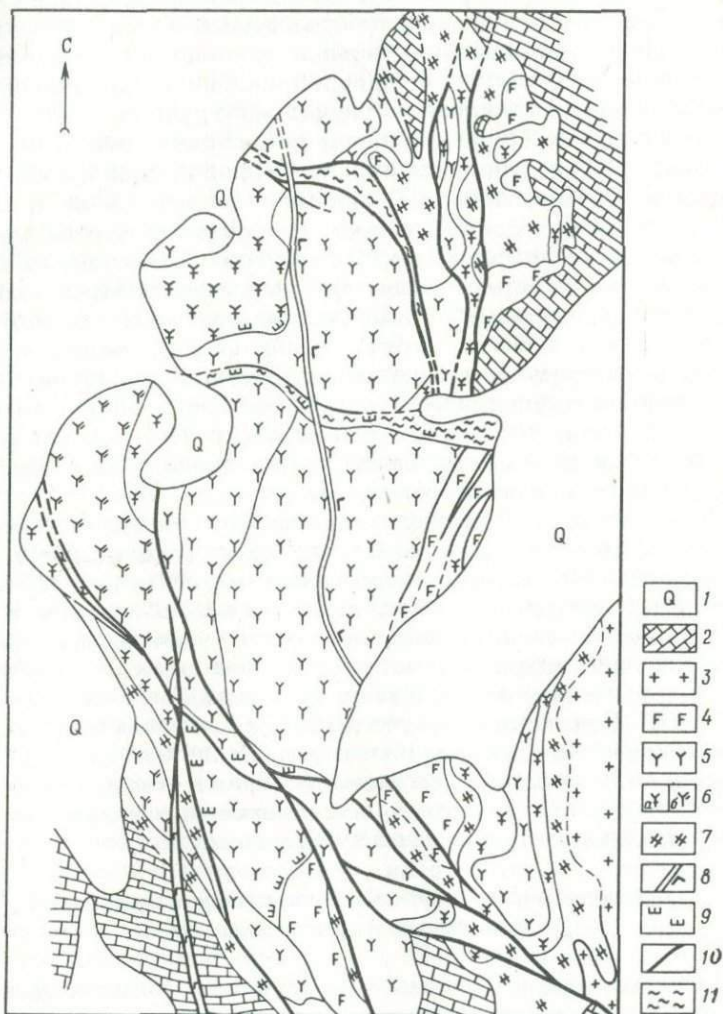


Рис. 5. Схема геологического строения Баянкольского массива. По Л.Л. Донченко:

1 — четвертичные отложения; 2 — известняки; 3 — граниты; 4 — фениты; 5 — полевошпатовые уртиты; 6 — нерасчлененный комплекс: а — ювиты, нефелиновые сиениты, б — ювиты, уртиты; 7 — нефелиновые сиениты; 8 — дайки (габбро, сиениты); 9 — гидротермально измененные породы; 10 — разломы; 11 — зоны милонитизации

он разделяется на две части: северную, сложенную в основном нефелиновыми сиенитами и ювитами, чередующимися в виде субпараллельных "слоев", и южную — собственно Баянкольское месторождение — с преимущественным развитием полевошпатовых уртитов и ювитов и ограниченным — нефелиновых сиенитов.

В пределах южной части массива разведано тело полевошпатовых уртитов эллипсоидной формы длиной около 2 км, шириной 150—1000 м и площадью около 1,3 км², ограниченное с запада и востока ювитами и нефелиновыми сиенитами, местами — фенитами; на севере оно перекрыто ледниковыми отложениями, а на юге контактирует с мраморизованными известняками. Тело имеет пластообразную (линзообразную) форму, падение контактов восточное: всячего — пологое (25—30°), а лежащего, осложненного зонами рассланцевания, катаклаза и гидротермальной переработки, — более крутое (50—60°). Строение его довольно сложное, что обусловлено наличием многочисленных даек различного состава (~4 % от рудной массы) и зон гидротермально измененных пород (~5 % от общей массы). Максимальное развитие наложенных процессов (карбонатизация, канкринитизация, содалитизация, шпреуштейнизация) отмечается на юго-западном и меньшее — на восточном флангах. Продуктивные породы сложены в основном нефелином (47—51 % с уменьшением до 18 % в измененных разностях), вторичными (по нефелину) минералами (канкринит, натролит, анальцит, содалит, либнерит, кальцит), калиево-натриевыми полевыми шпатами (13—25 %, до 50 % и более в нефелиновых сиенитах) и цветными минералами (биотит, редко эгирин-геденбергит — 4—7 %).

В целом для рудного тела характерно постепенное увеличение содержания глинозема и щелочей в рудах по направлению от периферии к центру, что обусловлено его зональным строением. Так, контуры рудного тела по бортовому содержанию Al_2O_3 — 24 % в общем совпадают с границей между ювитами и полевошпатовыми уртитам. Подсчитанные в этом контуре запасы руды оказались весьма значительными. Среднее содержание Al_2O_3 на месторождении — около 27 %, а суммы щелочей — более 16 %.

По содержанию глинозема, щелочей и оксидов железа руды месторождения отвечают требованиям, предъявляемым к нефелиновому сырью I сорта (см. гл. 3); переработка их возможна с применением прогрессивного сухого способа спекания, позволяющего значительно уменьшить затраты топлива. Значительная удельная роль калия в сумме щелочей (~5 %) существенно повышает ценность руд, меньшее (по сравнению с уртитам Кия-Шалтырского месторождения) количество CaO при повышенном содержании SiO_2 (42—45 %) обуславливает необходимость введения в шихту при их переработке большего количества известняка, что увеличивает материальный поток и ухудшает технико-экономические показатели. Тем не менее

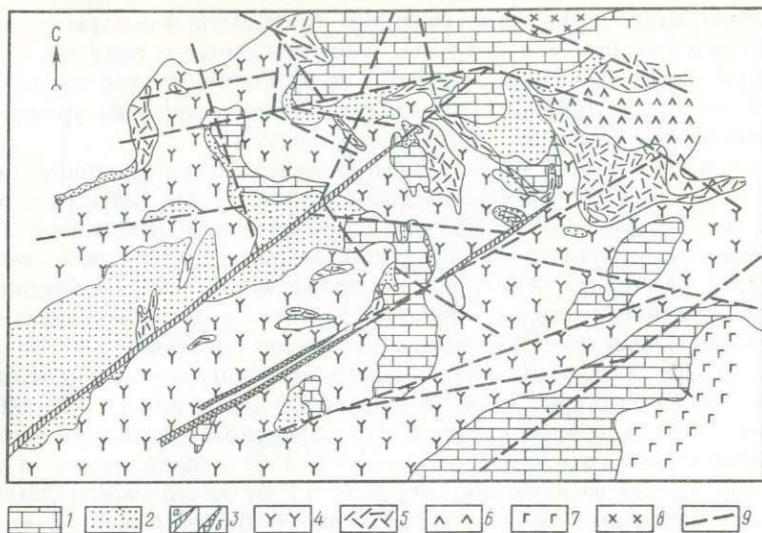


Рис. 6. Схема геологического строения Мухальского массива. По А.В. Ляхнюку и Н.А. Морозову:

1 — известняки; 2 — скарны; 3 — дайки: а — габброидов, б — сиенитов; 4 — уртиты; 5 — ийолиты; 6 — мельтейгиты; 7 — габбродиориты; 8 — диориты — гранодиориты; 9 — разломы

богатые руды месторождения (борт 27 % Al_2O_3) по основным показателям качества практически равноценны кольскому нефелиновому концентрату, уступая последнему только по содержанию K_2O .

По масштабам и качеству сырья Баянкольское месторождение представляет значительный практический интерес прежде всего как потенциальная сырьевая база для обеспечения глиноземом Саянского алюминиевого завода; размещение перерабатывающего комплекса вблизи последнего считается наиболее рациональным (по условиям реализации продукции). Вместе с тем лишь в случае сооружения железной дороги до г. Кызыла показатели промышленного использования руд месторождения могут оказаться сопоставимыми с замыкающими по отрасли.

В районе, сопредельном с Баянкольским месторождением, выявлено еще несколько рудопроявлений нефелинового сырья (Дахунурское, Академическое и др.), однако все они изучены в меньшей степени и уступают описанному месторождению по масштабам.

В Прибайкалье, где известно свыше 50 массивов щелочных пород, наиболее перспективным является Мухальское месторождение, расположенное в центральной части Бурятской АССР, в 220 км северо-западнее г. Читы. Оно связано с одноименным щелочным масси-

вом (рис. 6), залегающим среди карбонатных пород протерозоя и на большей части площади перекрытого мощной (до 300 м) пачкой осадочно-вулканогенных пород неогена. Вскрытая эрозией часть массива вытянута в северо-восточном направлении, имеет размер ~ (200—500)х1300 м. К настоящему времени буровыми работами изучена площадь примерно 3000х2100 м. Эта часть массива сложена преимущественно уртитам и ийолит-уртитам с подчиненным количеством ийолитов и мельтейгит-якупирангитов, которые с востока окаймляются габброидами, с севера — диоритами и гибридными породами граносиенитового состава, а с запада — карбонатными породами. По данным разведочных работ, строение изученной площади массива грубоконцентрическое; в центре его развиты уртиты, обогащенные по периферии ксенолитами известняков и скарнами.

По бортовому содержанию Al_2O_3 19 % оконтурено два рудных тела (Центральное и Южное), имеющих неправильную форму, вытянутых в субширотном направлении и разобщенных полосой известняков и скарнов. Центральное тело уртитов длиной около 2,5 км и шириной 200—600 м окаймляется преимущественно карбонатными породами, а на северном и северо-восточном флангах — ийолитами. Возможно, оно связано с Южным рудным телом. Нижняя граница рудного тела не выявлена, поскольку скважины на глубине 540 м от поверхности не вышли из уртитов.

Границы южного рудного тела окончательно не установлены, так как оно полностью перекрыто чехлом пород неогена мощностью до 250 м. Форма его предположительно эллипсообразная (вытянуто к северо-востоку), длина около 2 км при ширине около 800 м.

Контакты этих рудных тел с вмещающими известняками как четкие, резкие, так и сопровождающиеся зоной скарнов и меланократовых нефелиновых пород. Падение контактов повсеместно крутое.

Рудные тела имеют сложное строение, что обусловлено присутствием многочисленных шпировых обособлений ийолитов (реже мельтейгитов), ксенолитов известняков и скарнов, тектонически нарушенных зон с интенсивным проявлением наложенных процессов (шпреуштейнизация, альбитизация, карбонатизация и др.), даек ийолитов и базальтоидов. В контуре подсчета запасов уртиты составляют около 73 %, ийолиты — 12 %, скарны и известняки — 9 % и дайки 6 %. Нефелинсодержащие породы (за исключением измененных разностей) характеризуются в общем близким набором основных минералов (нефелин, пироксен, реже гастингсит и биотит, гранат, кальцит, канкринит), отличаются в основном их количественными соотношениями.

Для продуктивных пород Мухальского месторождения типичны большая изменчивость минерального состава (на коротких интервалах, часто без видимых закономерностей), повышенное количество

кальциевых минералов (кальцит, канкринит, гранат и др.) и пониженное содержание кремнезема. Пестрота состава мухальских пород обуславливает необходимость их обогащения, что наряду с заметным повышением содержаний Al_2O_3 (с 25 до 28 %) и R_2O (с 12,5 до 14,5 %) позволяет одновременно существенно стабилизировать качество товарного сырья. Работами институтов "Механобр" и ВАМИ показана целесообразность обогащения мухальских руд методом магнитной сепарации, обеспечивающей максимальный (в среднем около 80 %) выход концентрата и сохранение в его составе кальциевых минералов, что позволяет снизить в дальнейшем количество вводимого в шихту известняка. По основной характеристике качества — содержанию глинозема в спеке — концентраты обогащения мухальских руд превосходят сырье эксплуатируемых месторождений.

Благоприятной особенностью является также повышенное содержание в рудах K_2O (в среднем около 4,5 %), что при наличии в сопредельных районах промышленных источников фосфатных концентратов (Ошурковское, Белозиминское месторождения) дает возможность использовать при их переработке модифицированный вариант спекательной технологии с попутным получением остродефицитных калийно-фосфорных удобрений, т. е. существенно повысить технико-экономические показатели промышленного использования сырья.

Все вышесказанное наряду со значительными запасами руд, достаточными для создания крупного промышленного комплекса, и общими перспективами освоения района позволяет считать Мухальское месторождение одним из наиболее перспективных источников комплексного глиноземсодержащего сырья Сибири.

Сынньрское месторождение включает три крупных участка, отвечающих по масштабам самостоятельным месторождениям. Оно расположено на территории Северо-Байкальского района Бурятской АССР северо-западнее железнодорожной станции Новый Уоян. Месторождение связано с крупнейшим (площадь ~ 585 км²) одноименным щелочным массивом (рис. 7), имеющим концентрически зональное строение и сложенным в центральной части и по периферии нефелиновыми сиенитами, между которыми выделяется зона развития высококальциевых псевдолейцит-нефелиновых сиенитов с крупными телами кальсилит-калиево-полевошпатовых пород — сынньритов. Тела последних концентрируются в примыкающей к ядру серповидной (выпуклой к юго-востоку) полосе протяженностью около 22 км при максимальной ширине до 2 км.

На современном эрозионном срезе в пределах указанной полосы выделяются три упомянутых обособленных участка — Калюмный (площадь ~ 12 км²), Трехглавый (4 км²) и Верхне-Ушмунский (2 км²). В пределах наиболее изученного Калюмного участка оконтурена продуктивная зона протяженностью 3,5 км при ширине 180—

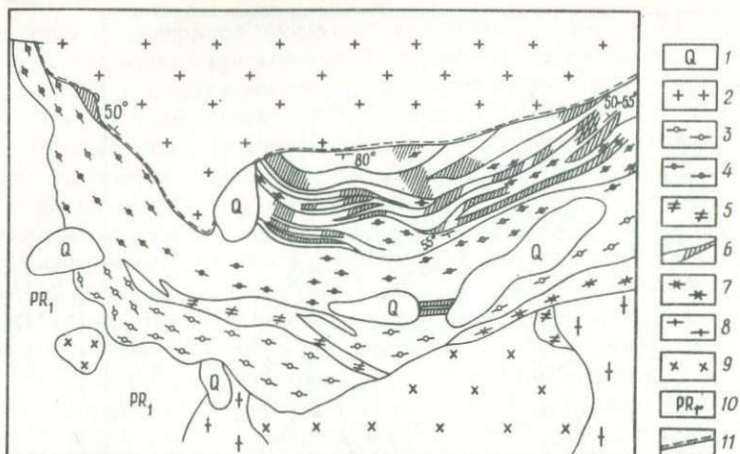


Рис. 8. Схема геологического строения южной части Сакунского массива. По В.К. Голеву:

1 — четвертичные отложения; 2 — граносиениты; 3 — нефелиновые сиениты; 4 — псевдолейцитсодержащие нефелиновые сиениты; 5 — пироксениты; 6 — зона развития ультракальцевых пород; 7 — фениты; 8 — гранитогнейсы; 9 — диориты; 10 — кристаллические сланцы, песчаники, алевролиты; 11 — разломы

нефелиновых руд и концентратов эксплуатируемых и перспективных месторождений меньшим содержанием глинозема (на 5—7 %), суммы щелочей, оксида кальция и значительно бóльшим — кремнезема (см. гл. 5). Это существенно снижает их качество как комплексного глиноземсодержащего сырья, но исключительно большое содержание K_2O определяет их специфику как сырья для производства калийных (или комплексных) удобрений.

Сакунское месторождение калиево-глиноземных руд находится на территории Каларского района Читинской области, в 22 км юго-западнее железнодорожной станции Хани (БАМ). Месторождение связано с одноименным щелочным массивом площадью ~ 50 км² (рис. 8), сложенным в северной и центральной частях граносиенитами, кварцевыми, щелочными и нефелиновыми сиенитами (~ 70 % площади). В южной части его выявлено дугообразное, изогнутое к югу, крутопадающее линзовидное тело длиной до 10 км при ширине до 2 км, сложенное калиевыми и ультракальцевыми породами. Значительно меньшее (мощность до 100 м при длине $\sim 1,3$ м) тело имеется в восточной части массива. Предполагается, что оба тела представляли собой часть кольцевой воронкообразной залежи, разрушенной в результате тектонической деятельности и внедрения граносиенитов. В их составе выделены верхняя лейкократовая (с содержанием цвет-

ных минералов до 10 %) и нижняя мезократовая (> 10 % цветных минералов) серия. Первая, мощность которой на Южном участке достигает 850 м, а на Восточном — 100 м, содержит зоны ультракалевых пород, представляющие практический интерес.

В пределах Южного участка по данным разведки выделена зона длиной ~ 4 км при ширине до 900 м, имеющая серповидную форму и сложное строение, обусловленное переслаиванием линзовидных и пластообразных тел сынныритов, псевдолейцитовых и нефелиновых сиенитов мощностью до 180 м и протяженностью до нескольких сотен метров. Прогнозные ресурсы рудного тела, оконтуренного по бортовому содержанию K_2O 14 %, очень значительны при среднем содержании (в %): K_2O — 15,5; Al_2O_3 — 19,9; Fe_2O_3 — 3,5; SiO_2 — 56,0. При бортовом содержании K_2O 17 %, среднее содержание полезных компонентов увеличивается (K_2O — 17,4 %; Al_2O_3 — 20,7 %), но прогнозные ресурсы сокращаются более чем в 3 раза, значительно превышая тем не менее перспективные потребности в сырье перерабатывающего комплекса целесообразной мощности.

В отличие от Сыннырского месторождения в составе пород продуктивной зоны данного объекта значительно распространены псевдолейцитовые и нефелин-псевдолейцитовые сиениты, составляющие до 70 % общей массы пород в пределах зоны, оконтуренной по бортовому содержанию K_2O 14 %. Основным, резко преобладающим по количеству минералом этих пород является калиевый полевой шпат (~ 65 %), находящийся большей частью в тесном сростании с кальситом и нефелином.

Как уже отмечалось, продуктивные породы Сакунского месторождения по составу и качественным характеристикам в целом близки к сыннырским, отличаясь несколько меньшим (~ на 1 %) содержанием глинозема и большим (~ на 2 %) Fe_2O_3 . Весьма благоприятными особенностями Сакунского месторождения (по сравнению с Сыннырским) является его близость к трассе БАМа, что существенно сокращает капитальные затраты в случае его освоения, а также наличие в 30 км от него промышленных ресурсов легкообогатимых апатитовых руд (месторождение Хани) и апатитовой минерализации непосредственно на участке Сакунского месторождения. Указанное, наряду с расположением месторождения на небольшом удалении от ряда уникальных рудопроявлений полезных ископаемых (Удоканское и др.), повышает его практическую значимость и создает предпосылки для промышленного освоения.

Тежарское месторождение нефелиновых и псевдолейцитовых сиенитов, разведенное в качестве сырьевой базы Разданского горно-химического комбината с подсчетом запасов сырья по промышленным категориям, в настоящее время учитывается как не намечаемое к освоению в связи с принятием решения о нецелесообразности

строительства предприятия. Месторождение расположено в центральной части Армянской ССР в 15 км к юго-западу от г. Раздан и приурочено к южной части одноименного щелочного массива. Последний залегает среди осадочно-вулканогенных пород и представлен двумя телами, видимо, соединяющимися на глубине, — штокообразным телом Центрального массива (площадь 43 км²) и конической дайкой, образующей неполное кольцо вокруг последнего.

Массив имеет зональное строение: в центральной части штока залегают щелочные сиениты, вокруг которых развиты нефелиновые сиениты, сменяющиеся в краевых частях псевдолейцитовыми сиенитами, слагающими несколько прерывистых дугообразных полос. Весь комплекс пород прорван дайками различного состава. В качестве руд оценивались нефелиновые и псевдолейцитовые сиениты, причем как основной объект для эксплуатации рассматривался Тежагетский участок (площадь ~0,83 км²), заключающий около 80 % общих запасов месторождения. Руды месторождения отличаются преобладанием калия над натрием в составе щелочей (см. табл. 2) и сложены калиевым полевым шпатом, нефелином, плагиоклазом, темноцветными (баркевикит, гастингсит, биотит, реже авгит и эгирин) и вторичными (по нефелину) минералами (цеолиты, анальцим, канкринит). Псевдолейцитовые нефелиновые сиениты содержат калиевый полевой шпат, находящийся в тесном срастании с нефелином или продуктами его замещения. Руды Тежсарского месторождения, характеризующиеся исключительно высоким содержанием кремнезема и относящиеся к нефелиновому сырью III сорта, по расчетным технико-экономическим показателям их переработки существенно уступают рудам вышеописанных месторождений.

Глава 2

СПОСОБЫ ПЕРЕРАБОТКИ И ОБОГАЩЕНИЯ НЕФЕЛИНОВОГО СЫРЬЯ

Вопросам технологии комплексной переработки нефелинового сырья посвящена обширная специальная литература, в том числе и ряд обобщающих работ [22], материалы которых использованы в данном разделе. Несмотря на разнообразие разработанных и в ряде случаев проверенных в крупнолабораторном и опытно-заводском масштабах технологических схем переработки нефелиновых руд и концентратов, до настоящего времени единственной широко используемой в промышленной практике технологией является способ спекания их с известняком (рис. 9). Он основан на связывании глинозема в растворимые алюминаты щелочей, а кремнезема — в малорастворимый двукальциевый силикат.

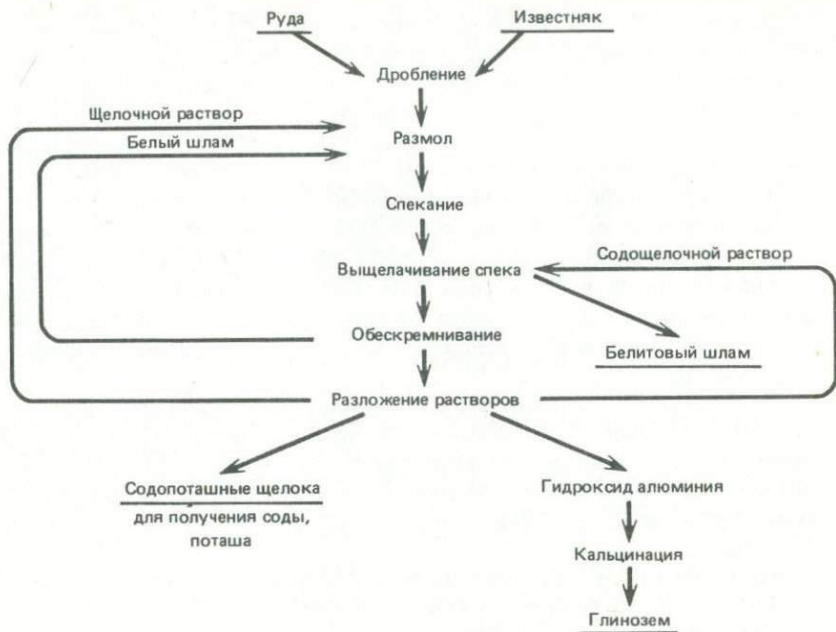


Рис. 9. Схема комплексной переработки нефелинового сырья по технологии спекания с известняком

В соответствии с этими реакциями (см. рис. 9) шихта подготавливается так, чтобы молекулярные отношения $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) : \text{Al}_2\text{O}_3$ и $\text{CaO} : \text{SiO}_2$ составляли соответственно $1,00 \pm 0,05$ и $2,0 \pm 0,05$. При недостатке в перерабатываемом сырье щелочей на связывание глинозема в алюминаты в состав шихты дополнительно вводится оборотный содопоташный раствор. Кроме этого, в составе шихты используются также другие оборотные продукты (в частности, белый шлак обескремнивания алюминатных растворов). Размол шихты (с одновременной гомогенизацией) производится в трубчатых мельницах. После окончательной корректировки состава шихта с влажностью $\sim 30\%$ подается на вращающиеся печи спекания. Полученные спеки после охлаждения и дробления выщелачиваются (одновременно с размолотом) оборотными растворами. При этом переходящие в раствор алюминаты щелочей частично реагируют с двукальциевым силикатом, за счет чего кремнезём поступает в алюминатный раствор.

Большая часть двукальциевого силиката (в виде белитового шлака) отделяется от алюминатного раствора и после промывки направляется в цементное производство или шламохранилище.

Получаемый при выщелачивании спека алюминатный раствор делится на две ветви — содощелочную и содовую — и поступает на обескремнивание. Обескремнивание растворов содощелочной ветви осуществляется в одну стадию (выдержка в автоклаве при 150—170 °С), после чего производится их разложение карбонизацией с довыкручиванием (с выделением ~50 % гидроксида алюминия). Остаточный содощелочной раствор после отделения гидроксида алюминия поступает на выщелачивание спека. Белый шлам обескремнивания направляется на приготовление шихты (в голову процесса).

Алюминатный раствор содовой ветви подвергается глубокому обескремниванию в две стадии (вторая стадия — с добавкой извести) и разлагается карбонизацией (до полного выделения гидроксида алюминия).

Из щелочного карбонатного раствора после отделения гидроксида алюминия получают соду и поташ методом политермического упаривания (с последующей кальцинацией содопродуктов). Остаточные растворы содовой ветви обогащены элементами-примесями (в частности, рубидием), которые могут попутно извлекаться различными способами.

Выделяемый из алюминатных растворов гидроксид алюминия разделяется на крупную и мелкую фракции, используемые соответственно для получения товарного глинозема (путем кальцинации) и в качестве затравки (при карбонизации и довыкручивании).

Длительное промышленное применение технологии спекания позволило накопить большой опыт, значительно усовершенствовать ее как в части аппаратного оформления (создание эффективных аппаратов с большой единичной мощностью), так и режимов процесса и в итоге существенно оптимизировать технологические и технико-экономические показатели производства. Вместе с тем дальнейшее расширение промышленного применения этой технологии будет во многом определяться решением ряда возникающих при этом проблем. К ним в первую очередь относятся задачи снижения топливно-энергетических затрат (в основном технологического топлива) и достижения полной утилизации попутно получаемого белитового шлама.

Наиболее радикальный путь уменьшения топливно-энергетических затрат (составляют ~50 % от общих эксплуатационных затрат) может заключаться в применении способа спекания сухой гранулированной шихты, позволяющего приблизительно на 30 % сократить расход высококалорийного технологического топлива. Эффективность указанного способа обусловлена в основном большим тепловым КПД выпарных аппаратов (по сравнению с сушильной зоной печи), возможностью использования при этом более дешевого энергетического топлива, а также интенсификацией процесса спекания за счет применения более прогрессивного оборудования. Этот способ можно

использовать в случае как мокрой (для нефелинового сырья с $M_{R_2O} < 1$), так и сухой шихтоподготовки (руды и концентраты с $M_{R_2O} \sim 1,0$). Метод спекания сухой гранулированной шихты позволяет наряду со снижением энергетических затрат также заметно уменьшить вынос пыли при спекании и связанные с ним технологические трудности. Вместе с тем применение метода вызывает ряд осложнений. К ним относятся необходимость введения в технологический процесс дополнительного передела — гомогенизации шихты и трудности в осуществлении сухой шихтоподготовки, связанные прежде всего с увеличением запыленности производства и ухудшение условий труда.

Проблема полного использования белитового шлама приобретает большое значение как в связи с повышением производственной мощности отдельных предприятий, работающих на базе нефелинового сырья, так и в связи с планируемым значительным увеличением общего объема переработки последнего.

В настоящее время единственным промышленно реализуемым направлением применения белитового шлама, выход которого на действующих предприятиях составляет от 5,9 до 6,2 т на 1 т глинозема, является цементное производство, где он в смеси с известняком и соответствующими добавками входит в состав шихты для получения портландцемента. Использование белитового шлама взамен традиционного сырья характеризуется рядом преимуществ: повышением производительности вращающихся печей на 22—28 % и снижением удельного расхода тепла на обжиг на 25—35 % [33]. Дальнейшее совершенствование технологии производства позволяет увеличить долю белитового шлама в составе сырьевых смесей до 0,6—0,8 т на 1 т клинкера и соответственно повысить производительность печей [33]. Имеются также перспективы совмещения процессов размола и сушки сырьевой смеси, что в принципе дает возможность перейти на прогрессивный сухой способ производства цемента. Вместе с тем в случае достаточно крупных масштабов переработки нефелинового сырья полное использование белитового шлама на цемент, как правило, невозможно в связи с ограниченным (по экономическим соображениям) радиусом его перевозок; это приводит к необходимости сброса части шлама в отвал, что ухудшает экономические показатели производства и требует отчуждения земель под шламохранилище.

Работами ряда специализированных научно-исследовательских и проектных организаций доказана возможность широкого применения белитового шлама не только для производства цемента, но и для других целей (см. гл. 7). Это свидетельствует о возможности полной утилизации белитового шлама со значительным экономическим эффектом, что способствует созданию полностью безотходного рентабельного производства на базе нефелинового сырья и тем самым рас-

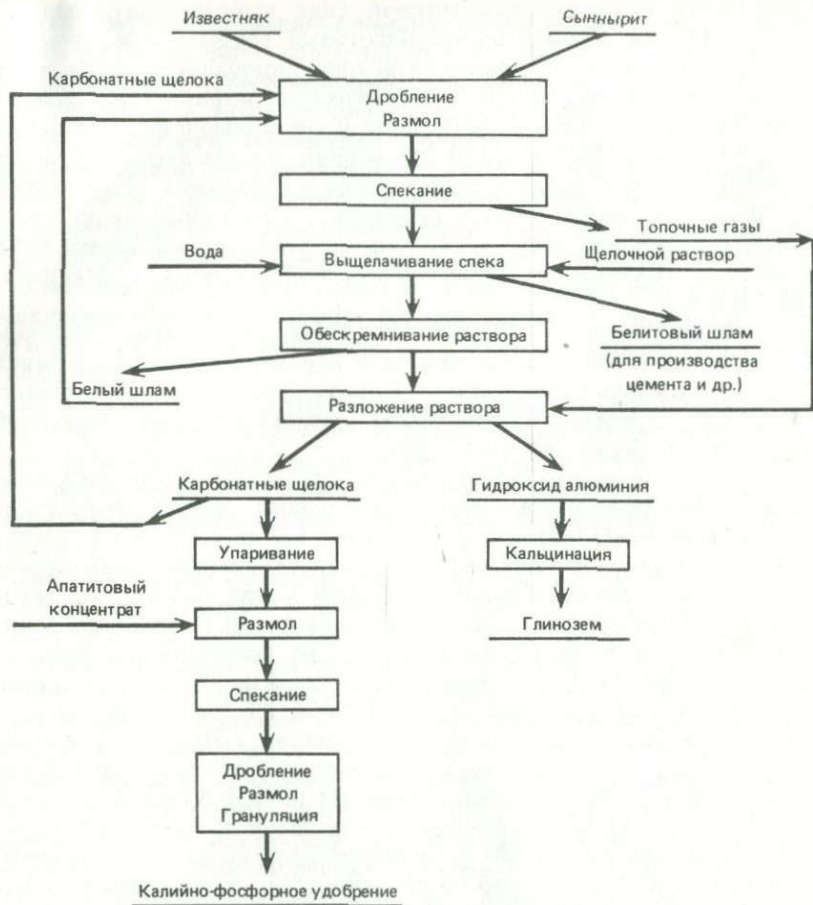


Рис. 10. Модифицированный вариант спекательной технологии с попутным получением бесхлорных калийно-фосфорных удобрений

ширению масштабов его использования. Значительные резервы повышения эффективности комплексной переработки по методу спекания нефелинового сырья с повышенным содержанием K_2O (особенно сынныйритов и кольского нефелинового концентрата) может дать предложенный ВАМИ модифицированный вариант технологии с производством вместо поташа комплексных фосфорно-калийных удобрений (термофосфатов) путем спекания шихты на основе фосфатных концентратов и поташных маточных растворов глиноземного производства (рис. 10). Высокая ценность получаемых при этом дефицит-

ных щелочных бесхлорных форм комплексных удобрений с содержанием $K_2O + P_2O_5 \sim 50\%$ при небольших дополнительных затратах позволяет существенно повысить технико-экономические показатели основного производства.

Некоторые ограничения применения традиционного варианта спекательной технологии связаны с особенностями вещественного состава перерабатываемого нефелинового сырья, прежде всего с необходимостью лимитировать содержание оксидов железа ($\leq 5\%$), вызывающих повышение плавкости шихты и снижение извлечения полезных компонентов (Al_2O_3 и R_2O).

Учитывая, что указанные ограничения по составу сырья, перерабатываемого по технологии спекания, существенно сужают сырьевую базу нефелиновых руд, следует рассмотреть основные пути преодоления этих трудностей.

Решение проблемы комплексной переработки высокожелезистых нефелиновых руд возможно либо путем применения способа спекания на основе высокощелочной шихты (рис. 11, а), либо путем снижения количества оксидов железа в сырье при его механическом обогащении.

Способ спекания высокощелочной шихты, разработанный М.Н. Смирновым и З.Г. Галкиной и проверенный в опытно-заводском масштабе, основан на образовании в спеках алюминатов и ферритов щелочей и связывании кремнезема породы в натриево- и калиево-кальциевые силикаты типа $R_2O \cdot CaO \cdot SiO_2$. При приготовлении шихты на основе высокожелезистых нефелиновых руд, известняка и обратного щелочного раствора должны обеспечиваться следующие молекулярные отношения компонентов:

$$R_2O : (Al_2O_3 + Fe_2O_3 + SiO_2) = 1,0 \text{ и } CaO : SiO_2 = 1,0.$$

В связи с повышенным содержанием в шихте свободной щелочи она подается в печь либо распылом, либо в гранулированном виде. Охлажденный спек выщелачивается водой с получением алюминатного раствора, перерабатываемого на глинозем по обычной схеме, и шлама, содержащего не полностью разложенные щелочно-кальциевые гидросиликаты. Регенерация щелочи из шлама осуществляется путем обработки его щелочными растворами.

Основные преимущества этого способа таковы: 1) возможность переработки высокожелезистых руд без предварительного обогащения; 2) снижение расхода известняка по сравнению с обычной шихтой в 2 раза; 3) хорошая гранулируемость шихты с широкой площадью спекобразования, что благоприятствует применению при спекании высокоэффективных печей кипящего слоя; 4) возможность регенерации шлама с получением двойного соединения — пирсонита ($Na_2CO_3 \cdot CaCO_3 \cdot 2H_2O$), эффективно отделяемого от геля кремнезема, с последующим использованием его для приготовления высоко-

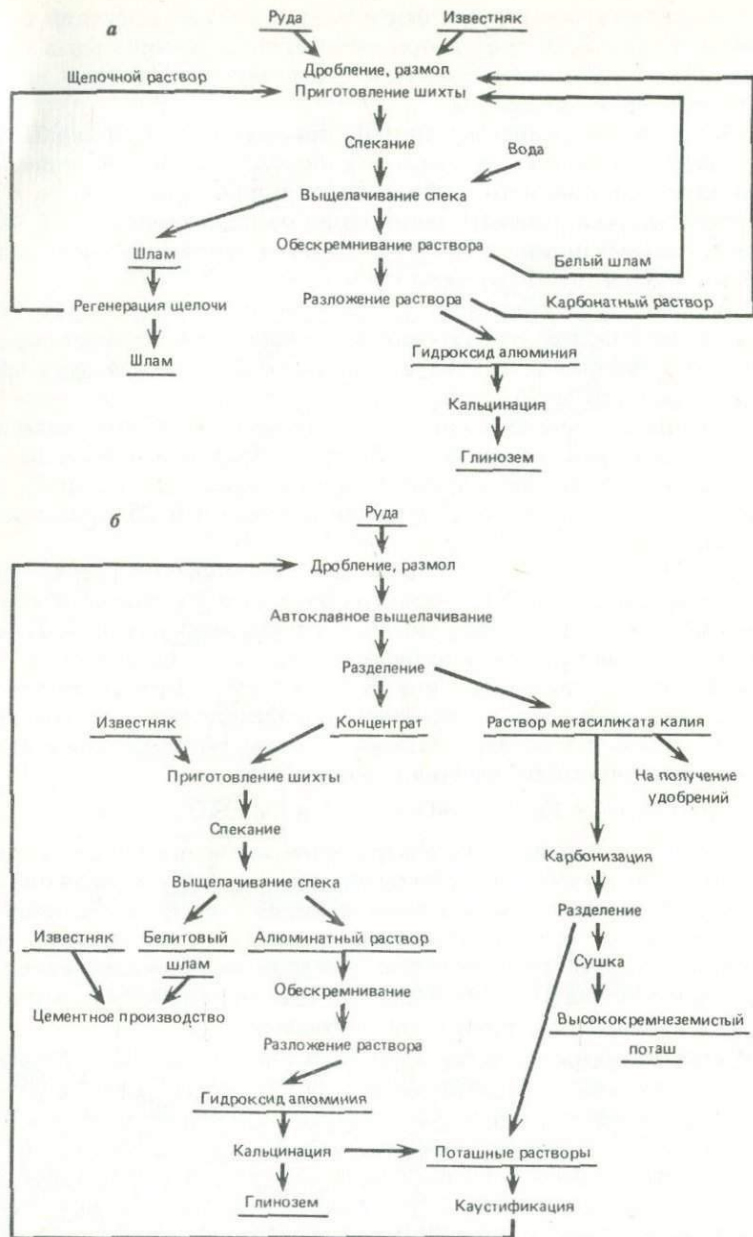
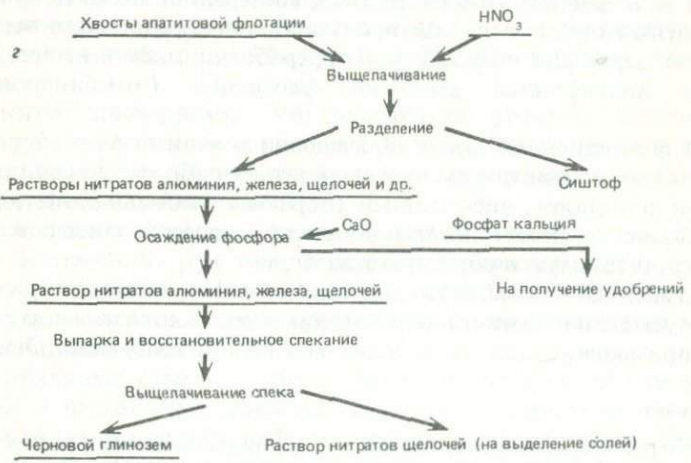
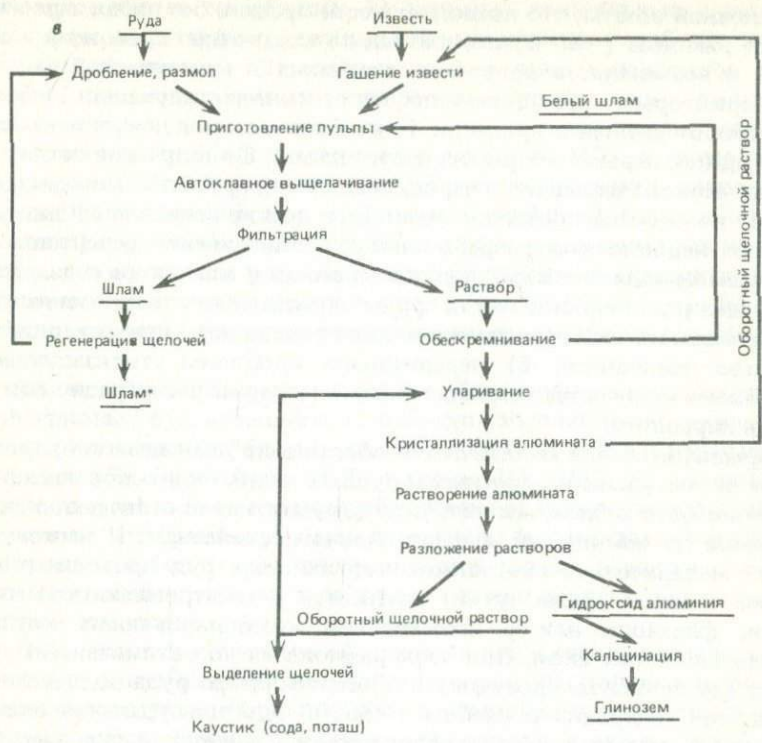


Рис. 11. Варианты технологических схем переработки щелочного алюмосиликат-
 Способы: а — спекания высокощелочной шихты, б — спекания с предваритель-
 2 — азотнокислотный ИХТРЕМС



ного сырья.

ным химическим обогащением, в — гидрохимический Пономарева — Сажина,

кошечной шихты, что позволяет вести процесс без ввода известняка; 5) высокие (~90 %) показатели по извлечению глинозема и щелочей и возможность получения последних в каустической форме.

К некоторым недостаткам способа относятся следующие: 1) большой оборот щелочи в процессе; 2) необходимость в дополнительном громоздком переделе — регенерации шлама; 3) получение шлама на основе монокальциевого гидросиликата, переработка которого на цемент не освоена промышленностью, а другие направления использования недостаточно разработаны; 4) повышенное содержание в получаемом шламе влаги, оксидов кремния и магния (в связи с использованием необогащенной руды), снижающее экономическую эффективность использования его для производства цемента, а также качество последнего; 5) нерешенность проблемы утилизации значительного количества геля кремнезема (в случае регенерации шлама в виде пирсонита).

Предварительное механическое обогащение*, как известно, проводится путем удаления цветных и рудных минералов основных носителей оксидов железа, магния, титана, существенно отличающихся от нефелина по магнитным и флотационным свойствам. В настоящее время механическое обогащение нефелиновых руд проводится методами мокрой (реже сухой) магнитной и электромагнитной сепарации, флотации или с применением комбинированных магнитно-флотационных схем. При этом размолотая до оптимальной крупности (до вскрытия сростков) и обесшламленная руда подвергается магнитной сепарации в слабом (~80000 А/м для удаления сильно магнитных минералов и технологического железа) и сильном (до 950000 А/м для извлечения цветных минералов) поле. Полученный немагнитный продукт (концентрат) либо непосредственно используется как сырье для комплексной переработки, либо в необходимых случаях подвергается дочистке флотацией (комбинированные схемы).

При флотационной схеме обогащения в зависимости от реагентного режима концентратом может являться либо камерный продукт (прямая флотация), либо пенный (обратная флотация), причем процесс обычно включает несколько стадий, нередко последовательно сочетающих прямую и обратную флотацию.

Опытами по обогащению нефелинового сырья целого ряда эксплуатируемых и перспективных месторождений доказана перспективность применения для этих целей магнитной сепарации. Основные

* Методы обогащения нефелинового сырья разрабатываются во Всесоюзном ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательском и проектном институте механической обработки полезных ископаемых (Механобр), Государственном научно-исследовательском институте горно-химического сырья (ГИГХС) и др.

преимущества ее следующие: 1) меньшие капитальные и эксплуатационные затраты по сравнению с флотационной и особенно комбинированной схемами; 2) сохранение в составе концентратов обогащения высококальциевых минералов (прежде всего кальцита), что повышает выход концентрата при незначительном снижении в нем количества CaO и приросте содержания SiO_2 , а также весьма положительно сказывается на технико-экономических показателях комплексной переработки обогащенной руды; 3) возможностьпутного получения в ряде случаев кондиционных железных концентратов, что снижает затраты на получение основного продукта; 4) отсутствие в хвостах обогащения и воде флотореагентов, что исключает возможность отрицательного влияния последних на окружающую среду.

Таким образом, предварительное обогащение высокожелезистых нефелиновых руд позволяет: 1) повысить абсолютное содержание полезных компонентов (Al_2O_3 на 4—6 %, R_2O на 2—3 %), уменьшить — вредных (Fe_2O_3 с 10 до 1,5 %, а также TiO_2 , MgO , S), существенно стабилизировать качество перерабатываемого сырья (концентратов); 2) снизить (по сравнению с использованием высокощелочной шихты) содержание в белитовом шламе оксидов магния и железа, что дает возможность получать из него в ряде случаев дорогостоящие белые и цветные цементы.

Введение механического обогащения руд в технологический цикл приводит к необходимости дополнительных капитальных и эксплуатационных затрат, потерям полезных компонентов с хвостами обогащения и к повышенному в связи с этим расходу руды, а также к дополнительным затратам на организацию хвостохранилищ. Однако экономически оправданным оказывается обогащение даже таких высококачественных руд, как уртиты Кия-Шалтырского месторождения.

Следует подчеркнуть, что обогащение уртитов целесообразно лишь при достаточно высоком (~ 4 %) содержании оксидов железа в рудах, небольшом количестве в их составе полевых шпатов и невысокой степени изменения пород.

В отдельных случаях, в частности при обогащении хвостов апатитовой флотации из руд месторождений Хибинской группы, а также сильно измененных нефелиновых руд, с целью повышения глубины обогащения целесообразно применение комбинированных магнитно-флотационных схем.

Необходимо отметить, что любая из используемых или разработанных к настоящему времени схем механического обогащения не обеспечивает разделение нефелина и полевых шпатов, что могло бы существенно повысить качество получаемого концентрата за счет снижения содержания кремнезема. Предложенная ГИГХС технология разделения этих минералов в кислой среде с применением дефицит-

ных и токсических фторидов практически не может быть использована в условиях массового производства. Проблема снижения содержания кремнезема имеет исключительно важное значение, поскольку комплексная переработка высококремнеземистых нефелиновых пород характеризуется повышенным (в 1,6—1,7 раза по сравнению с сырьем, перерабатываемым ныне) материальным потоком и трудностями, связанными с полной утилизацией белитового шлама. Разработка эффективного способа снижения содержания кремнезема в таких породах могла бы существенно расширить сырьевую базу глиноземной промышленности.

Более радикальным (по сравнению с механическим обогащением) способом снижения количества кремнезема является их химическое обогащение, предложенное академиком М.Г. Манвеляном для переработки нефелин-псевдолейцитовых сиенитов Тежсарского месторождения (Армянская ССР). В настоящее время усовершенствованные модификации этого способа разрабатываются рядом организаций применительно к комплексной переработке высококалийевого алюмосиликатного сырья — сьиньритов. Указанный способ (см. рис. 11, б) основан на обработке руды в автоклавных условиях (при 240—280 °С) концентрированными щелочными растворами (~200—300 г/л Na_2O каустического). При взаимодействии полевых шпатов со щелочами происходит отщепление четырех из шести молекул кремнезема (с переходом их в щелочной раствор), и образуется щелочной алюмосиликат, близкий по составу и свойствам к нефелину (кальсилиту). Следует отметить, что при определенном значении $\text{K}_2\text{O} : \text{Na}_2\text{O}$ возможно замещение Na_2O породы на K_2O из раствора и изменение, таким образом, соотношения между оксидами в твердой фазе. Содержания основных компонентов в получаемом при указанном процессе концентрате обогащения в зависимости от состава исходной руды и условий обработки изменяются в следующих пределах (в %): Al_2O_3 28—32; R_2O 16—18 и SiO_2 39—40; он может перерабатываться по промышленной технологии спекания или кислотными методами. Из щелочно-кремнеземистого раствора путем вакуум-кристаллизации, карбонизации, каустификации и политермического упаривания могут быть получены метасиликаты натрия, калия, кальция, высококремнеземистый поташ, белая сажа и другие продукты, а также оборотный каустический раствор.

Способ проверен в опытно-заводском масштабе. Основные преимущества его заключаются в выведении в голову процесса значительной части (~30 % от общего количества) кремнезема исходной руды с получением высокоглиноземистого и низкокремнистого концентрата, близкого по составу к сырью, перерабатываемому в настоящее время, а также в возможности получения широкого ассортимента химических продуктов. Вместе с тем последнее преимущество может сказываться и отрицательно в случае такого крупнотоннажного

производства, как глиноземное. Масштабы промышленного использования рассматриваемого способа с учетом весьма высокого (~ 3 т на 1 т глинозема) выхода попутных продуктов ограничены потребностью в них. Помимо указанного фактора недостатками метода являются также большой оборот щелочи и сложность получения значительного количества оборотных каустических растворов.

В последнее время Институтом общей и неорганической химии АН Армянской ССР (АрМИОНХ) рассматриваемый способ существенно усовершенствован в части условий автоклавной обработки руды, состава и методов получения оборотного раствора, идущего на ее обескремнивание, методов переработки щелочно-кремнеземистых растворов и утилизации белитового шлама. Вместе с тем и этот вариант процесса характеризуется большим выходом поташно-кремнеземистых смесей и других продуктов, сбыв которых в условиях массового производства может быть затруднен.

Существенный интерес для переработки высококремнеземистого нефелинового сырья представляет гидрохимический способ Пономарева — Сажина (см. рис. 11, в), разработанный в 50-х г. и значительно усовершенствованный в последнее время в результате исследований, проведенных рядом научно-исследовательских и проектных организаций СССР.

Способ основан на автоклавном разложении при высоких температурах (280—300 °С) концентрированными (300—500 г/л R_2O) высокомолекулярными щелочными растворами в присутствии извести, количество которой рассчитывается так, чтобы значение $CaO : SiO_2$ составляло 1,05. Алюмосиликатное сырье вскрывается при большей скорости процесса; при этом ~ 90 % Al_2O_3 переходит в раствор, каустический модуль его снижается до 10,0. Кремнезем связывается в нерастворимый в таких растворах натриево-кальциевый гидросиликат, образование которого нормально протекает также и при молярной доле K_2O не свыше 38 % от суммы щелочей [24]. Шлам, отделенный от алюминатного раствора, после промывки регенерируется репульпацией со слабым каустическим раствором и переходом в него ~ 90 % щелочей (в каустической форме). Шлам отделяется от раствора и после промывки направляется на производство цемента или в отвал, а щелочной раствор — на промывку автоклавного шлама и растворение алюмината натрия (в варианте с его кристаллизацией из автоклавного алюминатного раствора).

Полученный при автоклавном процессе концентрированный высокомолекулярный щелочно-алюминатный раствор перерабатывается либо путем кристаллизации из него алюмината натрия (с последующим его растворением), либо путем синтеза трехкальциевого гидроалюмината (с последующим его разложением).

Выполненные в последние годы исследования позволили существенно оптимизировать технологические и технико-экономические по-

казатели переработки сырья гидрохимическим способом и в итоге заметно сократить затраты теплотенергии [23].

Основным преимуществом гидрохимического способа переработки нефелинового сырья по сравнению с технологией спекания является снижение (~ на 20 %) энергоемкости технологического процесса при одновременном существенном уменьшении удельного веса технологического топлива в общем объеме энергопотребления. Последнее обуславливает возможность использования более дешевых видов энергетического сырья, а также тепла атомных электростанций.

Недостатки способа таковы: 1) значительный оборот щелочи в процессе и высокие концентрации ее в растворах, что вызывает трудности с аппаратурным оформлением процесса; 2) наличие громоздкого передела — регенерации шлама; 3) получение шлама на основе монокальциевого гидросиликата, применение которого для производства цемента менее эффективно по сравнению с белитовым шламом. Использование варианта автоклавного выщелачивания со связыванием кремнезема в двукальциевый силикат связано с ростом (в 2 раза) потребности в извести и соответственно существенным увеличением расхода технологического топлива на обжиг известняка.

Наряду с описанными щелочными способами переработки нефелинового сырья в СССР и за рубежом разрабатываются кислотные и щелочно-кислотные способы. Они базируются на разложении сырья различными минеральными кислотами (серной, соляной, азотной и др.) и характеризуются отделением кремнезема на первых стадиях процесса, что обуславливает малое влияние содержания кремнезема в рудах на показатели их переработки [17]. Вместе с тем присутствие в высококремнеземистых нефелиновых рудах большого количества стойких к действию кислот полевых шпатов создает значительные затруднения при кислотном разложении такого сырья; требуется либо проведение процесса при высоких температурах ($> 200^\circ\text{C}$), что связано со сложностью создания соответствующей аппаратуры, либо предварительная щелочная обработка руд для перевода полевых шпатов в кислотнорастворимую форму. Последний процесс осуществляется автоклавной обработкой по способу М.Г. Манвеляна или спеканием с карбонатами щелочей по способу Института химии твердого тела и переработки минерального сырья Сибирского отделения Академии наук СССР — ИХТГИМС. Оба указанных метода связаны с дополнительными затратами.

Необходимо отметить, что из трех основных минеральных кислот — серной, соляной и азотной — наиболее эффективна последняя, поскольку обеспечивает получение щелочных продуктов в виде ценных и дефицитных нитратов. Положительными факторами являются также более низкая температура разложения нитратов по сравнению с сульфатами, меньшая агрессивность этой кислоты и относительная простота ее регенерации (конденсацией из отходящих газов).

Из большого числа кислотных схем наибольший практический интерес для перспективных видов нефелинового сырья представляют разрабатываемый Институтом химии и технологии редких элементов и минерального сырья Кольского филиала АН СССР (ИХТРЭМС) азотнокислотный способ переработки хвостов апатитовой флотации (см. рис. 11, 2) и предложенный Всесоюзным научно-исследовательским и проектным институтом галургии (ВНИИГ) комбинированный щелочно-азотнокислотный способ переработки калийно-глиноземного сырья (сыньиритов).

Первый способ заключается в разложении хвостов апатитовой флотации азотной кислотой; при этом алюминий и щелочи переводятся в раствор в виде нитратов (с одновременным разложением апатита), а эффективно фильтрующиеся кремнистые осадки могут быть обогащены с получением продуктов типа белой сажи. Отделенные от кремнистого осадка азотнокислые растворы упариваются до плава и могут перерабатываться двумя способами [9]:

1) термообработкой плава при 350—450 °С с получением смеси черного глинозема и нитратов щелочи (последние отделяются водным выщелачиванием), а также паров азотной кислоты, направляемой после регенерации в голову процесса; дальнейшая переработка черного глинозема осуществляется по способу Байера;

2) термообработкой плава при 750—850 °С с получением алюминатных спеков, а также паров азотной кислоты, поступающей на регенерацию; алюминатный спек перерабатывается обычным способом, отделяемый при этом шлам содержит от 20 до 35 % P_2O_5 , который после прокаливания при 1000—1200 °С переходит в усвояемую для растений форму.

Переработка хвостов апатитовой флотации по способу ИХТРЭМС имеет ряд преимуществ перед современными методами их использования: основные из них следующие: 1) отпадает необходимость получения нефелинового концентрата, связанная с затратами на обогащение и потери при этом более 50 % содержащегося в хвостах натриевой флотации нефелина и практически всего апатита; 2) появляется возможность организации переработки хвостов на месте, что позволит избежать транспортных затрат, составляющих в настоящее время более 3 руб. на 1 т концентрата; 3) становится возможным использование содержащегося в хвостах апатита и попутное получение фосфорсодержащих продуктов, представляющих интерес в качестве новых видов удобрений.

Основные недостатки способа таковы: 1) необходимость применения в аппаратном оформлении дефицитных химически стойких материалов; 2) наличие в процессе ряда переделов, проверенных только в лабораторном или крупнолабораторном масштабе; 3) отсутствие промышленного оборудования для переработки плава нитратов; 4) необходимость дополнительной переработки черного

глинозема; 5) нерешенность проблемы утилизации большого количества кремнеземистых продуктов.

Комбинированный щелочно-азотнокислотный способ, разрабатываемый ВНИИГ, базируется на азотнокислотном разложении кальсильитового концентрата, получаемого обработкой сыныритов [26] по методу Манвеляна. Дальнейшая переработка нитратных растворов производится, как в способе ИХТРЭМСа.

Основные достоинства щелочно-азотнокислотного способа перечислены при общей характеристике преимуществ кислотных технологий, а недостатки в целом аналогичны таковым для способа ИХТРЭМСа. Они дополнительно усугубляются наличием передела химического обогащения со свойственным последнему большим оборотом щелочей, сложностью получения оборотного каустического раствора и трудностями утилизации большого количества поташно-кремнеземистых смесей и кремнеземистых продуктов.

Таким образом, в настоящее время наиболее разработанной и имеющей значительный опыт промышленного применения является спекательная технология, позволяющая при условии ее совершенствования в каждом конкретном случае перерабатывать практически любые виды алюмосиликатного сырья. Конкурентоспособность данной технологии возрастает с учетом возможности заметного снижения энергетических затрат при внедрении варианта спекания сухой шихты. Большинство других методов требует доработки, проверки в опытно-заводском масштабе, решения вопросов аппаратурного оформления и др. Внедрение их в промышленную практику возможно только в перспективе. Наибольший практический интерес могут представить гидрохимический способ (особенно для высококремнеземистого сырья) и азотно-кислотная технология ИХТРЭМС (применительно к переработке хвостов апатитовой флотации хибинских руд).

Глава 3

ФОРМАЦИОННАЯ ПРИНАДЛЕЖНОСТЬ И ПЕТРОГРАФО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ РУД

Описываемые месторождения и проявления нефелиновых руд относятся к различным формациям щелочных пород. Из существующих в настоящее время схем формационной классификации щелочных комплексов целесообразно придерживаться схем Л.С. Бородина и М.П. Орловой [22, 29], почти полностью совпадающих. Эти схемы не страдают излишней дробностью членения формаций, что позво-

ляет подчеркнуть наиболее существенные их особенности, действительно общие для одноименных комплексов (ассоциаций) щелочных пород.

Месторождения и рудопроявления нефелиновых руд в Кузнецком Алатау (Кля-Шалтырское, Горячегорское, Медведкинское и др.), на Витимском плоскогорье (Мухальское, Нижне-Бурульзайское и др.) и юго-востоке Тувы (Дахунурское) принадлежат к формации щелочных габброидов, щелочных и нефелиновых сиенитов (щелочно-габброидная) щелочно-базитового типа. Типичные массивы этой формации сложены породами трех групп: щелочными габброидами, уртит-якупирангитовыми породами (и их полевошпатовыми разностями) и нефелиновыми сиенитами (в том числе ювитами), образующимися в перечисленной последовательности. Количественные соотношения пород этих трех групп самые различные.

Месторождения и рудопроявления нефелиновых руд, приуроченные к Хибинскому массиву, Баянкольскому и некоторым другим массивам Тувы, Сыннырскому и Сакунскому массивам в северном Забайкалье, относятся к различным формациям щелочно-салического типа, для которого характерно отсутствие габброидов.

Хибинский массив принадлежит к формации агпаитовых редкометальных нефелиновых сиенитов (агпаитовая); ей свойственно резкое преобладание пород нефелин-сиенитового семейства и подчиненное распространение уртит-якупирангитовых пород. Это же присуще и формации щелочных и нефелиновых сиенитов (щелочно-сиенитовая) калиево-натриевого типа, к которой относится Баянкольский массив и приуроченное к нему месторождение ювит-уртитов. Существенно нефелиновые породы в общем случае не типичны для щелочных комплексов данной формации, и Сангиленский комплекс представляет собой в этом смысле исключение — в нем, кроме Баянкольского месторождения, известен еще ряд проявлений, связанных с нефелин-сиенитовыми массивами.

Наконец, Сыннырское и Сакунское месторождения кальсилит-калиево-полевошпатовых сиенитов приурочены к массивам, входящим в состав формации калиевых щелочных и фельдшпатоидных сиенитов (калиевая щелочно-сиенитовая). Массивы этой формации сложены породами нефелин-сиенитового семейства, а также щелочными сиенитами; бесполевошпатовых существенно фельдшпатоидных (кальсилитовых или нефелиновых) пород в них пока не обнаружено, хотя кальсилитовые аналоги меланократовых членов якупирангит-уртитового ряда уже установлены [12].

Нефелиновые руды, рассматриваемые в качестве сырья для глиноземной промышленности, принадлежат к двум семействам нефелиновых (фельдшпатоидных) пород: бесполевошпатовых нефелиновых пород и нефелиновых сиенитов. В первом из семейств нефелиновых пород сырьем для производства глинозема могут служить урти-

Таблица 5

Схема классификации нефелиновых пород как комплексных глиноземсодержащих руд

Группы нефелинсодержащих пород	Породы	Содержание минералов, %						Технологические требования	Сорт руд	
		нефелина (кальсилита) и вторичных	калиевого полевого шпата	альбита	среднего и основного плагиоклаза	темноцветных	аксессуарных и рудных			
Существенно нефелиновые	Уртиты, ийолит-уртиты, полевошпатовые уртиты	60—90	≤ 15	—	—	10—25	1—5	Не требуют обогащения	I	
Меланократовые бесполевошпатовые и плагиоклаз-нефелиновые	Ийолиты, лейкотералиты, плагиоклазовые ийолиты	40—60	≤ 10	—	15—40	20—50	5—10	Требуют обогащения по Fe_2O_3	II	
Существенно полевошпатовые	Кальсилит-калиево-полевошпатовые	Сынныриты, псевдолейцитовые сиениты	20—30	50—65	—	—	3—10	0—3	Требуют обогащения по SiO_2	IIIа
	Нефелин-плагиоклаз-калиево-полевошпатовые	Нефелиновые сиениты	10—40	30—70	0—50	0—20	5—20	1—10	То же	IIIб

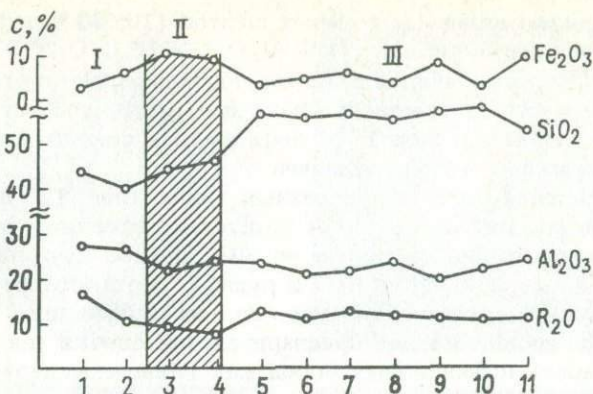


Рис. 12. График изменения содержаний основных оксидов (с) и сортность руд (I—III) отдельных месторождений и рудопроявлений:

1 — Хибинских (нефелиновый концентрат), 2 — Кия-Шалтырского, 3 — Горячего, 4 — Тулульского, 5 — Среднетатарского, 6 — Тежарского, 7 — Октябрьского, 8 — Ишимского, 9 — Боргойского, 10 — Ильменского, 11 — Турпи

ты и ийолит-уртиты, а также их полевошпатовые разности, содержащие не более 30 % плагиоклаза и калиевого полевого шпата. В семействе нефелиновых сиенитов в качестве перспективного сырьевого источника могут рассматриваться только ультракалиевые разности — сынныриты (кальсилитовые или нефелин-кальсилитовые сиениты). Остальные разновидности, содержащие < 15 % K₂O, в настоящее время не представляют интереса как комплексное сырье.

На основе изучения вещественного состава нефелиновых пород, а также требований, предъявляемых к ним промышленной технологией переработки, предложена их классификация как глиноземсодержащих руд [5], которая в достаточной степени коррелируется с указанной формационной принадлежностью этих пород (табл. 5).

Выделены три технологических сорта руд: I — существенно нефелиновые, соответствующие породам уртитового ряда ($\geq 60\%$ нефелина*, $> 26\%$ Al₂O₃; $> 10\%$ R₂O; $< 5\%$ Fe₂O₃); это высококачественные руды, которые перерабатываются по способу спекания; II — меланократовые бесполевошпатовые и плагиоклаз-нефелиновые — породы щелочно-габброидной формации (40–60 % нефелина; 22–25 % Al₂O₃; 8–12 % R₂O; $> 5\%$ Fe₂O₃); они содержат повышенное количество цветных компонентов, а в некоторых разностях и плагиоклаза; III — существенно полевошпатовые — нефелиновые сиениты

* Здесь и далее подразумевается суммарное содержание нефелина и вторичных минералов, развитых по нему.

с преобладанием калиевых полевых шпатов (10—30 % нефелина или других фельдшпатоидов; 18—24 % Al_2O_3 ; > 10 R_2O ; < 5 % Fe_2O_3).

Руды III сорта разделяются на два подтипа, заметно отличающихся по особенностям вещественного состава: а) породы с существенно калиевым составом щелочей; б) нефелиновые сиениты с преобладанием оксида натрия в сумме щелочей.

Сопоставление состава руд разных типов (рис. 12) показывает уменьшение содержания Al_2O_3 от уртитов к нефелиновым сиенитам с одновременным ростом количества SiO_2 , резкое возрастание содержания Fe_2O_3 и уменьшение R_2O в рудах II сорта, которые требуют предварительного обезжелезивания. Эта классификация может использоваться геологами для предварительной оценки (на стадии поисковых работ) нефелиновых пород как глиноземсодержащих руд.

Глава 4

ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ РУД

Одним из главных факторов, определяющих ценность нефелиновых пород как комплексного глиноземсодержащего сырья, является их вещественный состав. Именно состав и соотношение минеральных компонентов обуславливают количество глинозема и щелочей, извлекаемых из руды, содержание элементов, отрицательно влияющих на технологический процесс, и элементов-примесей, т. е. качество нефелиновых пород как глиноземсодержащих руд.

Минеральный состав

Нефелиновые породы в основном средне-, крупно-, реже мелкозернистые, как правило, равномернoзернистые, светло- до темно-серого, иногда зеленоватого цвета. Неравномерное распределение минералов нередко обуславливает появление шлирово-такситовых и полосчатых текстур; типичны гипидиоморфно-идиоморфно-аллотриоморфно-призматически зернистая, пойкилитовая, иногда гломерокристаллическая и реакционная структуры (рис. 13).

Вторичные процессы значительно изменяют облик пород, но чаще всего сохраняется реликтовая структура, а при интенсивном характере процессов в отдельных участках, зонах она становится скрытокристаллической, сливной; нефелин обычно теряет блеск, мутнеет, по краям кристаллов наблюдаются белые, розовато-красные каемки. Иногда эти псевдоморфозы приобретают землистую, сахаровидную или порошокватую текстуру. Гнездо-, жилообразные снежно-белые (цеолит), желтовато-розовые (канкринит), голубые (содалит) выделения, светло-зеленые, иногда с зернистой текстурой (хлорит),

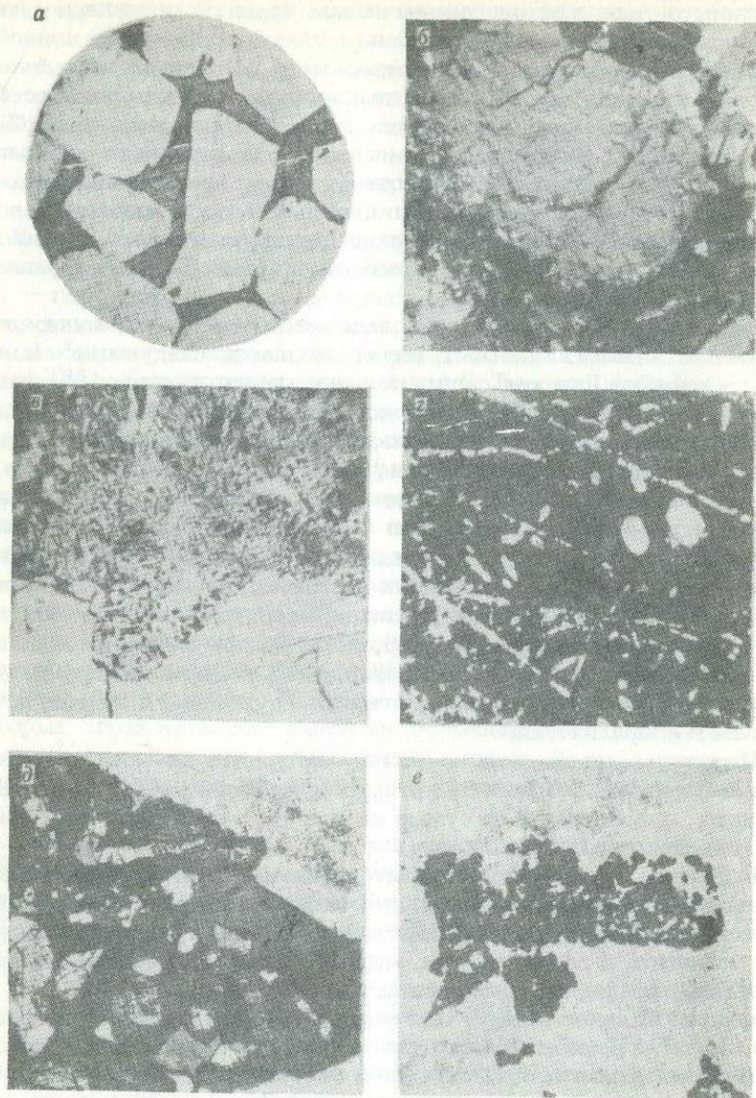


Рис. 13. Структуры и текстуры нефелиновых пород (микрофотографии шлифов):

a — гиподиоморфнозернистая (увеличение 51, без анализатора); *б* — порфиробластовая (увеличение 30, с анализатором); *в* — дактилоскопическая (сынныриты — увеличение 80, с анализатором); *г* — пойкилитовые включения нефелина (светлое) в крупных зернах микроклина (увеличение 50, с анализатором); *д* — шпировое скопление темноцветных минералов (увеличение 30, с анализатором); *е* — скелетные формы агрегатов пирита (черное) в нефелиновой породе (увеличение 25, без анализатора)

красновато- или желтовато-коричневые (гранат) выделения минералов, развивающихся по пироксенам, секущие прожилки новообразования различного состава характеризуют облик измененной нефелиновой породы. Под микроскопом видно, что текстурные особенности породы нередко сохраняются, но структуры очень разнообразны и изменчивы (в пределах рудного тела, участка и даже отдельного образца): грано- и порфиробластовые, гломеробластические реликтовые, криптокристаллические, реакционные и др. В зонах изменений часто наблюдаются катакlastические структуры, вплоть до милонитовых, типичны гнейсовидно-полосчатые, линейно-ориентированные текстуры.

Основными породообразующими магматическими минералами щелочных алюмосиликатных пород являются следующие силикатные — нефелин или кальсилит, полевые шпаты (калиево-натриевые и плагиоклазы); цветные — пироксены, амфиболы, биотиты и гранаты. Проявление послемагматических процессов приводит к образованию множества вторичных минералов, развивающихся как по нефелину, так и по цветным компонентам. Первые в основном представлены минералами трех групп — фельдшпатоидами (канкринит, содалит, цеолиты, анальцим), слюдами и карбонатами. Роль вторичных минералов в некоторых разностях настолько велика, что они приобретают значение породообразующих и оказывают заметное влияние на состав и качество руд. Акцессорные и рудные минералы довольно немногочисленны — это апатит, сфен, реже — циркон, корунд, титаномагнетит, магнетит, ильменит, гематит, сульфиды и другие, встречающиеся спорадически.

Пересчеты химических анализов минералов на кристаллохимические формулы, результаты которых приведены в соответствующих таблицах, произведены по сумме катионов по методике, предложенной И.Д. Борнеман-Старынкевич.

В соответствии с типом кристаллохимической формулы сумма катионов принималась равной для нефелинов — трем, для полевых шпатов — пяти, для пироксенов — четырем, для гранатов — восьми, для магнетита и сфена — трем, апатита — десяти. Анализы биотитов рассчитаны на формулу триоктаэдрической слюды ($4 + Z = 7$), либнеритов и мусковита — на формулу диоктаэдрической слюды ($4 + Z = 6$). В либнеритах недостаток K^+ в группе X дополнялся до 1,00 учетом части H_2O^+ как иона оксония H_3O^+ ; избыток H_2O в анализах слюд сочтен адсорбированной водой.

Расчет амфиболов осуществлялся на основе суммы катионов в группах $4 + Z = 13$ при избытке в группе X (коэффициент при X существенно больше 3), данные химического анализа пересчитывались на формулу пироксена.

При пересчете данных химических анализов фельдшпатоидов расчет содалитов проводился исходя из суммы катионов, равной 10,

расчет канкринитов — исходя из суммы коэффициентов при алюминии и кремнии, равной 12; особенностью анализов канкринитов является существенный (как правило) избыток кремния при дефиците алюминия, что, вероятно, отражает особенности их генезиса.

В некоторых случаях, когда не было уверенности в мономинеральности анализируемого материала, в результат анализа внесена поправка на примесь других минералов — пироксена в титаномагнетите, нефелине и сфене.

В группу нефелина входят четыре минерала: нефелин, кальсилит, трикальсилит и калиофилит. Важнейшие из них — нефелин и кальсилит — породообразующие минералы щелочных пород. Их изучению на протяжении 150 лет посвящена обширная литература. Комплексное обобщение последних современных данных сделано Н.С. Самсоновой [25]. Как показали исследования О. Таттла, Дж. Смита и Т. Сахама, калиофилит и трикальсилит — метастабильные соединения и в природных условиях встречаются очень редко. Нефелин и кальсилит образуют ограниченную серию твердых растворов с разрывом смешимости в интервале составов примерно $Ne_{7,5} - Ne_0$. Кальсилит — предельный калиевый член в серии нефелиновых твердых растворов, устойчивый при низких температурах и давлениях.

Нефелин преобладает над кальсилитом по количественному отношению и разнообразию природных ассоциаций. Он установлен в составе большинства щелочных горных пород, различных по составу, возрасту и условиям формирования. Н.С. Самсонова все ассоциации нефелина по набору минералов делит на три группы, каждая из которых характерна для одной из формаций щелочных пород. Это следующие ассоциации: 1) бесполевошпатовые; 2) нефелина с основными плагиоклазами; 3) нефелина с калиевым полевым шпатом и кислым плагиоклазом.

Кальсилит ($KAlSiO_4$) из бесполевошпатовой ассоциации был впервые обнаружен в молодых вулканических породах мафуритовой серии в Уганде. В полевошпатовой ассоциации он впервые установлен А.Я. Жидковым в 1958 г. в псевдолейцитовых породах Сыннырского массива.

Из анализа и обобщения данных по основным природным ассоциациям минералов группы нефелина Н.С. Самсонова делает вывод, что нефелин и кальсилит могут присутствовать в эффузивных и интрузивных породах, пегматитовых жилах, метасоматических образованиях, зонах контактов габброидов и известняков, т.е. по генезису они практически тождественны. Однако наиболее известным и широко распространенным минералом является нефелин — главный породообразующий минерал нефелиновых руд изученных, эксплуатируемых и некоторых перспективных месторождений. Содержание его в различных типах руд варьирует от 30 до 70 %, нередко он сохраняется лишь в виде реликтов.

В большинстве пород нефелин кристаллизовался первым, в шлифах под микроскопом имеет изометрические или гексагональные очертания. Иногда он содержит микровключения других минералов, в частности, игольчатого эгирин-авгита, прозрачный, бесцветный. Нередко в результате процессов перекристаллизации зерна нефелина укрупнены, появляются гломеробластические скопления.

В гипергенных условиях и зонах разломов нефелин подвергается выветриванию с образованием калиевых гидрослюд, бейделлита, монтмориллонита, сапонита, цеолитов, халцедона, кварца. В процессе постмагматических и гидротермальных изменений по нефелину развиваются альбит, кальцит, содалит, канкринит, цеолиты, анальцит, серицит, мусковит, либнерит, а в некоторых случаях нефелин переходит в гидраты алюминия — гиббсит, бемит, диаспор.

По данным Т. Сахама, решетка нефелина имеет в своей основе структуру тридимита. При замещении тетраэдра кремнезема в тридимите тетраэдром алюминия и заполнения всех больших пустот атомами щелочных металлов — для уравнения потери положительного заряда, вызванного этим замещением, получается структура нефелина. Замещение кремния алюминием придает гексагональной оси полярный характер, который отсутствует в первоначальной структуре тридимита. Чистый натриевый нефелин, как показано Т. Сахамой, формируется только тогда, когда в среде кристаллизации нет калия. Поэтому наиболее полно состав нефелина отражает формула $\text{Na}_3\text{KAl}_4\text{Si}_4\text{O}_{16}$. Так как ион Ca^{2+} имеет приблизительно такой же размер, как ион K^+ , он может занять место Na^+ , в этом случае либо уменьшается количество щелочного металла, либо увеличивается отношение $\text{Al}:\text{Si}$.

Н. Боуэн еще в 1936 г. высказал предположение, что по составу нефелин представляет собой твердый раствор чистого нефелина ($\text{Na}_8\text{Al}_8\text{Si}_8\text{O}_{32}$), калиофилита (до 1942 г. идентифицировался с кальсилитом — $\text{K}_8\text{Al}_8\text{Si}_8\text{O}_{32}$), альбита ($\text{Na}_4\text{Al}_4\text{Si}_{12}\text{O}_{32}$) и анортита ($\text{Ca}_4\text{Al}_8\text{Si}_8\text{O}_{32}$). В настоящее время состав нефелина рассматривается в виде твердого раствора трех молекул: нефелина, кальсилита и кварца.

Особенности химического состава природных нефелинов таковы: 1) преобладание атомов кремния над алюминием, составляющее 0,3–16,9 %, в среднем 4,9 %; суммарное число атомов двух элементов обычно приближается к 16 на ячейку; 2) постоянный дефицит щелочей, изменяющийся в зависимости от отношения $\text{Na}:\text{K}$ от 1,1 до 12,0 % (в среднем 6,0 %); 3) постоянные элементы-примеси — кальций, магний, железо, вода, реже — титан, марганец, фосфор. По мнению Н.С. Самсоновой, возможен изоморфизм $\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Al}^{3+}$ (данные электронного парамагнитного резонанса нефелина и др.), а не только механическое загрязнение.

Химический состав нефелина непостоянен и изменяется в доволь-

но широких пределах (табл. 6) в зависимости от геологической обстановки, происхождения и состава пород (рис. 14), компонентом которых он является. В.П. Костюк, основываясь на большом сравнительном материале, доказал наличие сложной функциональной зависимости состава нефелина от таких главных факторов, как температурные условия кристаллизации и общий химизм среды. Он высказал предположение, что первый фактор предопределяет повышенное содержание кремнезема, а второй — соотношение между натрием и калием. Так, в высококалиевых породах нефелины наиболее насыщены кальсилитовой составляющей. В нефелинах из уртитов различных месторождений соотношение этих миналов мало меняется — нефелиновый минал (70—77%) резко преобладает над кальсилитовым (18—24%) и кварцевым (0—4%). В то же время в нефелине из существенно калиевой породы — сынырита — количество нефелинового минала снижается (до 59%), а кальсилитового возрастает (до 30% при кварцевом более 8%). Оптические константы нефелина отражают эти особенности его состава.

Зависимость состава нефелина от формационной принадлежности пород наглядно проявляется на диаграмме $(Na + K) - Ca - Al$ (рис. 15). Правое верхнее поле образуют точки нефелинов из нефелиновых пород щелочно-габброидной формации; им свойственны максимальные для нефелина содержания кальция и значительное преобладание алюминия над щелочами (низкий коэффициент агпаитности, или щелочной модуль). Крайняя правая точка принадлежит нефелину из берешитов рудопроявления Андрушкина Речка; заметно пониженные содержания щелочей отчасти объясняются загрязненностью вторичными минералами (для анализа отбирались реликты неизмененного нефелина, но полностью избавиться от вторичных продуктов не удалось).

Точки нефелинов из нефелиновых руд щелочно-салического формационного типа (Хибинский, Баянкольский, Сынырский и Сакунский массивы) расположены значительно ниже и левее поля щелочно-габброидной формации. Содержания кальция в них очень малы, а коэффициент агпаитности гораздо выше, чем у нефелинов щелочно-габброидной формации, и близок к единице (у хибинских нефелинов немного выше, у остальных — несколько ниже).

Состав нефелинов Мухальского и Нижне-Бурульзайского массивов, входящих в состав щелочно-габброидного сайженского комплекса, — промежуточный между нефелинами из пород щелочно-габброидной и щелочно-салических формаций (см. рис. 15). Относительные содержания кальция в них близки таковым в нефелинах из Горячегорского месторождения, а коэффициент агпаитности немного ниже 1 — примерно такой же, как у нефелинов Баянкольского и кальсилитов Сынырского и Сакунского месторождений. Возможно, промежуточный состав нефелинов Мухальского и Нижне-Бурульзай-

Таблица 6

Химический состав нефелинов из руд различных месторождений, %

Оксиды	1	2	3	4	5	6	7
SiO ₂	42,53	41,99	44,67	41,38	42,20	41,96	42,40
TiO ₂	0,03	0,02	—	—	0,07	—	—
Al ₂ O ₃	32,03	33,04	32,07	35,17	34,20	35,47	35,60
Fe ₂ O ₃	1,76	1,87	0,99	—	0,66	—	—
FeO	0,28	—	0,31	—	—	—	—
MnO	—	—	0,02	—	0,01	—	—
MgO	0,03	0,04	0,02	—	0,09	—	—
CaO	0,14	0,00	0,13	—	2,60	2,39	—
Na ₂ O	15,49	16,06	15,93	17,30	14,70	17,23	17,10
K ₂ O	6,94	6,90	4,77	6,15	4,80	2,95	4,90
Сумма	99,23	99,92	98,91	100,00*	99,33	100,0	100,0
<i>Составляющие нефелина</i>							
He	74,30	76,30	75,30	81,00	68,50	81,0	84,0
Kc	21,70	21,70	16,50	19,00	16,40	9,00	16,00
Ан	—	—	0,50	—	13,00	6,00	—
Кв	3,90	2,00	7,70	—	2,10	—	—

Продолжение таблицы 6

Оксиды	8	9	10	11	12	13	14	15
SiO ₂	46,30	46,27	47,10	44,10	42,95	43,40	43,10	41,02
TiO ₂	—	—	0,05	0,07	—	—	—	—
Al ₂ O ₃	34,77	33,21	31,50	31,80	33,30	33,80	34,09	33,75
Fe ₂ O ₃	0,13	0,37	0,65	2,60	0,01	—	—	0,11
FeO	—	—	0,01	0,03	—	—	—	—
MnO	—	—	0,11	0,09	—	—	—	0,07
MgO	—	—	0,11	0,09	—	—	—	0,07
CaO	1,00	1,36	1,60	2,30	1,01	1,20	0,94	2,80
Na ₂ O	14,10	14,30	14,40	12,10	16,63	15,50	15,99	15,57
K ₂ O	4,86	4,84	4,10	3,80	6,23	6,10	5,79	4,50
Сумма	101,16	100,35	99,52	96,89	100,13	100,0	99,91	97,82
<i>Составляющие нефелина</i>								
He	66,90	67,00	67,30	61,20	74,20	—	73,20	75,10
Kc	16,90	16,50	14,00	14,20	20,40	—	19,50	15,80
Ан	5,20	7,00	7,90	12,60	4,90	—	4,70	6,80
Кв	11,00	9,50	10,80	12,00	0,90	—	2,60	2,30

Продолжение таблицы 6

Оксиды	16	17	18	19	20	21	22
SiO ₂	43,10	43,88	43,40	42,00	41,60	38,50	38,60
TiO ₂	0,02	—	—	—	—	—	—
Al ₂ O ₃	33,90	32,97	34,40	34,00	34,30	33,00	32,90
Fe ₂ O ₃	0,25	0,20	—	0,20	0,40	0,20	0,40
FeO		0,21	—	—	—	—	—
MnO	Сл.	—	—	—	—	—	—
MgO	0,03	—	—	—	—	—	—
CaO	0,10	0,28	0,30	—	—	—	—
Na ₂ O	15,90	15,78	15,60	14,60	14,90	—	—
K ₂ O	6,10	5,55	6,30	9,20	9,00	28,40	28,30
Сумма	99,40	98,87	100,00	100,00	100,00	100,10	100,20

Составляющие нефелина

Не	74,60	73,80	77,7	69,0	70,4	—	—
Кс	21,00	19,00	20,6	28,7	28,2	100	100
Ан	0,10	1,40	1,7	—	—	—	—
Кв	4,30	5,70	—	2,3	1,4	—	—

Кристаллохимические формулы

1. (Na_{0,75}K_{0,22}Ca_{0,01})_{0,98}(Al_{0,94}Fe_{0,03}³⁺)_{0,97}Si_{1,05}O₄
2. (Na_{0,76}K_{0,21})_{0,97}(Al_{0,96}Fe_{0,03}³⁺)_{0,99}Si_{1,03}O₄
3. (Na_{0,77}K_{0,15})_{0,92}(Al_{0,94}Fe_{0,01}²⁺Fe_{0,02}³⁺)_{0,97}Si_{1,11}O₄
4. (Na_{0,81}K_{0,19})_{1,00}Al_{1,00}Si_{1,00}O₄
5. (Na_{0,65}K_{0,14}Ca_{0,31})_{1,10}(Al_{0,92}Fe_{0,01}³⁺)_{0,93}Si_{0,96}O₄
6. (Na_{0,81}K_{0,09}Ca_{0,06})_{0,96}Al_{1,02}Si_{1,02}O₄
7. (Na_{0,80}K_{0,15})_{0,95}Al_{1,02}Si_{1,03}O₄
8. (Na_{0,67}K_{0,15}Ca_{0,02})_{0,84}Al_{1,01}Si_{1,14}O₄
9. (Na_{0,69}K_{0,15}Ca_{0,03})_{0,87}Al_{0,97}Si_{1,15}O₄
10. (Na_{0,70}K_{0,13}Ca_{0,04})_{0,87}(Al_{0,93}Fe_{0,01}³⁺)_{0,94}Si_{1,18}O₄
11. (Na_{0,61}K_{0,13}Ca_{0,06})_{0,80}(Al_{0,98}Fe_{0,05}³⁺)_{1,03}Si_{1,16}O₄
12. (Na_{0,78}K_{0,20}Ca_{0,02})_{1,00}Al_{0,95}Si_{1,04}O₄
13. (Na_{0,74}K_{0,19}Ca_{0,03})_{0,96}Al_{0,98}Si_{1,06}O₄
14. (Na_{0,75}K_{0,18}Ca_{0,02})_{0,95}Al_{0,98}Si_{1,06}O₄
15. (Na_{0,76}K_{0,14}Ca_{0,07})_{0,97}Al_{1,00}Si_{1,03}O₄
16. (Na_{0,76}K_{0,20})_{0,96}Al_{0,98}Si_{1,06}O₄
17. (Na_{0,76}K_{0,18})_{0,94}Al_{0,96}Si_{1,09}O₄
18. (Na_{0,74}K_{0,19}Ca_{0,01})_{0,94}Al_{0,99}Si_{1,06}O₄
19. (Na_{0,70}K_{0,29})_{0,99}Al_{0,98}Si_{1,03}O₄
20. (Na_{0,71}K_{0,28})_{0,99}Al_{0,99}Si_{1,02}O₄
21. K_{0,96}Al_{1,02}Si_{1,02}O₄
22. K_{0,95}Al_{1,02}Si_{1,02}O₄

Примечание. Образцы: 1 — уртит [19]; 2 — апатит-нефелиновая порода [19]; 3 — уртит, Ловозерский массив [2]; 4 — нефелиновый концентрат, Хибинский массив; 5—6 — уртит, Кия-Шалтырское месторождение; 7—9 — плагиооклазовый ийолит, Горячегорское месторождение; 10 — полевощпатовый ийолит, Медведкинское рудопроявление; 11 — берешит, рудопроявление Андрушчина Речка; 12—14 — уртит, Мухальское месторождение; 15 — уртит, Дахунурское рудопроявление [14]; 16—17 — ювит, Баянкольское месторождение, по материалам Л.Л. Донченко; 18 — полевощпатовый уртит, Баянкольское месторождение; 19—20 — сыннырит [7]; 19 — Сыннырский массив, 20 — Сакунский массив; 21—22 — кальсилит из сыннырита [7]: 21 — Сыннырский массив, 22 — Сакунский массив.

* В табл. 6 и далее — анализы, где сумма оксидов составляет 100,00 %, пересчитаны за вычетом минералов-примесей.

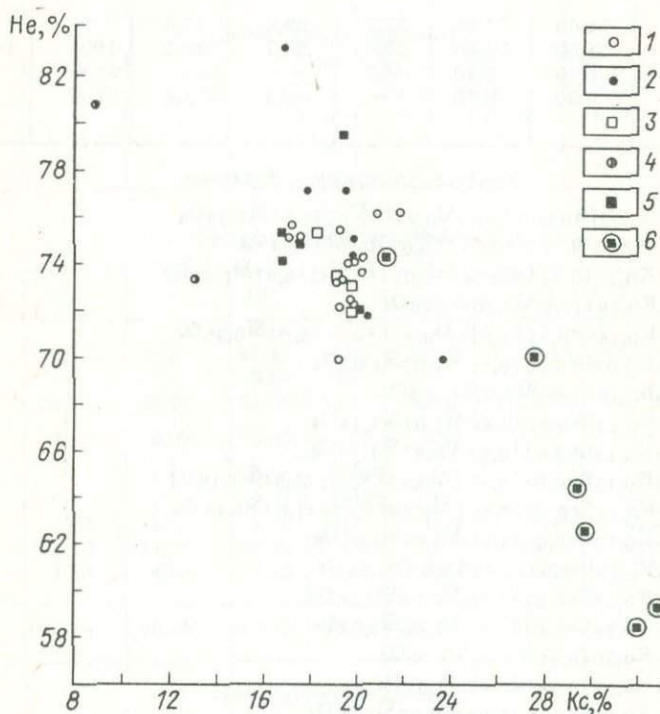


Рис. 14. Диаграмма вариаций содержаний минералов (Ne — нефелин, Kc — кальсилит) в нефелинах из пород различного состава:

1 — уртитов; 2 — ийолитов; 3 — мельтейгитов; 4 — гералитов; 5 — нефелиновых сиенитов; 6 — сынныритов

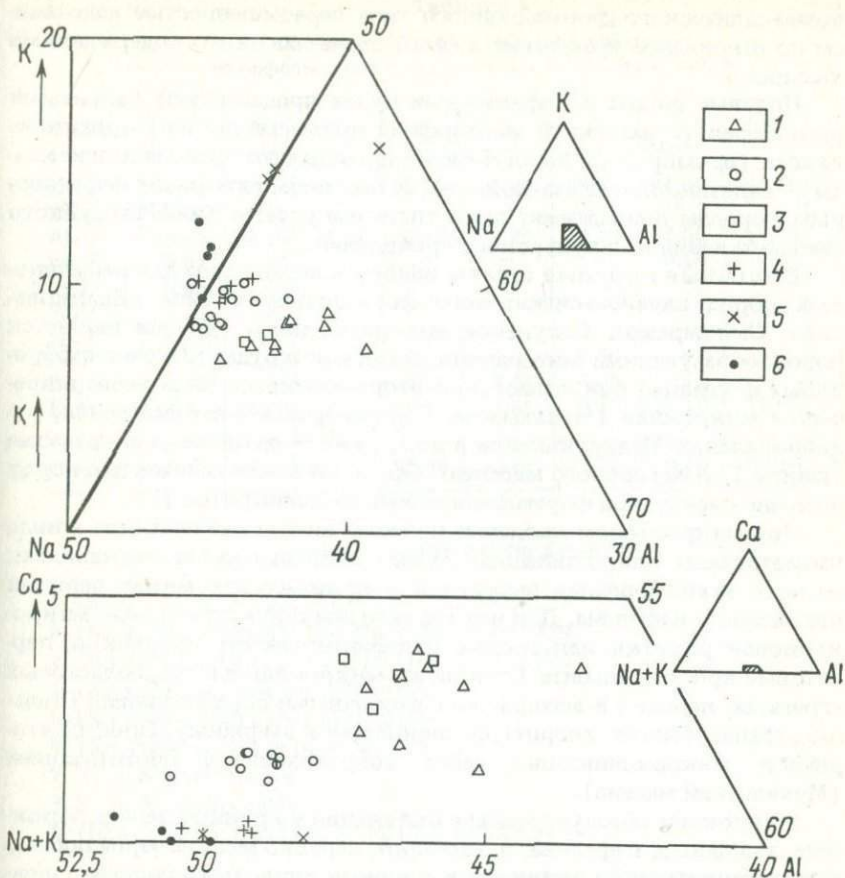


Рис. 15. Диаграммы состава нефелина из пород различной формационной принадлежности.

Породы формаций: 1-3 — щелочно-габброидной (месторождения и рудопроявления: 1 — Кузнецкого Алатау, 2 — Витимского нагорья, 3 — Дахунурское), 4-5 — щелочно-сиенитовой (4 — калиево-натриевого типа — Байанкольское, 5 — калиевого типа — Сынырское, Сакунское месторождения), 6 — агпитовых нефелиновых сиенитов (Хибинский и Ловозерский массивы)

ского массивов обусловлен влиянием процессов перекристаллизации, интенсивно проявленных в породах этих массивов [31] и вызвавших "очистку" нефелина и приближение его состава к стехиометрическому.

Таким образом, нефелины из нефелиновых пород щелочно-габброидных формаций заметно отличаются от нефелинов из пород ще-

лочно-салического формационного типа пересыщенностью алюминием по отношению к щелочам и (или) более высокими содержаниями кальция.

Полевые шпаты в нефелиновых рудах представлены калиевыми разностями (с различной изоморфной примесью натрия) и плагиоклазами (от лабрадора до альбита, но преобладают средние плагиоклазы — андезин, олигоклаз-андезин). К бесполовошпатовым нефелиновым породам принадлежат лишь типичные уртиты Кня-Шалтырского месторождения и Дахунурского проявления.

Щелочные полевые шпаты наиболее характерны для нефелиновых пород щелочно-сиенитового формационного типа (Баянкольское, Сынырское, Сакунское месторождения), где они являются пороодообразующими минералами, тогда как в рудах щелочно-габброидных формаций они играют роль второстепенных. Чаще всего встречается микроклин (Мухальское, Горячегорское месторождения, рудопроявления Медведкинское и др.), реже — ортоклаз и анортоклаз (ювиты Горячегорского массива). Ортоклаз более типичен для пород щелочно-сиенитовой формации и особенно сыныритов [7].

Под микроскопом калиевые полевые шпаты наблюдаются в виде изометричных или удлиненных зерен с неправильными очертаниями, мелких ксеноморфных выделений в промежутках между зернами пироксена и нефелина. Для них характерны структуры в виде микроклиновой решетки или тонких полисинтетических двойников, пертитовые вроски альбита. Отмечается микроклин и в гранобластовых агрегатах, нередко в ассоциации с вторичными образованиями (кальцит, гранат, биотит, хлорит) по пироксену и амфиболу. Процесс вторичной микроклинизации часто сопровождается биотитизацией (Мухальский массив).

Микроклин образует мелкие включения в крупных зернах пироксена, амфибола, нефелина, и, наоборот, нередко мелкие зерна последних пойкилитически включены в крупные зерна этого полевого шпата; часто он корродирует нефелин.

Плагиоклазы (лабрадор, андезин, олигоклаз, альбит) являются пороодообразующими минералами в некоторых разновидностях пород щелочно-габброидной формации Кузнецкого Алатау — в плагиоклазовых ийолитах-уртитах, а также в ювитах Горячегорского и Медведкинского массивов, в берешитах массива Андриюшкина Речка. Под микроскопом плагиоклаз наблюдается в виде удлиненных кристаллов, иногда с неровными краями, ксеноморфных выделений между зернами нефелина; отличается большим светопреломлением, четкой структурой полисинтетического двойникования. Встречается плагиоклаз (в основном — андезин) более поздней генерации, образующий каемки вокруг зерен пироксена на стыке его с нефелином.

Альбит отмечен практически во всех нефелиновых рудах. Чаще

Таблица 7

Химический состав полевых шпатов
из нефелиновых руд различных месторождений, %

Оксиды	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO ₂	63,73	62,06	67,89	65,06	65,90	66,10	64,00	64,20	64,00
TiO ₂	0,07	0,06	0,02	—	—	—	—	—	—
Al ₂ O ₃	18,30	19,28	18,27	18,15	18,80	19,40	18,50	18,70	19,20
Fe ₂ O ₃	0,81	0,69	—	—	—	—	0,10	0,20	0,31
FeO	0,08	0,09	0,29	—	—	—	—	—	—
MnO	—	Сл.	—	—	—	—	—	—	—
MgO	0,10	0,08	0,02	0,03	—	—	—	—	—
CaO	0,27	0,22	0,47	0,13	—	0,30	—	—	0,10
Na ₂ O	0,66	0,92	6,77	1,75	3,54	7,00	—	—	0,46
K ₂ O	14,55	14,49	6,66	14,75	11,56	6,40	17,10	17,00	15,50
Сумма	98,57	97,89	100,29	99,80	99,80	99,70	99,70	100,10	99,57

Кристаллохимические формулы

1. $(K_{0,87}Na_{0,06}Ca_{0,01}Fe_{0,02}^{3+})_{0,96}Al_{1,01}Si_{3,01}O_8$
2. $(K_{0,87}Na_{0,07}Ca_{0,01}Fe_{0,02}^{3+})_{0,97}Al_{1,07}Si_{2,94}O_8$
3. $(K_{0,37}Na_{0,58}Ca_{0,02}Fe_{0,01}^{2+})_{0,98}Al_{0,96}Si_{3,05}O_8$
4. $(K_{0,88}Na_{0,16})_{1,04}Al_{0,98}Si_{2,99}O_8$
5. $(K_{0,67}Na_{0,31})_{0,98}Al_{1,01}Si_{3,01}O_8$
6. $(K_{0,37}Na_{0,61}Ca_{0,01})_{0,99}Al_{1,01}Si_{2,99}O_8$
7. $K_{1,01}Al_{1,01}Si_{2,98}O_8$
8. $K_{1,00}Al_{1,01}Si_{2,98}O_8$
9. $(Na_{0,05}K_{0,92})_{0,97}(Fe_{0,01}^{3+}Al_{1,05})_{1,06}Si_{2,98}O_8$

Примечания: 1. Образцы: 1 — ювит, Хибины, [19]; 2 — сиенит-нефелиновая порода, Хибины, [19]; 3—6 — полевошпатовый уртит (3—5 — Мухальское месторождение, 6 — Баянкольское месторождение); 7—8 — сыннырит [7]: 7 — Сыннырский массив, 8 — Сакунский массив; 9 — сыннырит, Сакунский массив. 2. В образце 6 определено содержание H₂O, равное 0,50 %.

всего он имеет вторичное происхождение (пертиты, пойкилитовые включения в калиевом полевошпате).

Химический состав полевых шпатов (табл. 7) варьирует весьма значительно. Диапазон средних содержаний основных компонентов таков (в %): SiO₂ — 58—68; Al₂O₃ — 16—19; K₂O — 10—17. Иногда в одной и той же породе (полевошпатовые уртиты, ийолит-уртиты Мухальского месторождения) устанавливается наряду с андезином и

основной плагиоклаз — анортит, что, возможно, связано с составом первичной магмы, обогащенной кальцием.

Пироксены в нефелиновых породах почти всех месторождений и перспективных рудопроявлений представлены в основном клинопироксенами рядов эгирин — эгирин-фассаит, фассаит — диопсид — геденбергит и являются главными магматическими темноцветными минералами этих пород [6].

В шлифе пироксены более или менее отчетливо плеохроируют. В зависимости от состава окраска моноклинных пироксенов, меняется, иногда она неравномерна или зональна: так, зерна эгирин-салита из уртитов Хибинского массива имеют бесцветное или слабоокрашенное ядро и ярко-зеленую периферическую зону. Отмечаются индивиды с неправильным распределением окраски, когда один край окрашен гуще другого. Преохроируют хибинские пироксены по схеме $N_p > N_q$ (N_q — зеленовато-желтый, N_p — зеленый или синевато-зеленый). Вариации оптических констант клинопироксена из хибинских нефелиновых руд следующие: $N_q = 1,738 - 1,741$; $N_p = 1,711$, $N_q - N_p = 0,027 - 0,030$; $+2V = 83 - 90^\circ$; $cN_q = 60^\circ$. Пироксен (эгирин или эгирин-фассаит) ловозерских нефелиновых пород характеризуется более яркой окраской — зеленой, буровато-зеленой, буровой, часто зонален или пятнист за счет изменения интенсивности окраски. Его оптические константы следующие: $N_q = 1,798$; $N_p = 1,747$; $N_q - N_p = 0,051$; $-2V = 73^\circ$; $cN_q = 6^\circ$.

Заметно отличаются по форме выделений и окраске моноклинные пироксены из нефелиновых пород других месторождений. Пироксен из кия-шалтырского уррита представлен фассаитом, образующим довольно крупные ксеноморфные выделения, имеет характерную фиолетово-коричневатую или бледно-фиолетовую окраску, иногда зонален, со слабым плеохроизмом, нередко по краям зерен замещается керсутитом или эгирин-салитом. Оптические константы его варьируют в следующих пределах: $N_q = 1,726 - 1,735$; $N_p = 1,701 - 1,716$; $N_q - N_p = 0,019 - 0,025$; $+2V = 55 - 66^\circ$; $cN_q = 34 - 49^\circ$.

Значительное количество Fe_2O_3 в составе фассаита из кия-шалтырских уртитов (табл. 8) позволяет определить его как железистую разновидность — феррофассаит, где значительная часть Al замещена на Fe^{3+} , а также титан. От фассаита из нефелиновых пород других массивов он отличается повышенным содержанием Fe_2O_3 при несколько заниженном FeO. По схеме уточнения систематики пироксенов, предложенной И.В. Гинзбург, ему близок по характеристикам пироксен из полевошпатовых ийолитов Горячегогорского массива.

Среди пироксенов из дахунурских ийолит-уртитов и ювитов выделяются две генерации:

1) мельчайшие призмочки и иголочки эгирина и эгирин-салита в нефелине;

Таблица 8

Химический состав пироксенов
из нефелиновых руд различных месторождений, %

Оксиды	1	2	3	4	5	6
SiO ₂	50,81	52,04	44,56	42,37	48,36	43,80
TiO ₂	1,64	—	1,84	1,83	1,12	3,30
Al ₂ O ₃	1,65	—	7,07	7,87	2,25	6,60
Fe ₂ O ₃	7,77	21,82	5,72	16,00	—	10,60
FeO	7,71	—	8,16	3,28	19,07	10,00
MnO	0,41	0,51	0,20	0,31	0,53	—
MgO	8,89	6,88	8,54	6,14	5,47	5,20
CaO	16,75	13,25	22,68	22,24	19,38	19,20
Na ₂ O	3,58	5,26	0,72	—	1,75	1,30
K ₂ O	0,39	—	0,24	—	0,10	—
Сумма	99,60	99,76	99,73	100,04	98,03	100,0

Продолжение таблицы 8

Оксиды	7	8	9	10	11
SiO ₂	49,46	45,20	41,90	53,00	51,50
TiO ₂	0,22	1,50	1,80	0,60	0,20
Al ₂ O ₃	2,41	7,50	13,60	2,00	1,30
Fe ₂ O ₃	—	—	—	—	—
FeO	17,85	22,30	12,30	10,00	11,50
MnO	0,66	0,42	0,14	0,20	0,70
MgO	5,16	2,10	6,40	11,00	11,50
CaO	21,15	13,70	20,70	22,00	20,20
Na ₂ O	2,08	4,70	2,10	1,40	1,50
K ₂ O	0,06	1,60	0,40	—	—
Сумма	99,05	99,02	99,34	100,2	98,40

Кристаллохимические формулы

1. (Ca_{0,96}Na_{0,26})_{0,95}(Mg_{0,50}Fe_{0,25}²⁺Fe_{0,22}³⁺Mn_{0,01}Ti_{0,04}Al_{0,02})_{1,04} × (Si_{1,95}Al_{0,05})_{2,00}O₆
2. (Ca_{0,55}Na_{0,39})_{0,94}(Mg_{0,40}Fe_{0,23}²⁺Fe_{0,40}³⁺Mn_{0,01})_{1,04}Si_{2,01}O₆
3. (Ca_{0,93}Na_{0,05})_{0,98}(Mg_{0,49}Fe_{0,26}²⁺Fe_{0,17}³⁺Ti_{0,05}Al_{0,03})_{1,01} × (Si_{1,71}Al_{0,29})_{2,00}O₆
4. Ca_{0,94}(Mg_{0,36}Fe_{0,11}²⁺Fe_{0,47}³⁺Mn_{0,01}Ti_{0,05}Al_{0,04})_{1,04}(Si_{1,68}Al_{0,32})_{2,00}O₆
5. (Ca_{0,84}Na_{0,13})_{0,97}(Mg_{0,33}Fe_{0,46}²⁺Fe_{0,12}³⁺Mn_{0,01}Ti_{0,03}Al_{0,06})_{1,01} × (Si_{1,96}Al_{0,04})_{2,00}O₆

6. $(\text{Ca}_{0,81}\text{Na}_{0,10})_{0,91}(\text{Mg}_{0,30}\text{Fe}_{0,32}^{2+}\text{Fe}_{0,33}^{3+}\text{Ti}_{0,10})_{1,05}(\text{Si}_{1,73}\text{Al}_{0,30})_{2,03}\text{O}_6$
7. $(\text{Ca}_{1,15}\text{Na}_{0,14})_{1,29}(\text{Mg}_{0,28}\text{Fe}_{0,40}^{2+}\text{Mn}_{0,02})_{0,70}(\text{Si}_{1,81}\text{Al}_{0,10}\text{Fe}_{0,09}^{3+})_{2,00}\text{O}_6$
8. $(\text{Ca}_{0,59}\text{Na}_{0,36}\text{K}_{0,07})_{1,02}(\text{Mg}_{0,12}\text{Fe}_{0,67}^{3+}\text{Mn}_{0,01}\text{Ti}_{0,04}\text{Al}_{0,14})_{0,98} \times$
 $\times (\text{Si}_{1,79}\text{Al}_{0,21})_{2,00}\text{O}_6$
9. $(\text{Ca}_{0,85}\text{Na}_{0,15}\text{K}_{0,02})_{1,02}(\text{Mg}_{0,36}\text{Fe}_{0,35}^{3+}\text{Ti}_{0,05}\text{Al}_{0,21})_{0,97}(\text{Si}_{1,60} \times$
 $\times \text{Al}_{0,40})_{2,00}\text{O}_6$
10. $(\text{Ca}_{0,88}\text{Na}_{0,10})_{0,98}(\text{Mg}_{0,61}\text{Fe}_{0,32}^{2+}\text{Ti}_{0,01}\text{Al}_{0,07})_{1,01}(\text{Si}_{1,98}\text{Al}_{0,02})_{2,00}\text{O}_6$
11. $(\text{Ca}_{0,82}\text{Na}_{0,11})_{0,93}(\text{Mg}_{0,65}\text{Fe}_{0,37}^{2+}\text{Mn}_{0,02}\text{Al}_{0,02})_{1,06}(\text{Si}_{1,96}\text{Al}_{0,04})_{2,00}\text{O}_6$

Примечание. Образцы: 1 — ювит, Хибины [19]; 2 — нефелиновый концентрат, Хибинские месторождения; 3—4 — уртит, Кия-Шалтырское месторождение; 5—6 — плагиоклазовый ийолит, Горячегорское месторождение; 7 — уртит, Мухальское месторождение; 8 — полевошпатовый уртит, Баянкольский массив; 9 — уртит, Дахунурский массив; 10—11 — сыннырит: 10 — Сыннырский массив [7], 11 — Сакунский массив.

2) фассаит, образующий ксеноморфные выделения в уртитах и ийолит-уртитах. Оптические свойства преобладающего пироксена второй генерации варьируют в следующих пределах: $N_q = 1,733 - 1,754$; $N_p = 1,710 - 1,725$; $N_q - N_p = 0,023 - 0,030$; $+2V = 63^\circ$; $cN_q = 53^\circ$; плеохроизм: N_q — бурый с фиолетовым оттенком, N_p — зеленовато-коричневый.

В ийолит-уртитах забайкальских рудопроявлений развиты пироксены трех типов: фассаит, эгирин-салит и диопсид-геденбергит. Фассаит ксеноморфен по отношению к нефелину, имеет резкий плеохроизм от буровато-фиолетового по N_q до буроватого или зеленоватого по N_p . Гораздо чаще встречается эгирин-салит — в шлифе яркого зеленого цвета, почти всегда зональный со светло-зеленым, бесцветным (диопсидовым) или фиолетовым (фассаитовым) ядром. Оптические свойства эгирин-салита следующие: $N_q = 1,754 - 1,768$; $N_p = 1,725 - 1,729$; $N_q - N_p = 0,029$; $+2V = 67 - 68^\circ$; $cN_q = 50 - 68^\circ$.

В рудах Горячегорского месторождения установлены две разновидности пироксенов — фассаит, преобладающий в плагиоклазовых ийолитах, и ферросалит — в полевошпатовых уртитах. Нередко эти пироксены ассоциируют друг с другом, причем ферросалит развивается по фассаиту.

В ювит-уртитах Баянкольского месторождения отмечается зеленый пироксен с $N_q = 1,758$, $N_p = 1,728$. Химический состав его соответствует геденбергиту с заметной примесью эгиринового минала.

В лейкократовых сынныритах постоянно присутствует низконатриевый магнезиально-железистый клинопироксен типа $\text{Di}_{60}\text{Ged}_{40}\text{Эг}_{10}$, в мезосынныритах находится богатый натрием низкокальцие-

вый и бедномагнезиальный клинопироксен состава $\text{Di}_{10} \text{Гед}_{16} \text{Эг}_{74}$ [7].

Особенности пироксенов в породах конкретных месторождений и изменение их составов в однотипных породах в зависимости от формационной или региональной принадлежности выявляются при сопоставлении их химического состава (см. табл. 8). В составе пироксенов из нефелиновых руд почти всех рассмотренных объектов присутствует Na_2O (0,59–5,3 %). Самая низкая доля натриевого компонента — в кия-шалтырском фассаите, а самая высокая — в кольских (особенно ловозерских) пироксенах (эгирин, эгирин-салит). Максимально обогащены кальцием и глиноземом пироксены (фассаиты) из наиболее богатых глиноземом руд Кия-Шалтырского и Дахунурского месторождений: для них типичны также низкие содержания кремнезема (42–45 %); эти особенности можно считать характерными для "богатых" нефелиновых руд, связанных с группой пород щелочно-габброидной формации.

Сопоставление анализов пироксенов (см. табл. 8) выполнено с помощью диаграмм $\text{CaMg} - \text{NaFe}^{3+} + (\pm \text{Al}) - \text{CaFe}^{2+}$ и $\text{Mg} - \text{Ca} - \Sigma \text{Fe} + \text{Mn}$ [18]. Анализ диаграмм (рис. 16) позволяет отметить характерные особенности пироксенов из нефелиновых пород вышеописанных месторождений: 1) обогащенность кальцием — большая часть пироксенов относится к ряду диопсид — геденбергит (см. рис. 16, а); 2) наличие почти во всех пироксенах, хотя и в разных количествах, эгириновой составляющей (см. рис. 16, б).

Особенности пироксенов из уртит-якупирангитовых пород различных формаций подробно рассмотрены В.П. Кононовой, отчасти А.Ф. Ефимовым. Диаграмма (рис. 17) позволяет сопоставить общую железистость и коэффициент агпаитности, т. е. соотношение щелочных металлов и алюминия в пироксенах нефелиновых руд. При этом для коэффициента агпаитности использован логарифмический масштаб ввиду широкого диапазона его значений. На этой диаграмме точки пироксенов из нефелиновых пород щелочно-габброидной формации образуют нечетко выраженную полосу, вытянутую от середины вертикальной оси вправо — вверх. Лишь одна точка горячегорского салита расположена значительно ниже, а наибольшее скопление точек (12 из 18) размещается в левой части полосы со значениями общей железистости от 47 до 62 и коэффициента агпаитности от 0,12 до 0,38. В правой части полосы (общая железистость 64–76; коэффициент агпаитности 0,43–2,05) находятся точки (5) салитов из уртитов Мухальского, Дахунурского и полевошпатовых ийолитов Горячегорского массивов. Эти наиболее щелочные и железистые разновидности пироксенов обычно имеют позднее происхождение [14], первое же скопление точек отвечает раннемагматическим высокоглиноземистым и низкожелезистым фассаитам.

Геденбергит из ювит-уртитов Баянкольского массива близок к

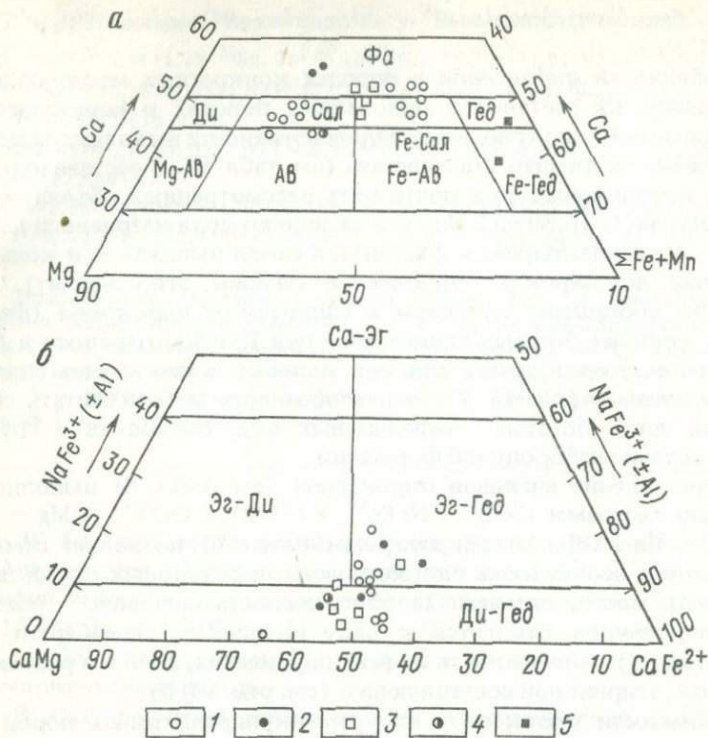


Рис. 16. Диаграммы (а — Mg — Ca — Σ Fe + Mn, б — CaMg — NaFe³⁺(±Al) — CaFe²⁺) состава пироксенов из различных нефелиновых пород:

1 — уртитов, 2 — ийолитов, 3 — мельтейгитов, 4 — тералитов, 5 — нефелиновых сиенитов. Пироксены: Фа — фассаит, Ди — диопсид, Сал — салит, Гед — геденбергит, Ав — авгит, Эг — эгирин (Fe — железистые, Mg — магниевые разновидности)

поздним салитам из пород предыдущей формации, отличаясь от них более высокой железистостью при одинаковых значениях коэффициента агпаитности. Точки пироксенов из ийолитов Хибинского массива образуют более ясно выраженную полосу (см. рис. 17). Эгирин-салитовый состав пироксенов обуславливает более четкую корреляцию их щелочности и железистости, чем у фассаитов щелочно-габброидной формации. Большая часть точек размещается в интервале со значениями общей железистости от 41 до 53 и коэффициента агпаитности от 4 до 12.

Точки пироксенов из сынныритов располагаются на продолжении хибинской полосы, характеризуя наиболее магниезильный из рассматриваемых пироксенов со значениями коэффициента агпаитности от 1,15 до 1,92.

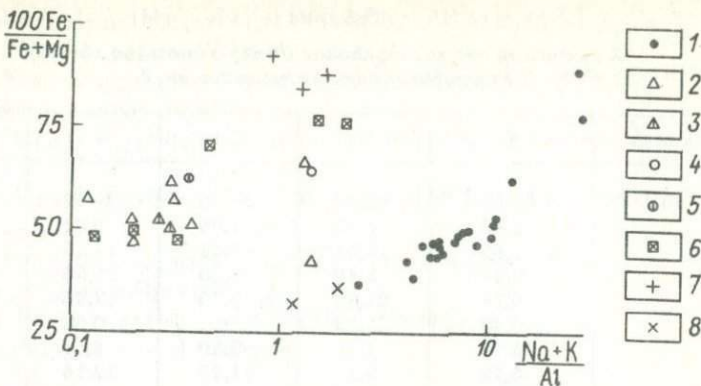


Рис. 17. Диаграмма соотношения общей железистости и коэффициента албитности в пироксенах из нефелиновых руд различных формаций:

1 — албитовой (Хибинский массив); 2–6 — щелочно-габброидной (2 — Кия-Шалтырское, 3 — Горячегорское, 4 — Мухальское месторождения, 5 — Нижне-Бурульзайское, 6 — Дахунурское рудопроявления); 7–8 — щелочно-сиенитовой (7 — калиево-натриевого типа, Баянкольское месторождение, 8 — калиевого типа, Сыннырское месторождение)

Амфиболы типичны для нефелиновых руд многих известных месторождений и проявлений, однако роль их различна, и генезис неоднозначен. В некоторых разновидностях пород они приобретают существенное значение, вплоть до породообразующего минерала, но в большинстве случаев развиваются как вторичные продукты замещения пироксена — в виде реакционных каемок, частичных и полных псевдоморфоз. В то же время нередко крупные индивидуализированные выделения, скопления удлиненно-призматических и ксеноморфных зерен. Характерны тесные сростания амфиболов с пироксенами, биотитом, гранатом.

Амфиболы образуются, по-видимому, на различных стадиях формирования интрузий: в позднемагматическую, кристаллизуясь позже пироксена и одновременно с ним, и послемагматическую, замещая пироксен. В породах некоторых рудопроявлений амфиболы отсутствуют или развиты лишь в виде вторичных каемок (Кия-Шалтырское, Дахунурское, Сыннырское). В породах Хибинского массива и массивов Витимского плоскогорья они играют существенную роль. В первых амфиболы представлены арфведсонитом; в шлифе минерал густо окрашен, с сильным плеохроизмом: N_q — зеленый, N_p — синевато-зеленый или буровато-зеленый; его оптические константы; $N_q = 1,673$; $N_p = 1,661$; $N_q - N_p = 0,012$; $cN_q = 52^\circ$.

В уртитах и ийолит-уртитах Мухальского и Нижне-Бурульзайского массивов основное значение имеют такие амфиболы, как гастингсит и феррогастингсит, в ийолит-уртитах Медведкинского массива —

Таблица 9

Химический состав амфиболов (1—4) и биотитов (5—10)
из руд различных месторождений, %

Оксиды	1	2	3	4	5
SiO ₂	50,66	36,82	38,60	34,92	32,98
TiO ₂	2,40	1,35	1,05	0,64	3,02
Al ₂ O ₃	2,45	12,54	13,85	14,55	13,35
Fe ₂ O ₃	2,44	8,46	8,30	11,56	11,83
FeO	9,78	21,92	18,70	17,56	21,51
MnO	0,48	1,36	—	0,65	0,59
MgO	15,73	1,55	3,50	3,07	2,25
CaO	6,12	9,86	11,20	12,14	3,73
Na ₂ O	5,46	3,02	2,98	2,12	0,81
K ₂ O	2,70	1,94	2,70	1,40	7,35
Сумма	98,22	100,57	100,88	98,61	97,42

Продолжение таблицы 9

Оксиды	6	7	8	9	10
SiO ₂	31,02	35,40	35,50	35,40	35,30
TiO ₂	1,95	1,50	3,00	5,20	5,70
Al ₂ O ₃	19,36	15,60	15,50	13,80	13,50
Fe ₂ O ₃	3,59	—	—	—	—
FeO	27,04	20,30	20,50	30,60	28,50
MnO	0,47	0,70	0,40	0,02	—
MgO	2,92	12,00	10,10	5,70	6,20
CaO	0,22	—	—	0,19	—
Na ₂ O	0,60	—	—	0,38	0,60
K ₂ O	9,02	9,40	9,50	9,30	9,10
Сумма	96,19	94,90	94,50	100,59	100,00

Кристаллохимические формулы

- $(Ca_{0,95}Na_{0,77}K_{0,49})_{2,21}(Mg_{3,40}Fe_{1,20}^{2+}Fe_{0,26}^{3+}Mn_{0,05}Ti_{0,10})_{5,01} \times$
 $\times (Si_{7,42}Al_{0,42}Ti_{0,16})_{8,00}O_{22}[(OH)_{1,75}O_{0,25}]_{2,00}$
- $(Ca_{1,70}Na_{0,95}K_{0,39})_{3,04}(Mg_{0,36}Fe_{3,00}^{2+}Fe_{1,01}^{3+}Mn_{0,18}Ti_{0,16}Al_{0,31})_{5,02} \times$
 $\times (Si_{5,94}Al_{2,06})_{8,00}O_{22}[(OH)_{1,50}F_{0,18}O_{0,32}]_{2,00}$
- $(Ca_{0,44}Na_{0,21}K_{0,12})_{0,77}(Mg_{0,19}Fe_{0,59}^{2+}Fe_{0,37}^{3+}Ti_{0,03}Al_{0,04})_{1,22} \times$
 $\times (Si_{1,44}Al_{0,56})_{2,00}O_6$
- $(Ca_{2,07}Na_{0,65}K_{0,28})_{3,00}(Mg_{0,73}Fe_{2,38}^{2+}Fe_{1,39}^{3+}Mn_{0,08}Ti_{0,07}Al_{0,35})_{5,00} \times$
 $\times (Si_{5,60}Al_{2,40})_{8,00}O_{22}[(OH)_{1,48}O_{0,52}]_{2,00}$

5. $(\text{K}_{0,90}\text{Na}_{0,13})_{1,03}(\text{Mg}_{0,23}\text{Fe}_{1,76}^{2+}\text{Fe}_{0,69}^{3+}\text{Ti}_{0,21}\text{Al}_{0,07})_{2,98} \times$
 $\times [(\text{Si}_{2,59}\text{Al}_{1,41})_{4,00}\text{O}_{10}](\text{OH})_{2,00}$
6. $(\text{K}_{0,94}\text{Na}_{0,09}\text{Ca}_{0,02})_{1,05}(\text{Mg}_{0,35}\text{Fe}_{1,87}^{2+}\text{Fe}_{0,21}^{3+}\text{Mn}_{0,03}\text{Ti}_{0,12}\text{Al}_{0,41})_{2,99} \times$
 $\times [(\text{Al}_{1,46}\text{Si}_{2,54})_{4,00}\text{O}_{10}](\text{OH})_{2,00}$
7. $\text{K}_{0,95}(\text{Mg}_{1,41}\text{Fe}_{1,21}^{3+}\text{Mn}_{0,03}\text{Ti}_{0,08}\text{Al}_{0,21})_{2,99}[(\text{Al}_{1,20}\text{Si}_{2,80})_{4,00}\text{O}_{10}] \times$
 $\times (\text{OH})_{2,00}$
8. $\text{K}_{0,95}(\text{Mg}_{1,19}\text{Fe}_{1,37}^{2+}\text{Mn}_{0,02}\text{Ti}_{0,18}\text{Al}_{0,26})_{3,02}[(\text{Al}_{1,19}\text{Si}_{2,81})_{4,00}\text{O}_{10}] \times$
 $\times (\text{OH})_{2,00}$
9. $(\text{K}_{0,96}\text{Na}_{0,01}\text{Ca}_{0,06})_{1,03}(\text{Mg}_{0,69}\text{Fe}_{1,87}^{2+}\text{Ti}_{0,32}\text{Al}_{0,13})_{3,01} \times$
 $\times [(\text{Al}_{1,11}\text{Si}_{2,89})_{4,00}\text{O}_{10}](\text{OH})_{2,00}$
10. $(\text{K}_{0,94}\text{Na}_{0,09})_{1,03}(\text{Mg}_{0,74}\text{Fe}_{1,74}^{2+}\text{Ti}_{0,35}\text{Al}_{0,17})_{3,00} \times$
 $\times [(\text{Al}_{1,12}\text{Si}_{2,88})_{4,00}\text{O}_{10}](\text{OH})_{2,00}$

Примечания. 1. Содержание H_2O определялось в образцах 2 и 10 (соответственно 1,39 и 1,10 %), а F — в образце 2 (0,36 %). 2. Образцы: 1 — полевошпатовый уртит, Хибиньы [19]; 2 — нефелиновый сиенит, Кузнецкий Алатау; 3 — полевошпатовый уртит, Мухальское месторождение, смесь (взаимопрорастание) пироксена и амфибола; 4 — ийолит, Нижне-Бурульзайский массив [3]; 5–6 — ийолит-уртит, Мухальское месторождение; 5 — внесена поправка на примесь пироксена (по содержанию CaO), 6 — по [7]; 7–8 — сыннырит, Сакунский массив [7]; 9–10 — полевошпатовый уртит, Баянкольское месторождение.

рихтерит (по данным рентгенографического анализа). Под микроскопом форма кристаллов амфибола из пород первых двух месторождений удлиненно-призматическая с зазубренными краями (иногда амфибол коорродирован биотитом, гранатом, альбитом, кальцитом); плеохроирует он по схеме: N_q — темно-бурый или темно-зеленый; N_p — желтовато-зеленый или же желтовато-бурый. Оптические константы изменяются в следующих пределах: $N_q = 1,700 - 1,715$; $N_p = 1,689 - 1,696$; $N_q - N_p = 0,019 - 0,020$; $-2V = 54 - 70^\circ$; $cN_q = 10 - 25^\circ$. Химический состав амфиболов варьирует в значительном диапазоне содержаний (табл. 9). Для определения типа амфибола из месторождений Забайкалья была использована схема номенклатуры амфиболов в зависимости от содержания в них Ca и Al [11], на которой амфиболы из нефелиновых руд Витимского плоскогорья располагаются в поле кальциевых амфиболов — баркевикита, гастингсита, паргасита, керсутита, чермакита (рис. 18). На трехкомпонентной диаграмме Ca — (Na + K) — Al (рис. 19) амфиболы из уртитов данной провинции обособлены в поле железистого гастингсита. Для высокощелочных и высокоглиноземистых пород — уртитов и ийолит-уртитов — характерен гастингсит с довольно высокой щелочностью $\text{Na} + \text{K}/\text{Na} + \text{K} + \text{Ca} = 42 - 46$ и железистостью ($f' = 77 - 88$).

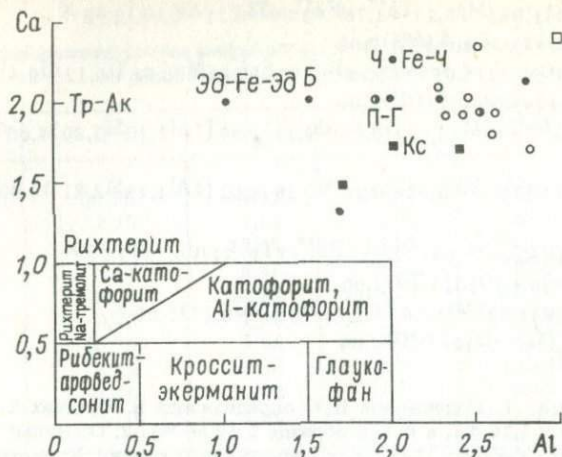


Рис. 18. Положение точек составов амфиболов из нефелиновых пород на схеме номенклатуры минералов:

П-Г — паргассит-гастингсит, Кс — керсутит, Б — баркевикит, Эд — эденит, Ч — чермакит (Fe — железистые, Са — кальциевые, Na — натриевые, Al — обогащенные алюминием разновидности) Тр-Ак — тремолит-актинолит. Остальные усл. обозначения см. на рис. 16

В состав амфиболов из нефелиновых руд входят летучие компоненты — такие, как фтор, хлор (в кольских соответственно 2,33—2,56 и 0,41 %) и H_2O (0,74—1,01 в кольских и 0,46—0,89 — в витимских).

Характерная особенность амфиболов из щелочных пород состоит в том, что нередко результаты химического анализа не могут быть пересчитаны на кристаллохимическую формулу амфибола — коэффициент при группе А оказывается существенно больше 3,00. Судя по справочной литературе, это явление распространено достаточно широко. Вместе с тем те же данные вполне удовлетворительно рассчитываются на кристаллохимическую формулу пироксена (см. табл. 9, образец 3). Видимо, в данном случае амфибол следует рассматривать как постериорный по пироксену, наследующий и соотношения минералообразующих элементов замещаемого минерала. Возможно также, что в процессе замещения возникают промежуточные соединения, когда структура пироксена еще не полностью преобразуется в структуру амфибола. В этом случае анализируемый материал, вероятно, можно рассматривать как смесь минералов — исходного и замещающего.

Сходна с ролью амфиболов и роль таких темноцветных минералов, как слюды и гранаты. Эти обычно второстепенные или акцессорные минералы в некоторых разновидностях пород содержатся в су-

щественно повышенном количестве. На Мухальском месторождении даже выделяют типы руд — биотитовые, амфибол-биотитовые уртиты и ийолит-уртиты, гранатсодержащие и гранатовые уртиты.

Для слюд и гранатов характерны совместные ассоциации, взаимные прорастания, но нередки и их мономинеральные скопления; для гранатов типичны цепочечные агрегаты. Выделяются слюды и гранаты, видимо, как в позднемагматическую, так и в постмагматическую стадию. При широком развитии поздних генераций цветных минералов (в породах Мухальского массива) они образуют кальцит-биотитовые, пироксен-кальцит-амфиболовые, гранат-пироксен-кальцитовые прожилки и зоны, нередко пегматоидной структуры.

Слюды — биотит-лепидомелан, характерные для нефелиновых пород, имеют разнообразные формы выделения — округлые, изометричные, удлинённые, чешуйчатые, призматические зерна распределены в породе неравномерно, образуя пятна, линзы, полосы, прослои и др.

В шлифах слюды из хибинских уртитов и ийолит-уртитов окрашены в красно-коричневый до черного цвет; плеохроизм отчетливый: N_q — коричневатобурый, почти черный, N_p — серовато-желтый, светло-коричневый; показатели преломления: $N_q = 1,689$; $N_p = 1,620$; $N_q - N_p = 0,060$; $-2V = 20 - 23^\circ$, что соответствует лепидомелану со значительным содержанием железистого минерала.

В нефелиновых породах Мухальского месторождения лепидомелан нередко является единственным цветным минералом. В шлифах этих пород иногда можно наблюдать лепидомелан двух генераций; ранний представлен желтовато-бурыми индивидуализированными относительно крупными выделениями, поздний — светло-зелеными мелкочешуйчатыми агрегатами, развивающимися по пироксену и амфиболу. Плеохроирует лепидомелан от темно-бурого (N_q) до желтовато-бурого (N_p), показатель преломления $N_m = 1,670$.

В полевошпатовых урритах Баянкольского месторождения широко распространен лепидомелан, являющийся основным цветным компонентом породы.

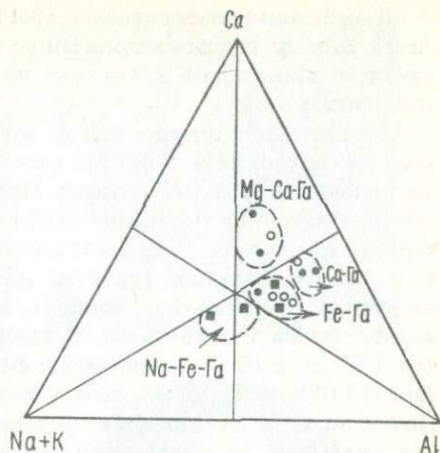


Рис. 19. Поля точек составов амфиболов на трехкомпонентной диаграмме.

Га — гастингсит; Mg-Ca — магнево-кальциевый, Ca — кальциевый, Fe — железистый, Na-Fe — натриево-железистый. Остальные усл. обозначения см. на рис. 16

В нефелин-кальсилитовых сиенитах (сынныритах) биотит относится наряду с клинопироксеном к основным породообразующим цветным минералам и отвечает по составу магнезиально-железистому лепидомелану.

Химический состав слюд из нефелиновых пород варьирует весьма значительно (см. табл. 9), иногда даже в пределах одного массива (например, слюды из уртитов Мухальского массива), что, видимо, объясняется генетическими особенностями. Одной из характерных черт рассмотренных слюд является их высокая железистость — как в калиево-натриевых (уртиты, ийолит-уртиты и ювиты), так и в калиевых (сынныриты) породах, а также довольно высокие содержания титана и глинозема. В слюдах постоянно присутствует H_2O (от 1,50 до 2,45 %), отмечаются фтор (0,21—0,24 %), хлор (0,03 %), сера (0,025—0,08 %) и очень редко оксид фосфора (0,01—0,58 %). Почти во всех слюдах фиксируются редкие щелочи — Rb, Cs и др., что указывает на образование их в поздние, заключительные стадии формирования пород.

Гранаты в нефелиновых рудах распространены широко. Отсутствуют они лишь в апатит-нефелиновых рудах Хибин; в других породах Хибинского и Ловозерского массивов обнаружены гроссуляр, андрадит и алмадин. В щелочных породах Кузнецкого Алатау установлен андрадит; в нефелиновых рудах Кия-Шалтырского и Горячегорского месторождений самостоятельные выделения граната редки, и он встречается в основном во вторичных образованиях по пироксену.

Наибольшим развитием пользуются гранаты в породах Мухальского и Нижне-Бурульского месторождений, где они представлены двумя генерациями: ранней и поздней. Ксеноморфные выделения граната магматической стадии отмечаются в промежутках между главными породообразующими минералами — пироксеном и нефелином, а в таких породах, как уртиты и ийолит-уртиты (Мухальский массив) при отсутствии пироксена гранат нередко играет роль цветного компонента, располагаясь между идиоморфными зернами нефелина. Поздний гранат слагает мелкозернистые агрегаты, корродирующие зерна пироксена, амфибола, биотита, иногда выделяется в тонких прожилках, пересекающих ранние минералы, в виде реакционных каемок вокруг цветных минералов. Гранат является постоянным, иногда главным минералом контактово-реакционных пород и скарнов во многих щелочных массивах. Окраска граната различна: желтовато-бурая, темно-бурая, коричневая, часто зональная в пределах отдельных зерен — с более темным ядром и светлыми краями. Показатели преломления гранатов колеблются в довольно широких пределах; в гранате из уррита от 1,775 до 1,827 (доля андрадитового минала 27—61 %); из ийолита — от 1,770 до 1,804 (20—

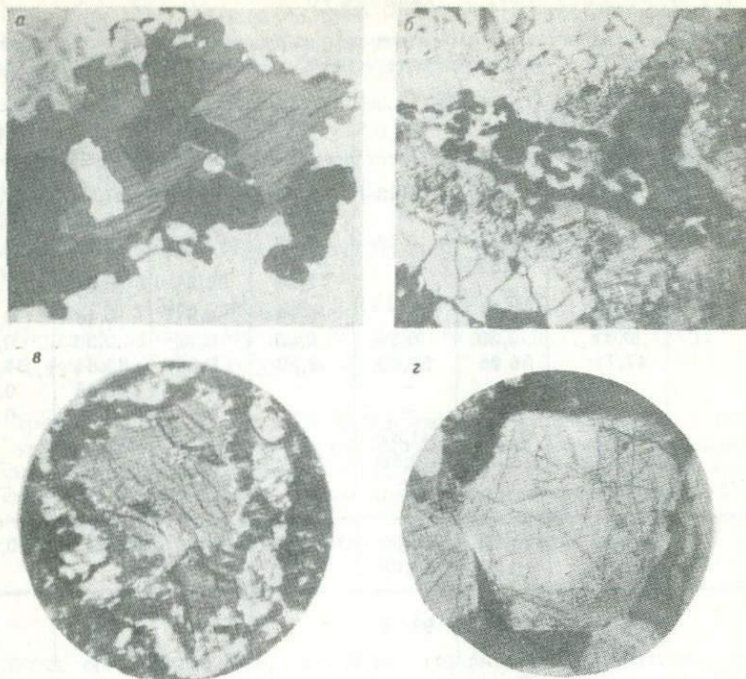


Рис. 20. Формы развития темноцветных и вторичных по ним минералов (микрофотографии шлифов) :

а — срастание граната (темное) с биотитом (увеличение 30, с анализатором); *б* — цепочечные агрегаты граната в сыннерите (увеличение 20, с анализатором); *в* — замещение пироксена амфиболом и биотитом (увеличение 30, с анализатором); *г* — замещение титан-фассаита агрегатом вторичных минералов (увеличение 51, без анализатора)

49,9 %); из метасоматической пироксен-кальцит-гранатовой породы — 1,825; из скарна — от 1,799 до 1,810.

Гранат как первичный породообразующий минерал известен во многих разновидностях нефелинсодержащих пород (святоноситы, бороланиты и др.), однако в нефелиновых породах-рудах резко преобладает гранат метасоматического генезиса — второй генерации.

В сыннеритах гранат встречен в виде индивидуализированных выделений, цепочечных агрегатов (рис. 20, *а*, *б*), часто в ассоциации и срастаниях с биотитом, сфеном, причем нередко биотит замещает гранат.

По своему составу гранат из нефелиновых пород разных месторождений относится к рядуgrossуляр — андрадит (табл. 10). В сын-

Таблица 10

Химический состав аксессуарных минералов из руд различных месторождений (в %): апатита (1-3), титаномагнетита (4-5), граната (6-12) и сфена (13)

Оксиды	1	2	3	4	5	6	7
SiO ₂	—	—	0,25	0,46	0,78	37,18	37,01
TiO ₂	—	—	—	21,94	10,96	1,62	1,11
Al ₂ O ₃	—	—	0,23	4,22	2,94	9,23	8,84
Fe ₂ O ₃	0,08	0,22	—	72,26	82,91	16,66	17,57
FeO	0,14	—	—	—	—	—	—
MnO	0,01	сл	сл	0,79	0,61	0,48	0,55
MgO	0,01	0,30	0,34	0,45	0,16	0,35	0,30
CaO	47,71	55,05	55,63	0,32	0,30	33,84	34,59
Na ₂ O	—	—	—	—	—	0,38	0,34
K ₂ O	—	—	—	—	—	0,05	0,03
P ₂ O ₅	39,64	41,47	41,81	—	—	—	—
F	3,14	2,88	2,59	—	—	—	—
Прочие	9,45	—	—	—	—	—	—
Сумма	100,18	100,20	100,85	100,44	98,66	99,79	100,34
O~F ₂	-1,39	-1,21	-1,09				
Итого	98,79	98,99	99,76				

Продолжение таблицы 10

Оксиды	8	9	10	11	12	13
SiO ₂	37,84	34,60	33,92	36,00	38,80	29,93
TiO ₂	1,25	3,90	5,42	4,10	1,07	37,95
Al ₂ O ₃	9,70	4,86	3,18	5,50	10,60	0,36
Fe ₂ O ₃	16,40	22,82	24,16	25,80	—	1,56
FeO	2,00	2,19	2,70	—	14,55	0,32
MnO	0,49	0,72	0,25	0,80	0,51	0,05
MgO	0,34	0,50	0,72	0,70	0,45	0,06
CaO	33,35	31,82	31,60	25,90	33,12	27,62
Na ₂ O	0,14	—	0,04	-0,24	0,15	0,40
K ₂ O	0,03	—	—	0,04	0,01	0,21
P ₂ O ₅	—	—	—	—	—	—
F	—	—	—	—	—	—
Прочие	—	—	—	—	—	—
Сумма	101,54	101,41	101,99	99,08	99,26	98,46

Кристаллохимические формулы

1. (Ca_{9,97}Fe_{0,02}²⁺)_{9,99}P_{5,93}O₂₄ [F_{1,75}(OH)_{0,25}] 2,00
2. (Ca_{10,00}Mg_{0,07})_{10,07}P_{5,99}O₂₄ [F_{1,52}(OH)_{0,48}] 2,00

3. $(\text{Ca}_9,96\text{Al}_0,02\text{Mg}_0,08)10,06(\text{P}_5,90\text{Si}_0,04)5,94\text{O}_{24}[\text{F}_{1,36}(\text{OH})_{0,64}]2,00$
4. $(\text{Ti}_0,64\text{Fe}_0,29^{2+}\text{Mn}_0,03\text{Mg}_0,03\text{Ca}_0,01)1,00(\text{Fe}_{1,29}^{2+}\text{Al}_0,19\text{Fe}_{0,51}^{3+})1,99\text{O}_4$
5. $(\text{Ti}_0,33\text{Fe}_0,65^{2+}\text{Mn}_0,02)1,00(\text{Fe}_{0,66}^{2+}\text{Al}_0,14\text{Fe}_{1,20}^{3+})2,00\text{O}_4$
6. $(\text{Ca}_2,93\text{Na}_0,05\text{Mn}_0,03\text{Mg}_0,03)3,04(\text{Al}_0,88\text{Fe}_{1,00}^{3+}\text{Ti}_0,09)1,97\text{Si}_3,00\text{O}_{12}$
7. $(\text{Ca}_2,96\text{Na}_0,04\text{Mn}_0,04\text{Mg}_0,02)3,05(\text{Al}_0,82\text{Fe}_{1,05}^{3+}\text{Ti}_0,07)1,94\text{Si}_2,96\text{O}_{12}$
8. $(\text{Ca}_2,83\text{Na}_0,01\text{Fe}_{0,13}^{2+}\text{Mn}_0,03\text{Mg}_0,03)3,03(\text{Al}_0,91\text{Fe}_{0,97}^{3+}\text{Ti}_{0,07}^{3+})1,95\text{Si}_3,00\text{O}_{12}$
9. $(\text{Ca}_2,79\text{Fe}_{0,15}^{2+}\text{Mn}_0,05\text{Mg}_0,06)3,05(\text{Al}_0,46\text{Fe}_{1,40}^{3+}\text{Ti}_0,14)2,00 \times$
- $\times (\text{Si}_2,85\text{Ti}_0,10)2,95\text{O}_{12}$
10. $(\text{Ca}_2,78\text{Fe}_{0,19}^{2+}\text{Mn}_0,05\text{Mg}_0,03)3,05(\text{Al}_0,31\text{Fe}_{1,50}^{3+}\text{Ti}_{0,14}^{3+})1,95 \times$
- $\times (\text{Si}_2,81\text{Ti}_0,19)3,00\text{O}_{12}$
11. $(\text{Ca}_2,36\text{Fe}_{0,51}^{2+}\text{Mn}_0,05\text{Mg}_0,08)3,00(\text{Al}_0,54\text{Fe}_{1,13}^{3+}\text{Ti}_{0,26}^{3+})1,93\text{Si}_3,06\text{O}_{12}$
12. $(\text{Ca}_2,87\text{Fe}_{0,05}^{2+}\text{Mn}_0,03\text{Mg}_0,05)3,00(\text{Al}_0,99\text{Fe}_{0,83}^{3+}\text{Ti}_{0,06}^{3+})1,88\text{Si}_3,12\text{O}_{12}$
13. $\text{Ca}_0,99(\text{Ti}_0,95\text{Fe}_{0,03}^{3+}\text{Fe}_{0,02}^{2+})1,00\text{Si}_1,00\text{O}_5$

Примечания. 1. Содержание H_2O в апатитах не определялось. 2. Образцы: 1 — уртит, Хибинь, [19]; 2—3 — кальцит-апатитовая порода: 2 — Дахунурский массив, 3 — Баянкольский массив [15]; 4—5 — плагиоклазовый ийолит, Горячегорское месторождение; 6—8 — уртит, Мухальское месторождение; 9—10 — скарнированная порода, Мухальское месторождение; 11 — сыннырит, Сакунский массив; 12 — уртит, Нижне-Бурульзайский массив; 13 — уртит [19].

ныритах он представлен, вероятно, мелаэитом с примесью гроссуляра. Наблюдаемая в шлифах зональность свидетельствует о том, что состав граната меняется даже в пределах одного фенокристалла.

Особенностью химического состава гранатов из уртитов и ийолит-уртитов Мухальского, Нижне-Бурульзайского месторождений является наличие в них щелочей (в основном натрия — табл. 10), что указывает на возможные изоморфные замещения в структуре граната, обычные для титаносодержащих гранатов из щелочно-ультраосновных пород. При этом следует учесть, что анализы гранатов выполнялись точечным рентгеноструктурным методом, поэтому вероятность загрязнения монофракции щелочными минералами (нефелин, микроклин, биотит) исключается.

Существенно, что в гранатах из нефелиновых пород Мухальского месторождения, Нижне-Бурульзайского и Дахунурского рудопроявлений содержится титан, количество которого колеблется от 0,79 до 1,3 %. В гранате из уртитов Мухальского и Дахунурского массивов концентрация его выше, чем в гранате из тех же пород Нижне-Бурульзайского массива. Самое высокое содержание TiO_2 (до 3,97 %) установлено в поздних гранатах из метасоматических гранат-кальцит-амфиболовых пород, возникающих в эндоконтакте уртитового тела с известняками (Мухальский массив). В гранатах из нефелиновых руд Мухальского и Нижне-Бурульзайского месторождений выявлена примесь редких элементов — циркония, иттрия и др.

Оливин отмечен в плагиоклазовых ийолитах Горячегорского месторождения и в берешитах рудопоявления Андриюшкина Речка. В первых он по составу отвечает феррогортонолиту, имеет слабую желтоватую окраску, неизменен или слабо замещен "рудной сыпью" и серпентином. Главная особенность его химизма — высокое содержание железа (по сравнению с магнием), а также значительное — марганца. В берешитах оливин обычно замещен иддингситом и серпентином.

Акцессорные минералы нефелиновых руд довольно однотипны (см. табл. 10). К наиболее характерным относится апатит. В основном он наблюдается в нефелине и пироксенах в виде включений удлиненных призматических, игольчатых кристаллов. Нередко в рудах встречается апатит более поздней генерации, представленный довольно крупными бочонкообразными зернами или их скоплениями в составе вторичных продуктов изменения.

Широко распространен апатит в Хибинах в породах мельтейгит-уртитового ряда, с которыми связаны тела апатит-нефелиновых руд; количество его в различных разновидностях пород резко варьирует. В апатит-нефелиновых породах апатит образует мономинеральные скопления изометричных зерен, оптические константы его следующие: $N_o = 1,636$; $N_e = 1,632$; $N_o - N_e = 0,04$.

Апатит в нефелиновых породах Кия-Шалтырского и Горячегорского месторождений играет существенную роль среди акцессорных минералов. По показателям светопреломления он относится к фтор-apatиту. В урритах и ийолит-урритах отмечаются довольно крупные кристаллы этого минерала, иногда секущие выделения всех остальных минералов. В эндо- и экзоконтактных разновидностях — полевошпатовых урритах, ийолитах и тералитах — количество апатита заметно возрастает. Показатели преломления апатита таковы: $N_o = 1,633 - 1,645$; $N_e = 1,630 - 1,640$.

Апатит выявлен во всех разновидностях пород Мухальского и Нижне-Бурульзайского массивов. Обычно развиты две генерации — первично-магматический и метасоматический апатит; встречается он в виде округлых довольно крупных зерен или их скоплений в ассоциации с поздним гранатом, сфеном, кальцитом и эпидотом. Повышенная концентрация апатита почти всегда связана с калишпатизацией урритов.

Апатит в урритах и ювитах месторождений Тувы в виде призматических кристаллов располагается в промежутках между породобразующими минералами, включен в них или образует зернистые агрегаты.

В сыньиритах содержание апатита варьирует от долей процента до нескольких процентов, значительно возрастая в фенитизированных породах.

Химический состав апатита из различных нефелиновых пород из-

меняется слабо (см. табл. 10), но состав содержащихся в нем элементов-примесей варьирует в зависимости от принадлежности к разным формациям и провинциям. Так, хибинским и ловозерским апатитам свойственны высокие содержания стронция и редкоземельных элементов, для апатита из уртитов Кия-Шалтырского месторождения редкоземельные элементы не типичны, а в тувинских они вообще отсутствуют.

Титаномагнетит является наиболее характерным рудным минералом щелочных пород, в том числе нефелиновых руд почти всех рассмотренных месторождений. В породах мельтейгит-уртитового ряда и в апатит-нефелиновых рудах Хибинского массива титаномагнетит образует неправильные выделения, выполняющие обычно мезостазис пород, иногда слагает небольшие слои и линзы с сидеронитовой структурой. В апатит-нефелиновых телах встречаются секущие жилы, выполненные титаномагнетитом.

Довольно часто зерна титаномагнетита окружены каймой из эпидота, сфена и биотита. Нередко титаномагнетит содержит вросстки ильменита, реже шпинели (плеонаст и герцинит). В урритах Кия-Шалтырского месторождения, помимо первично-магматических выделений, рудный минерал замещает пироксен в виде позднего митамиктного агрегата. В эндоконтактных зонах уртитовой интрузии роль этого минерала заметно возрастает. Большое количество титаномагнетита установлено в породах Горячегогорского месторождения (содержание его в ювите до 1 %, в плагиоклазовом ийолите — около 2 %).

В рудах Мухальского месторождения титаномагнетит и ильменит распространены меньше, чем апатит, но их количество резко возрастает в различных скарнированных разновидностях. В полированных шлифах выявлены неравномерное распределение титаномагнетита и ильменита, приуроченность их к цветным минералам и поздним метасоматическим образованиям, где они представлены мелкой и редкой вкрапленностью, а также микропрожилковыми выделениями и сплошными мелкозернистыми агрегатами размером в поперечнике до нескольких сантиметров. Титаномагнетит встречается почти повсеместно в теле уртитов, но среднее количество его невелико (до 0,04 %). В нем постоянно наблюдаются структуры распада твердого раствора с выделениями ильменита (от 5 до 20 %) в виде пластинок, игл, веретенец, линзочек, ориентированных в различных направлениях. В полевошпатовых урритах содержание титаномагнетита нередко значительно возрастает (до 1,5 %).

По соотношению основных минералообразующих компонентов — железа и титана — титаномагнетиты из нефелиновых пород довольно однородны (см. табл. 10); для титаномагнетита из горячегогорских плагиоклазовых ийолитов характерно повышенное содержание глинозема.

Магнетит, как правило, — вторичный минерал, развивается по

сульфидам и цветным породообразующим минералам и в свою очередь замещается гематитом.

Сульфиды в хибинских породах не отмечены; в нефелиновых породах Кия-Шалтырского и Горячегорского месторождений выявлено незначительное количество пирротина, пирита и халькопирита. В породах Мухальского месторождения и Нижне-Бурульзайского рудопоявления эти сульфиды являются постоянной акцессорной примесью. Форма их выделения (по аншлифам) — вкрапленная, прожилковая или струйчатая. Сульфиды чаще всего рассеяны в породах в виде мелких изометричных зерен или их скоплений размером до 3x5 см; отмечаются и прожилки мощностью до 5 мм. Крупные выделения сульфидов концентрируются в эндоконтакте интрузии уртитов с известняками, а также в неизмененных урритах. В ийолит-урритах сульфиды встречаются реже — в виде мелкой рассеянной вкрапленности; нередко возникает псевдосидеронитовая структура.

Сфен в породах Хибинского массива — один из самых распространенных акцессорных минералов, встречается почти повсеместно. Он распределен в породе относительно равномерно и только в трахитоидных урритах образует шлировые скопления, а в породах линзовидно-полосчатой текстуры — отдельные линзочки, слои и прожилки; чаще всего приурочен к скоплениям темноцветных минералов. Ранний сфен представлен идиоморфными зернами, его вторичные образования — игольчатыми или волокнистыми агрегатами, замещающими ильменит или титаномagnetит. Показатель светопреломления минерала очень высокий: $N_q = 2,09$; $N_p = 1,90$.

В кия-шалтырских и горячегорских нефелиновых рудах он встречается в виде единичных ромбовидных или веретенообразных зерен или узкой каемки вокруг титаномagnetита.

В урритах Мухальского и Нижне-Бурульзайского массивов сфен редок, обычно ассоциирует с гранатом и другими вторичными минералами в измененных участках породы. В тувинских нефелиновых рудах сфен также редок, в породах Сыннырского и Сакунского месторождений является характерным акцессорным минералом.

Повсеместное развитие клиноцоизита типично для пород Мухальского месторождения и в еще большей степени — Нижне-Бурульзайского рудопоявления. Это идиоморфные зерна призматического облика с изрезанными краями, реже радиально-лучистые агрегаты. В шлифах бесцветен, обладает сильной дисперсией оптических осей и аномальными цветами интерференции; иногда наблюдаются двойники. Приурочен клиноцоизит к участкам измененных пород.

Корунд встречен в кия-шалтырских урритах в единичных зернах, обычно в ассоциации с вторичными образованиями. В заметном количестве он обнаружен на юго-западном фланге Мухальского массива.

В шлифах бесцветен, отмечаются участки с пятнистой окраской,

слабо плеохроирует, характерна псевдоабсорбция. Образует крупные неправильные зерна, а также формы скелетного роста с резким положительным рельефом, хорошо выраженной отдельностью; ассоциирует с лейкократовыми минералами, диагностируется и рентгенографически.

Циркон в виде единичных зерен наблюдается в некоторых массивах Кузнецкого Алатау.

В урритах Кия-Шалтырского месторождения, кроме типичных акцессорных минералов, в отдельных образцах выявлены ильваит, ринколит, стильпномелан, диагностированные также рентгенографически.

Хибинские нефелиновые породы отличаются большим разнообразием акцессорных минералов, но, поскольку они не характерны для руд других месторождений и подробно описаны в литературе, здесь они не рассматриваются.

Вторичные минералы развиваются в основном по нефелину, но при определенной интенсивности и характере процесса захватывают также другие породообразующие минералы (см. рис. 20, в, з). Во всех изученных нефелиновых породах роль вторичных минералов заметна, а иногда настолько значительна, что меняет облик первичной породы (березиты массива Андрюшкина Речка, плагиоклазовые ийолиты и уртиты Горячегогорского, измененные и полевошпатовые уртиты Баянкольского массивов и др.) и существенно влияет на их качество как глиноземсодержащих руд. Характер вторичных процессов будет рассмотрен главным образом на примере Кия-Шалтырского месторождения. В табл. 11 приведен состав наиболее типичных вторичных минералов из пород различных массивов. Необходимо отметить, что набор вторичных минералов в нефелиновых породах довольно однотипен, однако геологическая обстановка, петрогенез, состав вмещающих пород, формационная принадлежность нефелиновых руд и другие факторы определяют особенности вторичных процессов и преобладание тех или других продуктов изменения.

Как показало изучение, наиболее типичным образованием является так называемый шпреуштейн, в той или другой степени развитый во всех щелочных массивах. Под микроскопом шпреуштейн наблюдается в виде буроватых пятнистых, ветвистых (по трещинам), заливчатых выделений (рис. 21, а, б), а также частичных и полных псевдоморфоз с реликтовыми включениями нефелина. Нередко процесс шпреуштейнизации захватывает также и калиевые полевые шпаты, реже плагиоклаз (Горячегогорский массив). Шпреуштейн представляет собой тонкозернистый агрегат, часто с оптически неразличимыми индивидами.

Название "шпреуштейн" впервые было дано натролитизированным авгитовым сиенитам района Лангсандфьорд (Норвегия). В Брегер в 1890 г. определил шпреуштейн как вторичный продукт, развивающийся по нефелину в виде мелкоагрегатной массы, состоящий в

Таблица 11

Химический состав вторичных по нефелину минералов из руд различных массивов (в %): содалита (1—5), натролита (6—12), анальцима (13—14), натродавина (15), канкринита (16—26), либнерита (27—32)

Оксиды	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO ₂	37,57	37,11	37,80	36,96	40,70	47,27	47,00	43,70
Al ₂ O ₃	31,59	31,11	30,40	30,56	29,10	26,87	26,60	25,70
Fe ₂ O ₃	0,32	1,08	—	0,32	0,60	—	—	0,21
FeO	—	—	—	—	—	—	—	—
MgO	2,85	—	—	0,20	0,11	—	—	—
CaO	2,05	—	—	1,71	0,56	0,23	—	3,64
Na ₂ O	21,74	24,12	23,40	24,10	21,90	15,07	16,20	14,50
K ₂ O	0,22	0,25	—	—	0,67	1,55	—	—
Cl(CO ₂)	3,68	6,94	6,10	5,59	6,36	—	—	(2,20)
H ₂ O(SO ₃)	—	0,24 (0,77)	0,40	1,66	—	9,49	10,20	9,40
Сумма	100,00	101,62	98,1	101,1	100,0	100,48	100,0	99,35

Продолжение таблицы 11

Оксиды	9	10	11	12	13	14	15	16
SiO ₂	46,70	46,70	47,00	47,37	47,30	55,02	38,10	37,70
Al ₂ O ₃	26,90	27,50	26,80	26,83	23,00	22,00	26,00	27,70
Fe ₂ O ₃	—	—	—	—	—	0,36	3,10	—
FeO	0,15	—	—	—	—	0,28	—	—
MgO	0,03	—	—	—	—	—	—	—
CaO	0,76	0,60	0,44	0,44	2,50	—	4,87	4,10
Na ₂ O	15,80	16,20	15,95	16,33	10,50	12,60	12,70	19,40
K ₂ O	0,20	—	0,36	—	—	—	3,40	0,77
Cl(CO ₂)	—	—	—	—	—	—	(2,30)	(6,00)
H ₂ O(SO ₃)	9,84	9,20	9,74	9,47	9,70	8,20	9,00	4,10
Сумма	100,38	100,2	100,29	100,0	93,00	98,45	100,07	99,77

Продолжение таблицы 11

Оксиды	17	18	19	20	21	22	23	24
SiO ₂	35,30	37,86	34,73	36,35	40,28	36,40	38,24	37,10
Al ₂ O ₃	29,00	26,08	27,15	30,85	27,50	25,20	27,77	28,30
Fe ₂ O ₃	—	1,72	—	—	0,09	1,50	0,25	0,24
FeO	—	0,44	—	—	—	—	—	—
MgO	—	0,16	—	0,15	2,60	—	—	—
CaO	4,80	4,23	—	3,92	0,14	7,90	4,42	4,53
Na ₂ O	20,00	21,33	12,43	18,84	18,60	15,20	13,36	19,90
K ₂ O	—	0,33	12,75	—	1,80	0,49	1,12	0,37
Cl(CO ₂)	3,80	6,28	—	4,34	2,88	4,22	4,55	4,29
H ₂ O(SO ₃)	7,10	2,37	5,92 (7,02)	5,46	5,43	7,38	6,35	5,27
Сумма	100,0	100,8	100,0	99,81	99,32	98,29	95,96	100,0

Продолжение таблицы 11

Оксиды	25	26	27	28	29	30	31	32
SiO ₂	36,60	35,98	45,63	46,80	43,50	44,50	47,52	44,70
Al ₂ O ₃	29,19	28,61	29,72	35,00	34,50	35,10	30,46	31,00
Fe ₂ O ₃	—	—	1,69	2,20	1,52	2,11	2,36	2,50
FeO	0,18	—	2,12	—	0,99	—	0,49	0,66
MgO	0,22	—	1,51	—	0,36	—	1,10	1,44
CaO	3,79	4,28	1,45	—	0,78	—	1,10	1,78
Na ₂ O	19,60	19,70	1,55	0,98	2,33	—	0,39	0,79
K ₂ O	0,12	—	8,65	9,65	8,56	9,50	9,10	6,70
Cl(CO ₂)	4,30	3,64	—	—	—	—	—	—
H ₂ O(SO ₃)	6,00	4,44	7,39 (0,20)	-5,10	7,79	5,20	7,30	9,30 (0,90)
Сумма	100,0	96,65	100,0	99,73	100,33	96,41	99,82	99,77

Кристаллохимические формулы

- $(Na_{3,39}K_{0,02}Ca_{0,18}Mg_{0,34})_{3,93}(Al_{3,00}Fe_{0,02}^{3+})_{3,02}Si_{3,04}O_{12}Cl_{0,5}$
- $(Na_{3,83}K_{0,03})_{3,86}(Al_{2,94}Fe_{0,06}^{3+})_{3,00}Si_{3,00}O_{12}[Cl_{0,96}(SO_3)_{0,04}]_{1,00} + 0,24H_2O$
- $Na_{3,81}Al_{3,01}Si_{3,17}O_{12}[Cl_{0,89}(OH)_{0,11}]_{1,00} + nH_2O$
- $(Na_{3,87}Ca_{0,15}Mg_{0,02})_{4,04}(Al_{2,95}Fe_{0,02}^{3+})_{2,97}Si_{3,03}O_{12}[Cl_{0,77}(OH)_{0,23}]_{1,00}$
- $(Na_{3,69}Mg_{0,01})_{3,70}(Al_{2,82}Fe_{0,04}^{3+})_{2,86}Si_{3,40}O_{12}Cl_{1,03}$
- $(Na_{1,85}Ca_{0,01}K_{0,13})_{1,99}Al_{2,01}Si_{3,01}O_{10}2H_2O$
- $Na_{2,00}Al_{2,00}Si_{3,01}O_{10}2H_2O$
- $(Na_{1,91}Ca_{0,06})_{1,97}Al_{2,05}Si_{2,97}O_{10}2H_2O + 0,6H_2O$
- $(Na_{1,94}Ca_{0,05})_{1,99}Al_{2,00}Si_{3,00}O_{10}2H_2O$
- $(Na_{1,98}Ca_{0,04})_{2,02}Al_{2,03}Si_{2,98}O_{10}1,93H_2O$
- $(Na_{1,96}Ca_{0,03}K_{0,02})_{2,01}Al_{2,00}Si_{2,99}O_{10}2H_2O$
- $Na_{2,00}Al_{2,00}Si_{3,00}O_{10}2H_2O$
- $(Na_{0,83}Ca_{0,11})_{0,94}Al_{1,11}Si_{1,94}O_6H_2O + 2,4H_2O$
- $(Na_{0,92}Fe_{0,01}^{2+})_{0,93}(Al_{0,98}Fe_{0,01}^{3+})_{0,99}Si_{2,08}O_6H_2O$
- $(K_{0,73}Na_{4,25}Ca_{0,88})_{5,86}[(Al_{5,17}Fe_{0,40}^{3+})_{5,57}Si_{6,43}O_{24}](CO_3)_{0,67}5,06H_2O$
- $(K_{0,16}Na_{6,42}Ca_{0,75}Fe_{0,10}^{2+})_{7,43}[Al_{5,56}Si_{6,44}O_{24}](CO_3)_{1,39}2,33H_2O$

17. $(\text{Na}_{6,66}\text{Ca}_{0,88})_{7,54} [\text{Al}_5,90\text{Si}_6,08\text{O}_{24}] (\text{CO}_3)_{0,70} 2,04\text{H}_2\text{O}$
18. $(\text{Na}_{7,12}\text{Ca}_{0,78}\text{Mg}_{0,04}\text{Fe}_{0,06}^{2+})_{8,00} [\text{Al}_5,28\text{Fe}_{0,20}^{3+}\text{Si}_6,52\text{O}_{24}] (\text{CO}_3)_{1,71} 1,3\text{H}_2\text{O}$
19. $(\text{K}_{2,93}\text{Na}_{4,35})_{7,28} [\text{Al}_5,78\text{Si}_6,29\text{O}_{24}] (\text{SO}_3)_{0,95} 3,5\text{H}_2\text{O}$
20. $(\text{Na}_{6,02}\text{Ca}_{0,69}\text{Mg}_{0,04})_{6,75} [\text{Al}_5,99\text{Si}_6,01\text{O}_{24}] (\text{CO}_3)_{0,97} 3\text{H}_2\text{O}$
21. $(\text{K}_{0,37}\text{Na}_{5,94}\text{Ca}_{0,45}\text{Mg}_{0,03})_{6,79} [\text{Al}_5,35\text{Si}_6,64\text{O}_{24}] (\text{CO}_3)_{0,64} 3\text{H}_2\text{O}$
22. $(\text{K}_{0,05}\text{Na}_{5,27}\text{Ca}_{1,51})_{6,83} [(\text{Al}_5,31\text{Fe}_{0,19}^{3+})_{5,50}\text{Si}_6,50\text{O}_{24}] (\text{CO}_3)_{1,01} 4,4\text{H}_2\text{O}$
23. $(\text{K}_{0,24}\text{Na}_{5,69}\text{Ca}_{0,80})_{6,73} [(\text{Al}_5,53\text{Fe}_{0,02}^{3+})_{5,55}\text{Si}_6,47\text{O}_{24}] (\text{CO}_3)_{1,00} 3,5\text{H}_2\text{O}$
24. $(\text{K}_{0,08}\text{Na}_{6,57}\text{Ca}_{0,83})_{7,48} [(\text{Al}_5,68\text{Si}_6,33\text{O}_{24}] (\text{CO}_3)_{1,00} 3\text{H}_2\text{O}$
25. $(\text{K}_{0,02}\text{Na}_{6,41}\text{Ca}_{0,41})_{6,84} [\text{Al}_5,80\text{Si}_6,18\text{O}_{24}] (\text{CO}_3)_{1,00} 4,8\text{H}_2\text{O}$
26. $(\text{Na}_{6,60}\text{Ca}_{0,78})_{7,38} [\text{Al}_5,76\text{Si}_6,24\text{O}_{24}] (\text{CO}_3)_{0,86} 2,5\text{H}_2\text{O}$
27. $(\text{K}_{0,77}\text{Na}_{0,21}\text{Ca}_{0,11})_{1,09} (\text{Mg}_{0,15}\text{Fe}_{0,12}^{2+}\text{Fe}_{0,09}^{3+}\text{Ti}_{0,01}\text{Al}_{1,59})_{1,96} \times$
 $\times [(\text{Al}_{0,84}\text{Si}_{3,16})_{4,00}\text{O}_{10}] (\text{OH})_2 + 3\text{H}_2\text{O}$
28. $[(\text{H}_3\text{O})_{0,05}\text{K}_{0,82}\text{Na}_{0,13}]_{1,00} (\text{Al}_{1,90}\text{Fe}_{0,10}^{3+})_{2,00} [(\text{Al}_{0,86}\text{Si}_{3,14})_{4,00} \times$
 $\times \text{O}_{10}] (\text{OH})_2$
29. $(\text{K}_{0,76}\text{Na}_{0,30}\text{Ca}_{0,04})_{1,10} (\text{Mg}_{0,04}\text{Fe}_{0,06}^{2+}\text{Fe}_{0,07}^{3+}\text{Al}_{1,83})_{2,00} \times$
 $\times [(\text{Al}_{0,98}\text{Si}_{3,02})_{4,00}\text{O}_{10}] (\text{OH})_2 + 3,5\text{H}_2\text{O}$
30. $[(\text{H}_3\text{O})_{0,13}\text{K}_{0,83}]_{0,96} (\text{Al}_{1,89}\text{Fe}_{0,11}^{3+})_{2,00} [(\text{Al}_{0,94}\text{Si}_{3,06})_{4,00}\text{O}_{10}] (\text{OH})_2$
31. $[(\text{H}_3\text{O})_{0,08}\text{K}_{0,79}\text{Na}_{0,05}\text{Ca}_{0,08}]_{1,00} (\text{Mg}_{0,11}\text{Fe}_{0,03}^{2+}\text{Fe}_{0,11}^{3+}\text{Al}_{1,75})_{2,00} \times$
 $\times [(\text{Al}_{0,72}\text{Si}_{3,28})_{4,00}\text{O}_{10}] (\text{OH})_2 + 2,4\text{H}_2\text{O}$
32. $[(\text{H}_3\text{O})_{0,17}\text{K}_{0,59}\text{Na}_{0,11}\text{Ca}_{0,13}]_{1,00} (\text{Mg}_{0,14}\text{Fe}_{0,12}^{3+}\text{Fe}_{0,04}^{2+}\text{Ti}_{0,04}\text{Al}_{1,66})_{2,00} \times$
 $\times [(\text{Al}_{0,90}\text{Si}_{3,10})_{4,00}\text{O}_{10}] (\text{OH})_2 + 3,9\text{H}_2\text{O}$

Примечание. Образцы: 1 — апатит-нефелиновая порода, Хибины [19]; 2—4 — уртит: 2 — Хибинский массив*, 3—4 — Кия-Шалтырское месторождение; 5 — полевошпатовый уртит, Баянкольское месторождение (внесена поправка на примесь нефелина); 6—7 — уртит: 6 — Кукисвумчоррское месторождение*, 7 — Кия-Шалтырское месторождение; 8 — из жилы в уртите, Кия-Шалтырское месторождение (внесена поправка на примесь кальцита по количеству CO_2); 9—10 — полевошпатовый уртит, Баянкольское месторождение, по Л.Л. Донченко; 11—12 — пегматоидные фойяиты, Октябрьский массив; 13 — уртит, Хибинский массив; 14 — образец Минералогического музея АН СССР; 15 — ювит-уртит, Баянкольское месторождение; 16 — уртит, Хибинский массив; 17 — ювит-уртит, Баянкольское месторождение; 18 — полевошпатовый уртит, Мухальское месторождение [12]; 19 — сыннырит, Сакунское месторождение; 20—21 — пегматоидный фойяит, Октябрьское месторождение; 22 — полевошпатовый уртит, Мухальское месторождение; 23 — уртит, Хибины [19]; 24 — ювит-уртит, Баянкольское месторождение; 25 — сыннырит, Сыннырское месторождение [7]; 26 — мариуполит, Октябрьское месторождение; 27—28 — уртит: 27 — Ловозерское месторождение [2], 28 — Кукисвумчоррское месторождение*; 29—32 — апатит-нефелиновая порода: 29—30 — Кукисвумчоррское месторождение* (30 — оксиневый мусковит), 31 — Расвумчоррское месторождение*, 32 — Юкспорское месторождение*.

* По материалам Кольского филиала АН СССР.

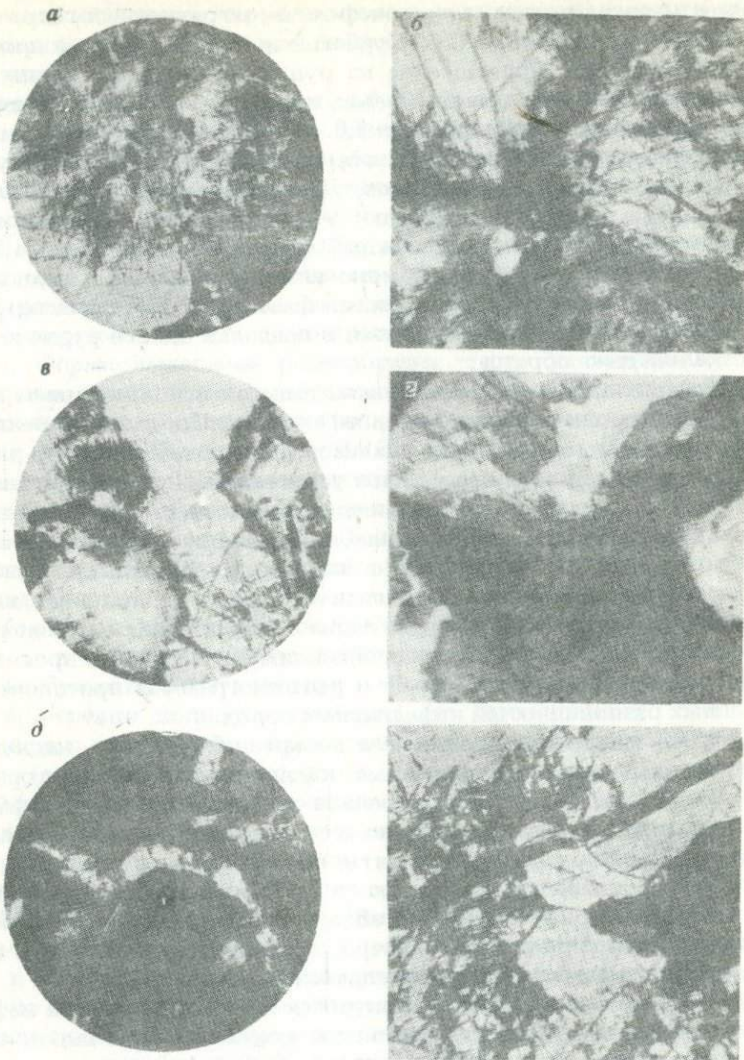


Рис. 21. Формы развития вторичных минералов по нефелину (микрофотографии шлифов):

а — мелкозернистые агрегаты шпреуштейна на стыке зерен нефелина (увеличение 25, с анализатором); *б* — потоки, пятна шпреуштейна с неразличимыми индивидами (увеличение 51, без анализатора); *в* — зональные структуры выделений — укрупненные, перекристаллизованные агрегаты в центральной части и тонкозернистые — по периферии (увеличение 30, без анализатора); *г* — выделения томсонита (темно-серое) на стыке зерен нефелина (светло-серое) и пироксена (черное; увеличение 51, без анализатора); *д* — келифитовая каемка канкринита (светлое) на стыке зерен нефелина и пироксена (увеличение 51, с анализатором); *е* — секущие прожилки минералов поздней генерации (увеличение 80, с анализатором)

основном из натролита и гидронфелина, загрязненных гидроксидами железа и алюминия. С.С. Курбатов и А.Ф. Михайлова приводят расчетный состав шпреуштейна из руд Расвумчоррского апатит-нефелинового месторождения (в %): натролит — 59,5; либнерит — 33,8; гидрогётит — 1,5; бёмит — 2,6. А.Д. Эдгар по результатам рентгенографического изучения 16 образцов приходит к выводу, что они состоят из смеси минералов. Данные авторов, исследовавших нефелиновые руды, подтверждают это заключение; в большинстве случаев шпреуштейн имеет сложный состав, является смесью минералов, однако может быть и мономинеральным или в нем может преобладать та или иная минеральная фаза. При этом характер и состав шпреуштейна могут изменяться в пределах одного рудного тела, участка или даже образца.

Изучение шпреуштейна возможно только с использованием комплекса физико-химических методов анализа. По данным рентгенографического и термического анализов шпреуштейнов из руд различных месторождений, в его составе установлены натролит, анальцит, канкринит, томсонит, кальцит, содалит, либнерит и мусковит, а также диаспор, бёмит, гиббсит, альбит, каолинит и пренит. Характерно, что зернистость шпреуштейна изменчива, в отдельных участках он более раскристаллизован, различимы отдельные индивиды, иногда выделяются агрегаты и крупные зерна составляющих его минералов (см. рис. 21, в). Особенности состава шпреуштейна четко проявляются на термограммах (см. гл. 6) и рентгенограммах протолок изоморфных разновидностей нефелиновых пород.

Эти же минералы, входящие в состав шпреуштейна, индивидуализированные или агрегированные, являются типичными вторичными продуктами замещения нефелина во всех массивах. Наиболее распространены цеолиты и обычно ассоциирующий с ними анальцит. В кия-шалтырском уртите цеолиты представлены натролитом, томсонитом и кальциевой разновидностью — шабазит-стильбитом. Натролит часто образует призматические, таблитчатые зерна, лучистые пластинчатые агрегаты и удлиненно-аллотриоморфные выделения. Его оптические константы соответствуют справочным данным.

Томсонит, как и натролит, приурочен к контактам зерен нефелина между собой и особенно часто — к контактам их с пироксеном, трещинам в нефелине, наблюдается в виде буроватых изометричных или сфероидальных зерен (см. рис. 21, г); при большом увеличении видно, что они имеют как бы сетчатое строение, что создает впечатление тончайшего прорастания другим минералом. Иногда в томсоните заметны включения, напоминающие пертиты распада. Оптические константы: $N'_q = 1,549$; $N'_p = 1,532$; $N_q - N_p = 0,017$; погасание прямое, оптически положительный или отрицательный $2V = 60-90^\circ$. Вероятно, минерал представляет собой твердый раствор или изоморфную смесь двух компонентов — натролита и томсонита. Данные

фазово-химического, термического и рентгенографического анализов подтверждают его принадлежность к разновидности этого ряда — натриевому томсониту.

Анальцит встречается повсеместно в виде скоплений изометричных и пластинчатых зерен с низкими показателями преломления ($N_o = 1,487$, $N_e = 1,486$), изотропных или слабо двупреломляющих, нередко с секториальным погасанием; диагностируется рентгенографически.

Шабазит-стильбит образует келифитовые структуры вокруг выделений нефелина, замещающая его до появления полных псевдоморфоз; развивается также по томсониту на стыке последнего с нефелином и пироксеном; иногда содержит включения канкринита и анальцита. Форма выделений разнообразна — это удлиненно-аллотриоморфные, волокнистые, розетко- и сноповидные агрегаты, ветвистые скопления по трещинам в нефелине. Оптические константы: $N_q = 1,518$; $N_p = 1,503$; $N_q - N_p = 0,015$; $c N_q = 5-10^\circ$. Диагностируется термографически, более точные исследования затруднены из-за тесных сростаний с другими вторичными минералами.

В породах некоторых рудопоявлений обнаружены и другие разновидности цеолитов — десмин (Сакунский массив), филлипсит, натродавин.

Карбонат-канкринит является одним из наиболее распространенных вторичных минералов. Он развивается по нефелину в виде гнездобразных, розетковидных, мелкозернистых мозаичных агрегатов, нередко полностью замещающая его, прожилков по спайности, пятнистых выделений; образуется также по полевому шпату, содалиту (апатит-нефелиновые руды Хибин). Очень часто отмечаются келифитовые каемки канкринита (см. рис. 21, δ), реакционные зоны на контакте нефелина и кальцита. Иногда канкринит встречается в виде отдельных обособлений — таблитчатых, ксеноморфных довольно крупных (до 5 мм) зерен.

В породах Мухальского и Нижне-Бурульзайского массивов канкринит распространен широко и представлен несколькими генерациями, в том числе первично-магматической. Он замещает нефелин не только на авто- и постмагматических стадиях, но, видимо, и в позднемагматический этап формирования интрузий. В шлифах обычно бесцветен, иногда буроватый, оптические константы отвечают карбонат-канкриниту.

В сыныритах обнаружен вторичный минерал, точных аналогов которого не найдено в литературе. Макроскопически в образцах он наблюдается в виде снежно-белых выделений со слабоволокнистой структурой, под микроскопом — в виде гнездобразных обособлений, сложенных розетковидными и радиально-лучистыми агрегатами шестоватых зерен, характеризующихся низким светопреломлением ($N'_q = 1,498$; $N'_p = 1,496$) и слабым двупреломлением. Минерал об-

ладает совершенной спайностью, совпадающей с удлинением зерен, прямым погасанием, отрицательным удлинением, оптически одноосный, отрицательный. Рентгенографически установлено его сходство с синтетическим натриево-калиевым канкринитом (табл. 12), обнаруженным в виде наростов на аппаратуре глиноземного производства. По результатам анализа с использованием микросонда* (см. табл. 11) сделано предварительное заключение о том, что минерал может быть отнесен к группе канкринита и назван калиевым сульфат-канкринитом. Точнее минерал в настоящее время не диагностирован в связи с трудностью выделения монофракции для проведения монокристаллической съемки. Приблизительная кристаллохимическая формула его приведена в табл. 11.

Кальцит, нередко ассоциирующий с канкринитом, является одним из поздних вторичных образований. Наибольшее развитие он получил в породах Мухальского месторождения, где представлен, подобно канкриниту, несколькими генерациями: различают первично-магматический, реликтовый, сохранившийся в нефелинизированных скарнах, и вторичный, наложенный кальцит. А.А. Конев доказал первично-магматическое происхождение части кальцита, установил морфологические геохимические особенности, позволяющие отличать его от кальцита мраморов и скарнов. Преимущественным распространением на месторождении пользуется поздний кальцит, возникающий в парагенезисе с нефелином, биотитом и амфиболом при перекристаллизации уртитов, сопровождающейся образованием крупнозернистых пегматоидных участков.

Кальцит первично-магматической генерации отмечен А.А. Коневым и в сынныритах, причем в нем установлена примесь стронция и бария (0,037 %).

Кроме кальцита, в некоторых породах отмечены другие карбонаты — доломит, реже магнезит, сидерит.

Содалит довольно часто встречается в нефелиновых породах (Хибинский, Баянкольский, Сыннырский, Кия-Шалтырский массивы), в основном в виде отдельных вкраплений, шлироподобных и жилообразных скоплений вдоль контактов зерен нефелина, по трещинам в них, реже в виде псевдоморфоз. В шлифах содалит бесцветный, изотропный, ксеноморфный. Характерное его свойство — люминесценция в ультрафиолетовых лучах. Минерал обычно концентрируется в участках измененной породы; от анальцима он нередко трудноотличим.

Выделения содалита иногда окружены буроватыми продуктами шпреуштейнизации. Подвергаясь разложению и изменению, он нередко переходит также в натролит, который замещает его в виде волок-

* Определение выполнено в двух точках одного зерна, содержания CO_2 и H_2O не установлены.

Таблица 12

Сравнительные рентгенографические параметры канкринитов:
 эталона ASTM-25-776—I, натриево-калиевого синтетического — II
 и сынырского — III

<i>hkl</i>	I		II		III
	<i>d</i>	<i>I</i>	<i>d</i>	<i>I</i>	<i>d</i>
100	10,95	40	—	—	—
110	6,28	5	6,42	25	—
200	5,45	5	5,56	10	—
101	4,64	90	4,76	71	4,8
210	4,11	15	4,20	20	4,23
300	3,64	70	3,71	67	3,76
211	3,21	100	3,29	100	3,29
310	3,02	10	3,08	8	3,06
301	2,95	10	3,03	15	—
—	—	—	—	—	2,95
400	2,730	40	2,78	49	2,77
311	2,607	30	2,66	45	2,64
002	2,560	30	2,635	40	—
—	—	—	—	—	2,59
320	2,498	20	2,55	11	—
401	2,408	40	2,46	21	2,48
112	2,365	1	2,44	5	—
202	2,321	1	2,38	5	—
321	2,249	25	2,295	13	—
212	2,166	20	2,23	4	—
330	2,099	70	2,14	36	2,13
501	2,010	20	2,049	2	—
132	1,953	2	2,000	4	—
402	1,868	20	1,915	4	1,92
511	—	—	1,867	8	—
430	1,791	20	1,838	8	—
412	1,746	25	1,785	14	1,80
601	1,713	3	—	—	—
431	1,691	10	1,728	5	1,74
332	1,629	10	1,660	4	—
422	1,605	5	—	—	—
213	1,579	40	1,620	13	—
512	1,576	10	1,591	10	1,61
440	1,556	10	1,605	14	—
602	1,488	50	1,518	11	1,52
403	—	—	1,485	9	1,48
710	1,447	50	1,473	5	—
442	1,342	25	1,371	13	—
	$a = 1,2615$ нм $c = 0,5127$ нм		$a = 1,284$ нм $c = 0,527$ нм		$a = 1,28$ нм $c = 0,53$ нм

Примечание. Химический состав натриево-калиевого синтетического канкринита следующий, %: п.п.п. — 7,38; SiO₂ — 31,36; Al₂O₃ — 28,36; Fe₂O₃ — 1,25; SO₃ — 1,70; CO₂ — 0,64; Na₂O — 11,94; K₂O — 9,99.

нистых и пластинчатых агрегатов. Иногда содалит развивается и по калиевому полевоému шпату. Довольно редкая разновидность содалита — гакманит — обнаружен в породах Хибин, а также в кия-шалтырском уртите (наряду с содалитом). Он легко диагностируется на свежем изломе породы по ярко-розовой, свекольно-малиновой окраске, мгновенно исчезающей на свету и восстанавливающейся в ультрафиолетовых лучах.

Характерный продукт изменения нефелина и в определенной степени полевых шпатов — бесцветная слюда (мусковит, либнерит). Мелкочешуйчатые, метельчатые, сноповидные агрегаты ее нередко замещают зерна нефелина, образуют скопления на их стыках, псевдоморфозы, выделяются по трещинам. В измененных, шпреуштейнизированных разновидностях пород слюда является нередко преобладающим компонентом (некоторые разновидности берешитов массива Андрюшкина Речка и породы других проявлений Кузнецкого Алатау). Она отличается от других вторичных минералов большим светопреломлением и двупреломлением. Гидрослюда, названная либнеритом, возникает в условиях гипергенного и гидротермального метасоматоза; в нефелиновых породах Кольского полуострова она хорошо изучена (см. табл. 11).

Альбит в полевошпатовых разновидностях пород образует пластинчатые, веретенообразные и лейстовидные пертитовые вроски в калиевом полево́м шпате, а также розетковидные агрегаты, каемки на контактах зерен нефелина и самостоятельные выделения. Для таких выделений обычны таблитчатые, удлинненно-ксеноморфные, аллотриоморфные формы; последние типичны для зон перекристаллизации пород. Альбит характеризуется структурой полисинтетического двойникования; показатели преломления его варьируют в зависимости от состава (количества анортитового минала).

*

*

*

Необходимо отметить, что все описанные вторичные минералы обычно ассоциируют друг с другом, слагая как агрегаты смешанного состава, так и мономинеральные выделения. Размер их изменяется от долей миллиметра до нескольких сантиметров. Во многих случаях устанавливается несколько генераций вторичных минералов, причем широко развита последняя — выделения по микротрещинам, прожилки, жилы мощностью от долей миллиметра до нескольких метров.

Особенности процессов вторичного преобразования пород и их влияние на состав и качество руд рассмотрены далее на примере Кия-Шалтырского месторождения уртитов.

Кальцит, альбит, реже канкринит нередко наблюдаются среди продуктов замещения цветных минералов, главным образом пироксена,

ассоциируют они с хлоритом, гранатом, эпидотом, цоизитом и др. Иногда пироксен замещается частично, вторичные продукты развиваются по трещинам, в виде округлых друзовидных скоплений внутри зерен, образуя тесные сростания или полные псевдоморфозы (см. рис. 21). Наибольшая интенсивность преобразования пироксенов, а иногда и амфиболов связана с процессами метасоматического и контактово-реакционного скарнирования. Такие характерные вторичные минералы, как амфиболы, гранат, биотит, играющие иногда роль породообразующих и второстепенных, описаны ранее.

Пироксены ряда диопсид — салит — фассаит часто замещаются разностями со значительным содержанием эгиринового минала (эгирин-салитом).

Типичным продуктом замещения пироксенов (возможно, и первично-магматических амфиболов, гранатов) являются хлориты. Они, чаще всего в ассоциации с другими вторичными минералами, развиваются на стыке зерен нефелина и пироксена, по трещинам в последнем, резорбируют его. Удлиненно-ксеноморфные, реже шестоватые, иногда розетковидные, лучистые агрегаты хлорита отличаются относительно высокими показателями преломления ($N_q = 1,594$; $N_p = 1,584$), волнистым погасанием, желтоватой или зеленоватой окраской, слабым плеохроизмом, аномальными цветами интерференции (чернильно-синие). В них нередко содержатся включения канкринита, цеолитов, слюды, т. е. хлориты, видимо, образуются в более позднюю стадию метасоматоза. Обычно они относятся к группе пеннина — шериданита, реже отмечаются грохауит — прохлорит и джефферизит (диагностируются также рентгенографически).

Среди продуктов замещения встречены также цоизит (скопления и единичные зерна с аномальными цветами интерференции и высокими показателями преломления) и эпидот (лучистые агрегаты). Характерны включения их в пироксене, каемки вокруг эпидота рудных минералов (пирит, титаномагнетит, лейкоксен). В урритах среди продуктов замещения фассаита выделены три типа ассоциаций по преобладающим минеральным фазам: 1 — эгирин, салит, хлорит, кальцит; 2 — гранат, кальцит, рудные минералы (по гранату развиваются в свою очередь прохлорит и биотит); 3 — агрегаты смешанного состава — гранат, пироксены, хлорит, биотит, рудные минералы. Эти ассоциации свойственны и породам других месторождений. В скарнированных породах Мухальского месторождения установлены пироксен, гранат, кальцит, рудные минералы, в отдельных участках и зонах широко развиты волластонит и скаполит, которые определены оптически, рентгенографически и химически.

О графитовой минерализации в щелочных породах ряда массивов упоминается в литературе, несколько детальнее она изучена на Кия-Шалтырском месторождении уртитов. Выделения графита приурочены к зонам трещиноватости, катаклаза с интенсивной гидротер-

мальной переработкой пород, наблюдаются в виде линзовидных, гнездообразных скоплений, обособлений по контурам зерен первичных минералов. Содержание графита в зонах графитизации составляет 1,5—4,0 % (по шести определениям). Он легко обнаруживается в аншлифах, подтверждается рентгенографически ($a = 0,2468$ нм, $c = 0,6736$ нм). Некоторые геологические факторы (осветление вмещающих битуминозных известняков на отдельных участках вблизи интрузии и др.) позволяют сделать вывод об образовании графита за счет углерода органических веществ, выносимого гидротермальными растворами из битуминозных известняков (восстановленные формы углерода — в частности, метан) по многочисленным зонам дробления, возникшим в ходе становления массива (в зонах гидротермального изменения — окисление до элементарного углерода).

Графит отмечен и в породах Баянкольского массива, в северной части которого выделяются участки, где главными компонентами являются идиоморфные зерна нефелина, цементируемые массой, состоящей в основном из графита.

Минеральный состав и качество

Анализ состава руд эксплуатируемых и перспективных месторождений (табл. 13*) показывает, что количество свежего нефелина (кальсилита) варьирует в основном от 40 до 55 %, снижаясь лишь в некоторых случаях (месторождения и рудопроявления Андрюшкина Речка, Медведкинское, Сыннырское, Сакунское). Только в нефелиновых концентратах из пород Хибинских и Мухальского месторождений его содержание достигает соответственно 60 и 70 %, в концентратах обогащения пород других месторождений (Горячегогорское) не превышает 30 %.

Наиболее меланократовыми являются руды Горячегогорского массива и рудопроявления Медведкинское (25—30 % цветных минералов), наиболее лейкократовыми — сынныриты (2—6 %). Интенсивно изменены вторичными процессами (30—56 % продуктов изменения) породы массивов Андрюшкина Речка, Горячегогорского, Медведкинское. В уртитях, ийолит-уртитях Мухальского, Кия-Шалтырского, Баянкольского месторождений вторичные минералы составляют 20—35 %, в кольском нефелиновом концентрате ~ 15 %; наименьшее их количество свойственно кальсилит-калиево-полево-

* Рассмотрены данные по составу товарной руды, средних технологических проб или наиболее типичных разновидностей; расчет произведен с помощью петрохимических пересчетов химического состава на минеральный с учетом результатов анализа монофракций, справочных данных или стехиометрических соотношений оксидов.

шпатовым породам Сыннырского массива. При этом если в рудах Кия-Шалтырского и Мухальского месторождений преобладают кальциевые минералы (канкринит, кальцит), то в рудах Баянкольского, Горячегогорского и берешитах Андриюшкиной Речки — цеолиты, а в породах Медведкинского рудопоявления — слюды и гидрослюды.

Полевыми шпатами обогащены руды Баянкольского, Горячегогорского месторождений, а также рудопоявления Медведкинского и Андриюшкина Речка (~14–17%), причем преобладают плагиоклазы среднего и основного состава (за исключением баянкольских руд). Наибольшее количество калиево-натриевых полевых шпатов содержится в сынныритах (64–66%). Изменение соотношения минеральных компонентов в концентратах обогащения нефелиновых руд Кузнецкого Алатау показано на графике (рис. 22).

Рассчитанный баланс химических компонентов по минеральным фазам (табл. 14) свидетельствует о том, что в большинстве нефелиновых руд относительная доля Al_2O_3 в нефелине составляет 35–55%, в кольском нефелиновом концентрате — около 86%, в наиболее высококачественных мухальских, кия-шалтырских и баянкольских рудах — соответственно около 75, 60 и 55%. Остальная часть Al_2O_3 входит в состав вторичных минералов и полевых шпатов; последние влияют и на уровень содержания кремнезема в породе. Основными носителями полезных компонентов являются нефелин и вторичные минералы (см. табл. 6, 11); именно с ними связана преобладающая (60–70%) часть Al_2O_3 , Na_2O , K_2O , CaO породы (см. табл. 14).

В темноцветных, второстепенных, вторичных и аксессуарных минералах содержатся такие вредные для технологического процесса примеси, как Cl (содалит), S (сульфиды), P, F (апатит, биотит), Ti (пироксен, гранат, биотит, амфибол, сфен, титаномагнетит, ильменит). Основные вредные компоненты — Fe, Mg, входящие в состав цветных минералов, вызывают плавкость шихты и снижают степень извлечения Al_2O_3 и R_2O . Поэтому применение обогащения нефелиновых руд путем их сепарации позволяет кондиционировать состав и повысить качество руды (увеличивается содержание минералов, обогащенных Al_2O_3 , R_2O). В то же время в некоторых минералах (кальцит и др.) содержится значительное количество CaO , удаление которого нецелесообразно (см. гл. 4).

Взаимосвязь минерального состава и соотношения полезных и вредных компонентов в рудах представлена на рис. 23 в виде гистограмм и вариационных кривых. На гистограмме месторождения расположены по мере обеднения руд нефелином, что обуславливает закономерное снижение содержания Al_2O_3 и Na_2O . Четкая прямая зависимость прослеживается между содержанием полевых шпатов и SiO_2 и обратная — между содержанием CaO и SiO_2 . Последнее предопределяет довольно низкий уровень содержания кремнезема в рудах Мухальского, Горячегогорского месторождений и Медведкин-

Таблица 13
Количественно-минеральный состав

Минералы	1	2	3		4
	П	П	П	К	П
Нефелин	71,1	48,7	22,8	26,5	56,0
Кальцит	—	—	—	—	—
Вторичные по нефелину	10,0	35,4	31,3	44,7	21,6
В том числе:					
канкринит	+	+	4,8	5,2	7,0
цеолиты	4,8	5,3	} 18,8	} 27,2	—
анальцит	} 1,0	+			—
содалит		3,1	+	—	+
десмин (пренит)	—	(2,0)	—	—	—
слюды (серицит, мусковит, либнерит)	4,2	6,6	6,3	10,5	3,3
кальцит	—	+	1,4	1,8	9,1
Полевые шпаты	8,7	Ед. зн.	16,1	22,1	3,1
В том числе:					
плагиоклазы	—	Ед. зн.	14,0	18,0	1,4
калиево-натриевые (микроклин, микроклин-пертит, ортоклаз)	8,7	—	2,1	4,1	1,7
Цветные и рудные	9,1	14,3	28,5	6,4	18,1
В том числе:					
пироксены (фассаит, эгирин, диопсид, салилит, геденбергит)	9,1	10,6	18,8	3,6	4,1
биотит	+	+	—	—	—
вторичные по пироксену (амфиболы, биотит, хлорит, кальцит, гранат, рудные)	+	1,2	3,3	2,0	6,9
волластонит	—	—	—	—	+
цоизит, оливин	—	+	1,8	Ед. зн.	+
сидерит	—	—	—	—	—
гранат	—	+	—	—	6,8
рудные минералы	+	2,5	4,6	0,8	0,3
из них:					
пирит, ильменит, магнетит, гематит	+	2,5	3,0	0,8	0,3
гётит, лимонит	—	—	1,6	—	+
Акцессорные минералы	1,1	1,7	1,3	0,3	1,2
В том числе:					
сфен	0,8	0,4	—	—	0,3
апатит	0,3	1,3	1,3	0,3	0,9
Сумма	100	100	100	100	100

Примечания. 1. Образцы из месторождений и рудопроявлений: 1 — Хинькольского, 6 — Сыннырского, 7 — Сакунского, 8 — Медведкинского, 9 — Анджен или не рассчитан.

нефелиновых руд (П) и концентратов (К), %

4		5		6		7		8		9	
К	П	П	П	П	П	П	К	П	К	П	К
59,5	42,4	5,1	2,1	17,95	21,3	9,1	22,9	—	—	—	—
—	—	23,4	9,6	—	—	—	—	—	—	—	—
33,8	33,1	4,8	16,4	38,15	48,65	55,9	52,3	—	—	—	—
7,0	7,7	—	2,6 (+ кальцит)	4,0	5,25	5,0	2,2	—	—	—	—
—	} 13,0	} 1,1	} 1,1	—	—	} 31,7	23,7	—	—	—	—
7,9				—	—		9,8	13,2	—	—	
—	+	—	—	0,15	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	2,9	—	—	—	—	—	—	—	—
8,2	6,6	3,7	9,8	22,2	29,1	17,2	24,6	—	—	—	—
10,7	5,8	+	+	2,0	1,1	2,0	1,8	—	—	—	—
2,7	16,0	64,0	65,6	14,3	25,0	16,8	19,1	—	—	—	—
1,1	16,0	+	—	13,3	23,7	12,9	12,2	—	—	—	—
1,6	—	64,0	65,6	1,0	1,3	3,9	6,9	—	—	—	—
2,8	7,3	2,3	5,7	26,45	4,95	17,5	5,5	—	—	—	—
} 1,8	6,1	+	3,5	+	4,55	+	1,4	—	—	—	—
								—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	+	—	3,9	+	—	—	—	—
—	—	—	—	1,9	0,2	—	—	—	—	—	—
1,0	—	—	1,2	Ед. зн.	—	—	—	—	—	—	—
—	1,2	0,9	—	2,25	0,2	5,8	2,3	—	—	—	—
—	} 1,2	} 0,9	—	2,25	0,2	1,6	2,3	—	—	—	—
—								—	—	—	—
1,2	1,2	0,4	0,6	3,2	0,1	0,7	0,2	—	—	—	—
+	+	0,2	0,2	1,4	0,1	—	—	—	—	—	—
1,2	1,2	0,2	0,4	1,8	—	0,7	0,2	—	—	—	—
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

бинских, 2 — Кия-Шалтырского, 3 — Горячегогорского, 4 — Мухальского, 5 — Барюшкина Речка. 2. "+" — наблюдается в небольшом количестве, "—" не обнаружено.

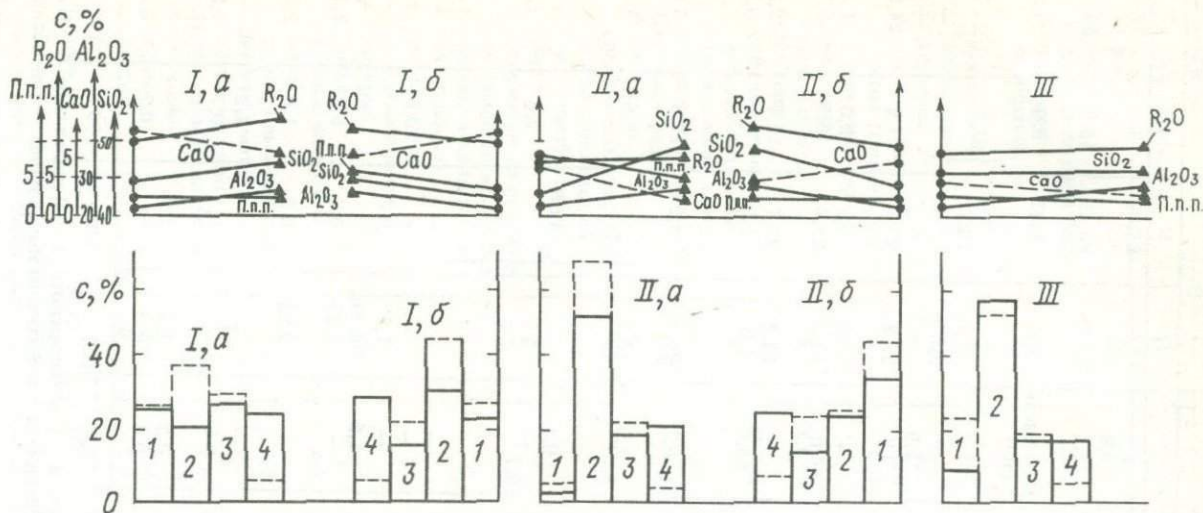


Рис. 22. Диаграмма изменения соотношения химических и минеральных компонентов при обогащении нефелиновых руд Кузнецкого Алатау.

Содержания s химических компонентов: точка — в рудах, треугольник — в концентратах; минеральные компоненты: I — нефелин: 2 — вторичные (по нефелину) минералы; 3 — полевые шпаты; 4 — цветные минералы; содержания s минеральных компонентов: сплошная линия — в рудах, пунктирная — в концентратах; месторождения, рудопроявления: I — Горячевское (а — плагиоклазовые уртиты, б — средняя проба), II — Медведкинское, ийолит-уртиты (а — шпреуштейнизированные, б — слабо измененные), III — Андрушкина Речка

Таблица 14

Баланс химических компонентов по основным минеральным фазам, % (относительная доля)

Оксиды	Минералы	Месторождения, рудопроявления							
		Хибинские	Кия-Шал- тырское	Горяче- горское	Мухальс- кое	Баянколь- ское	Сынырск- ое (Калюм- ное)	Сакунское	Андрюшки- на Речка
SiO ₂	Нефелин	-/68,3	40,9/-	24,0/24,3	63,0/66,1	42,5/-	20,4/-	7,9/-	2,8/7,0
	Вторичные	-/16,0	38,7/-	30,5/43,5	13,2/26,9	27,5/-	3,7/-	13,4/-	67,0/63,0
	Полевые шпаты	-/12,3	—	21,0/27,6	5,2/4,4	24,4/-	74,6/-	74,2/-	23,3/26,5
	Прочие	-/3,4	20,4/-	24,5/4,6	18,6/2,6	5,6/-	1,3/-	4,5/-	6,9/3,5
Al ₂ O ₃	Нефелин	-/85,7	58,0/-	36,4/34,8	76,3/72,7	54,8/-	40,7/-	17,9/-	4,2/10,3
	Вторичные	-/8,9	34,4/-	38,2/42,8	14,4/24,1	31,0/-	7,5/-	22,6/-	75,4/69,3
	Полевые шпаты	-/5,4	—	19,6/20,9	2,3/2,1	11,9/-	51,4/-	56,6/-	18,3/20,4
	Прочие	-/-	7,6/-	5,8/1,5	7,0/1,1	2,3/-	0,4/-	2,9/-	2,1/-
Na ₂ O	Нефелин	-/93,7	62,7/-	44,2/43,5	80,0/78,2	56,1/-	73,3/-	37,5/-	8,1/18,4
	Вторичные	-/5,4	37,3/-	46,5/41,6	14,8/19,4	32,6/-	26,7/-	25,0/-	75,7/69,8
	Полевые шпаты	—	—	2,3/11,9	1,7/1,6	8,9/-	—	31,3/-	10,8/11,8
	Прочие	-/0,9	—	7,0/3,0	3,5/0,8	2,4/-	—	6,2/-	5,4/-
K ₂ O	Нефелин	-/68,3	37,9/-	47,0/45,5	75,7/77,1	56,3/-	38,5/-	19,3/-	—
	Вторичные	-/13,4	62,1/-	35,3/40,9	5,4/12,7	14,6/-	2,0/-	9,7/-	68,0/65,6
	Полевые шпаты	-/18,3	—	11,8/13,6	5,4/5,1	20,8/-	59,0/-	68,4/-	32,0/34,4
	Прочие	—	—	5,9/-	13,5/5,1	8,3/-	0,5/-	2,6/-	—
CaO	Нефелин	—	22,5/-	—	4,7/9,0	1,5/-	—	—	—
	Вторичные	-/25,0	—	20,5/44,9	53,3/76,4	79,6/-	—	40,0/-	57,5/53,8
	Полевые шпаты	—	—	19,2/38,8	0,9/1,1	1,5/-	—	5,0/-	30,0/34,1
	Прочие	-/75,0	77,5/-	60,3/16,3	35,5/13,5	17,4/-	100/-	55,0/-	12,5/12,1
ΣFe ₂ O ₃	Нефелин	—	—	—	—	—	—	—	—
	Вторичные	—	—	4,3	—	—	17,2	—	—
	Полевые шпаты	—	—	—	—	—	—	—	—
	Прочие	-/100	100/-	100/95,7	100/100	100/-	82,8/-	100/-	100/100

Примечание. В числителе показана относительная доля компонента в исходной пробе, в знаменателе — в концентрате обогащения; "—" — компонент отсутствует или руда не обогащается.

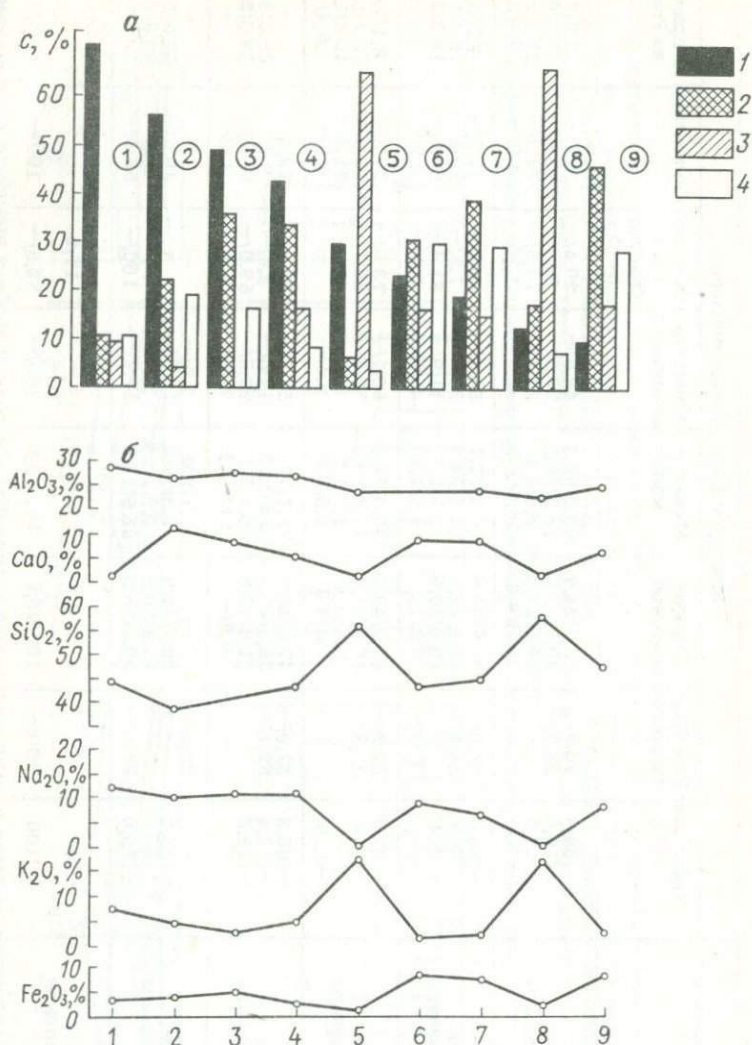


Рис. 23. Гистограмма (а) и вариационные кривые (б) содержаний основных минеральных и химических составляющих нефелиновых руд различных месторождений:

1 — нефелин; 2 — вторичные минералы; 3 — калиевые полевые шпаты; 4 — темноцветные и прочие минералы (с — содержание минералов). 1—9 — месторождения, рудопроявления: 1 — Хибинские, 2 — Мухальское, 3 — Кня-Шалтырьское, 4 — Баянкольское, 5 — Сыннырское, 6 — Горлячегорское, 7 — Медведкинское, 8 — Сакунское, 9 — Андрушкина Речка

кого рудопроявления (близкий таковому в концентратах Хибинских и уртигах Кия-Шалтырского месторождений).

Вполне естественна и прямая корреляция между количеством темноцветных минералов и содержанием оксидов железа, хотя она в свою очередь зависит и от степени железистости самих темноцветных минералов.

Петрохимические особенности

Особенности химизма минералов и их роль в составе нефелиновых руд в значительной степени связаны с формационной принадлежностью массивов, к которым приурочены месторождения (табл. 15). По характеру распределения в нефелиновых рудах петрогенные элементы подразделяются на три группы. Одну из них составляют основные полезные компоненты руды, заключенные, главным образом, в фельдшпатоидах; это алюминий, натрий и калий, содержания которых находятся в прямой корреляционной зависимости друг от друга. К второй группе принадлежат фемические компоненты — железо, магний, титан, входящие в состав темноцветных минералов. Их содержания тоже прямо коррелируют друг с другом и связаны обратной зависимостью с содержанием элементов первой группы. Во вторую группу может быть включен и кальций, но его распределение сложнее, кроме фемических минералов он присутствует также в карбонате, апатите, плагиоклазе. К третьей группе относится кремний, содержания которого почти не меняются в ряду полевошпатовых нефелиновых пород, но заметно возрастают в полевошпатовых (особенно калиево-полевошпатовых) разновидностях и снижаются при наличии значительной примеси карбоната, апатита или рудных минералов.

Нефелиновые породы агпаитовой, щелочно-габброидной, калиево-натриевой и калиевой щелочно-сиенитовой формаций заметно различаются по соотношениям элементов первой группы — алюминия, натрия и калия (рис. 24).

Породам агпаитовой формации (Хибинский массив) свойственно преобладание щелочей над алюминием (коэффициент агпаитности $Na + K/Al > 1$), обратные соотношения редки, поэтому на диаграмме $Na - K - Al$ поле точек хибинских ийолит-уртитов располагается слева, в наибольшем удалении от вершины Al . Поля точек нефелиновых руд щелочно-сиенитовой (Баянкольский массив) и щелочно-габброидной формации располагаются в правой ("миаскитовой") части диаграммы, частично перекрывая друг друга. Большинство точек ювит-уртитов Баянкольского массива лежат ближе к линии равных соотношений щелочей и алюминия (частично и слева от нее), чем точки ийолит-уртитов щелочно-габброидной формации, в которых доля алюминия достигает иногда 70 %. Они различаются также по от-

Таблица 15

Характеристика основных породообразующих минералов месторождений различного формационного типа

Минералы	Влияние на качество руд	Формация, месторождение			
		Щелочно-габброидная Кия-Шалтырское, Мухальское	Агпайтовая — Хи- бинская группа	Щелочно-сиенитовая	
				Баянкольское	Сынырское, Са- кунское
Нефелин (каль- силит)	Главный носитель полезных компо- нентов	Преимущественно первичномагматический			
		Преобладает среди лейкократовых минералов			Присутствует в пере- менном количестве
		$Na_2O + K_2O/Al_2O_3 < 1$	$Na_2O + K_2O/Al_2O_3 \geq 1$	$Na_2O + K_2O/Al_2O_3 \leq 1$	
		Повышенная глинозе- мистость, повышенное содержание кальция	Содержания кальция исчезающе малы		
		Калиево-натриевые нефелины			Преобладает калие- вая разность — каль- силит
Полевые шпаты: известково-нат- риевые	Привносят боль- шое количество SiO_2 при незна- чительном содер- жании полезных компонентов (Al_2O_3, R_2O)	Первичномагматиче- ские и вторичные	Вторичные		
		Присутствует посто- янно	Редки	Встречаются спора- дически	

калиевые	То же	От альбита до анортита	Исключительно альбит			
		В основном вторичные, реже первичномаг- матические	Первичномагматические			
		Редки, за исключени- ем Мухальского массива	Встречаются часто	Присутствуют постоянно	Преобладают	
		Содержат примесь натрия			Исключительно ка- лиевые	
Пироксены	Носители вредных компонентов (Fe_2O_3, MgO, TiO_2 и др.)	Первичномагматические				
		Преобладают среди цветных минералов		Встречаются спо- радически	Редки	
		Повышенная глинозе- мистость и железис- тость, низкая щелоч- ность $K_a \leq 1$ $f = 40 - 95$	Повышенная щел- очность, низкая глиноземистость и железистость $K_a > 1$ $f = 30 - 60$	Повышенная щел- очность и желе- зистость, средняя глиноземистость $K_a \geq 1$ $f = 80 - 100$	Низкая щелочность, глиноземистость и железистость $K_a \approx 1$ $f \approx 30$	

Примечание. K_a — коэффициент агпайтности; f — железистость.

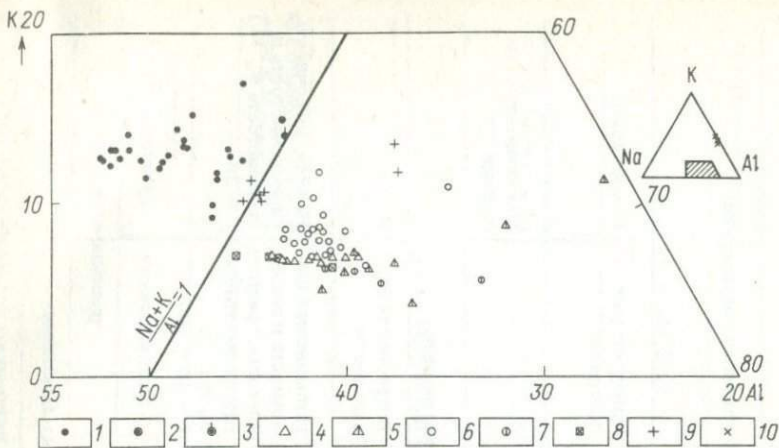


Рис. 24. Диаграмма составов нефелиновых пород месторождений и рудопроявлений различной формационной принадлежности.

Месторождения, рудопроявления формаций: 1–3 — агпаитовых нефелиновых сиенитов — Хибинские (1 — частные пробы, 2 — мода, 3 — среднее); 4–8 — щелочно-габброидной (4 — Кия-Шалтырское, 5 — Горячегогорское и другие рудопроявления Кузнецкого Алатау, 6 — Мухальское, 7 — Нижне-Бурульзайское, 8 — Дахунурское); 9–10 — щелочно-сиенитовой: 9 — калиево-натриевого типа (Баянкольское), 10 — калиевого типа (Сыннырское)

носительной доле калия: 8–15 % в первых и 4–11 % во вторых. Перекрывание полей этих двух формаций происходит в основном за счет нефелиновых пород Мухальского массива, более калиевых по сравнению с ийолит-уртитам других щелочно-габброидных массивов. Наконец, точки сынныритов калиевой щелочно-сиенитовой формации размещаются за пределами рассматриваемой части треугольника в соответствии с их ультракалиевым составом; коэффициент агпаитности для них немного ниже единицы.

Легко заметить, что поля составов нефелиновых пород (см. рис. 24) и выделенных из них нефелинов (см. рис. 15) располагаются на диаграммах сходным образом, но специфические особенности химизма пород проявлены более контрастно, чем у нефелинов, так как усиливаются за счет состава других минералов (например, агпаитность хибинских ийолит-уртитов усиливается за счет высокощелочных пироксенов, "миаскитовость" нефелиновых руд щелочно-габброидной формации — за счет высокоглиноземистого фаялита и плагиоклаза и т. п.). Обогащенность же алюминием руд щелочно-габброидных комплексов характеризует их как наиболее благоприятный источник глинозема.

Соотношения между фемическими элементами менее важны для

оценки нефелинового сырья, к тому же разнообразие темноцветных минералов и изменчивость их состава обуславливают значительное перекрытие интервалов величин петрохимических показателей и полей точек для нефелиновых пород различных формаций. Поэтому отметим лишь наиболее существенные различия, подчеркнув их статистический характер. Нефелиновые руды щелочно-габброидной формации в среднем заметно богаче кальцием (до 10 % CaO, иногда и более) по сравнению с рудами остальных типов. Ийолит-уртиты Хибинского массива отличаются более высокими содержаниями титана (до 5 % TiO_2). Ювит-уртиты Баянкольского массива и сынныриты Северного Прибайкалья, принадлежащие к щелочно-сиенитовым комплексам, имеют обычно более высокую железистость, чем ийолит-уртиты агпайтовой и щелочно-габброидной формаций.

Наконец, содержание кремния в нефелиновых породах зависит от примеси калиевого полевого шпата, поэтому ювит-уртиты Баянкольского и нередко ийолит-уртиты Хибинского массивов обогащены оксидом кремния по сравнению с рудами щелочно-габброидных комплексов. В сынныритах же содержание кремнезема превышает 50 %, как это свойственно породам нефелин-сиенитового семейства, т. е. гораздо выше, чем у всех остальных видов нефелинового сырья.

Вторичные процессы — их роль, характер и особенности (на примере Кия-Шалтырского месторождения)

Вариации минерального и химического состава нефелиновых руд определяются как условиями формирования интрузий на магматической стадии, так и характером вторичных наложенных процессов. Эти факторы обуславливают особенности вещественного состава руд, технологию их переработки и обогащения, а также в некоторой степени систему отработки месторождений, что в итоге существенно влияет на экономические показатели и целесообразность их промышленного освоения. Поэтому рассмотрению роли и характера эндогенных вторичных процессов, которые проявлены в нефелиновых породах большинства месторождений и рудопроявлений, уделено значительное внимание.

В составе руд всех изученных месторождений вторичные минералы играют существенную роль (см. табл. 14). Даже в уртитах Кия-Шалтырского месторождения — наиболее высококачественных рудах — выделено четыре разновидности, три из них — в различной степени измененные. Количественно-минеральный состав руд данного месторождения по результатам штучного опробования на горизонте 990 м (в настоящее время уже отработан), а также данные по составу разностей измененных нефелиновых пород ряда других объектов приведены в табл. 16.

Таблица 16
Количественно-минеральный состав разновидностей руд

Минералы	Кия-Шалтырское				Горячегорское		Мухальское			
	Уртиты				Плагиоклазовые ийолиты, наиболее измененные		Уртиты и ийолит			
	неизмененные	частично измененные	шпреуштейннизированные	скарнированные			слабо измененные		шпреуштейннизированные	
					П	К	П	К		
Нефелин	73,6	42,9	—	48,3	18,9	22,1	64,2	70,0	33,3	40,7
Вторичные по нефелину	11,8	33,0	90,4	22,7	40,0	50,1	20,1	22,8	38,0	38,5
В том числе:										
шпреуштейн смешанный	4,7	19,3	10,0	12,0	+	+	+	+	+	+
канкринит	1,6	5,7	9,0	2,3	2,1	7,1	3,3	9,0	11,4	6,7
бёмит, гиббсит	—	+	14,0	—	—	—	—	—	+	—
цеолиты, анальцим	4,7	8,0	41,9	6,9	28,7	32,5	5,8	3,0	2,4	5,8
мусковит (либнерит)	+	+	14,1	+	7,4	8,1	1,9	1,0	19,0	18,5
содалит	Сл.	+	—	0,4	+	+	М	—	1,0	1,0
кальцит	0,8	+	1,4	1,1	1,8	2,4	9,1	9,8	4,2	6,5
Темноцветные и рудные	14,3	23,6	9,2	28,1	28,3	8,5	13,0	4,0	24,2	14,7
В том числе:										
пироксены	10,6		4,3	6,1	21,1	5,5	7,1		7,6	4,3
амфиболы									1,8	1,8
биотит			4,4	10,1				2,0		—
хлорит	3,7	23,6		3,5		2,6	5,2		3,9	—
гранат				11,9				2,0	0,2	М
рудные			0,5	+	3,7	0,4	0,7	—	0,6	0,3
клиноцоизит, волластонит (оливин)		М	М	—	(М)	(М)	—	—	10,1	8,3
Калиевый полевой шпат	—	—	—	—	—	—	1,6	2,0	2,5	1,6
Плагиоклазы	М	+	М	М	11,3	19,0	+	+	1,4	3,4
Аксессуары (апатит, сфен и др.)	0,3	0,5	0,4	0,9	1,5	0,3	1,1	1,2	0,6	1,1
Сумма	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Примечание. П — порода (руда); К — концентрат обогащения; "+" — находится, раздельно не подсчитан; М — малая доля процента, "—" — отсутствует.

* Учтено 5,0 % сидерита. ** Учтено 0,3 % сидерита.

различных месторождений и рудопроявлений, %

уртиты		Уртиты и ювитуртиты		Ийолит-уртиты плагиоклазовые				Берешиты каменные		
скарнированные	П	К	измененные	шпреуштейннизированные	слабо измененные		измененные		П	К
					П	К	П	К		
	33,3	50,5	50,7	6,7	34,4	43,9	3,4	5,4	5,8	7,8
	23,4	19,6	27,6	72,1	23,9	24,8	52,1	67,6	67,0	78,3
	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	3,0	8,1	5,9	5,9	5,1	6,8	4,3	4,1	2,0	3,2
	+	—	—	—	—	—	+	+	—	—
	5,9	2,8	8,8	34,0	4,9	6,7	8,6	11,6	39,2	38,1
	3,0	5,6	3,7	24,0	13,2	10,8	34,1	51,6	23,7	35,0
	—	1,1	—	—	—	—	0,6	+	—	—
	11,5	2,0	9,2	8,2	0,7	0,5	4,5	0,3	2,1	2,0
	29,0	11,5	9,1	6,5	24,8	7,7	21,1	4,3	15,3	5,6
		1,9			18,5	7,1	3,8	1,8	4,9	2,0
		8,4			М				—	—
	15,2	1,0	8,1	5,3	4,1		16,1*	2,5**	2,1	0,9
	13,8	0,4	—	—	—	—	—	—	6,3	2,7
	+	0,2	1,0	1,2	2,2	0,6	1,2	М	2,0	М
	+	—	—	—	—	—	+	—	2,0	М
	4,5	3,4	10,7	13,5	М	М	3,9	5,0	1,7	1,1
	8,0	14,6	+	+	14,1	23,3	16,0	17,7	9,6	7,0
	1,8	0,4	1,9	1,2	2,8	0,3	3,5	+	0,6	0,2
	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

лდება, раздельно не подсчитан; М — малая доля процента, "—" — отсутствует.

Таблица 17

Химический состав (в %) и параметры качества разновидностей

Оксиды	Кия-Шалтырское				Горячегорское		Мухальское			
	Уртиты				Плаггиоклазовые ийолиты, наиболее измененные		Уртиты и ийолиты			
	неизмененные	частично измененные	шпреуштейннизированные	скарнированные			слабо измененные		шпреуштейннизированные	
					П	К	П	К		
Al ₂ O ₃	27,9	26,8	31,0	26,6	22,8	26,0	26,7	29,3	27,4	28,5
Na ₂ O	11,7	10,3	8,7	9,4	7,8	9,7	11,6	13,0	8,2	9,0
K ₂ O	2,8	3,0	2,7	2,2	1,4	1,6	3,9	4,2	4,6	4,4
R ₂ O	13,5	12,3	10,5	10,9	8,7	10,8	14,2	16,4	11,2	11,9
SiO ₂	40,5	40,8	41,5	39,1	42,3	43,6	37,6	38,7	40,7	41,9
Fe ₂ O ₃ (общ)	4,5	5,3	2,3	4,8	8,6	2,2	3,8	0,21	3,5	1,1
FeO	1,5	1,4	1,3	1,4	3,0	1,1	1,9	0,13	2,4	—
MgO	1,2	1,0	1,0	—	1,6	0,66	0,50	0,22	1,0	0,33
CaO	7,2	7,6	3,0	10,7	8,7	7,1	8,7	8,2	8,1	8,5
P ₂ O ₅	0,55	0,53	0,23	0,40	0,66	0,86	0,46	0,52	0,21	0,28
П.п.п. и прочие	3,57	4,52	9,32	5,64	5,8	6,19	5,23	5,51	5,65	5,06
Сумма	99,92	99,85	99,75	98,14	99,66	98,11	98,49	99,86	99,36	99,07
MR ₂ O	0,79	0,75	0,55	0,70	0,63	0,68	0,87	0,88	0,67	0,69
MCa	0,19	0,20	0,08	0,29	0,22	0,17	0,25	0,15	0,22	0,32
MSi	2,47	2,59	2,28	2,50	3,15	2,85	2,39	2,34	2,52	2,5
Al _{сп.р}	15,73	15,14	16,97	15,18	12,69	14,24	16,05	17,46	15,54	15,92

Примечания: П — порода (руда), К — концентрат обогащения; Al_{сп.р} — вах 5, 6).

Особенности минерального состава находят отражение и в особенностях их химизма (табл. 17). Замещение породообразующих минералов вторичными приводит обычно к уменьшению количества Al₂O₃, но в некоторых случаях — в зависимости от сочетания вторичных минералов — содержание Al₂O₃ может оставаться неизменным, а иногда и увеличиваться, например, при развитии ассоциации низкоглиноземистые цеолиты + глиноземистый канкринит + высокоглиноземистая слюда или бёмит и диаспор. Однако самым характерным следствием процесса изменения является уменьшение содержания

руд различных месторождений и рудопроявлений

уртиты	Баянкольское		Медведкинское				Андрюшкина Речка		
	скарнированные	Уртиты и ювиту-уртиты		Плаггиоклазовые ийолит-уртиты				Берешиты каменистые	
		измененные	шпреуштейннизированные	Слабо измененные		измененные			
				П	К	П	К		
П	К	П	П	П	К	П	К	П	К
18,7	27,5	24,8	24,6	23,4	27,3	22,1	28,0	23,8	28,0
6,6	11,6	11,6	8,3	8,8	11,1	4,2	4,9	7,4	7,7
2,7	4,0	4,8	4,7	2,5	2,8	3,5	4,4	2,5	3,6
8,4	14,2	14,8	11,4	10,45	12,95	6,51	7,8	9,05	10,1
37,5	45,9	41,2	44,2	44,6	48,3	42,6	49,1	46,4	46,7
7,1	1,6	3,2	3,0	6,4	1,86	8,5	2,7	8,0	3,3
1,7	—	1,6	1,8	2,8	0,57	5,1	1,2	0,83	0,35
2,2	0,78	0,57	0,32	1,8	0,57	2,2	0,76	0,82	0,34
17,2	4,7	7,2	5,8	7,3	3,9	6,8	2,8	4,0	2,7
0,45	0,12	0,87	0,51	0,79	0,08	0,94	0,06	0,30	0,10
6,41	2,88	6,2	8,4	3,02	2,57	8,2	5,81	6,64	6,51
98,86	99,08	99,94	99,83	98,61	98,48	99,04	98,53	99,86	98,95
0,74	0,85	0,98	0,76	0,73	0,78	0,48	0,46	0,62	0,59
0,5	0,18	0,19	0,14	0,175	0,09	0,17	0,06	0,09	0,06
3,4	2,84	2,82	3,07	3,24	3,00	3,28	2,97	3,31	2,84
11,96	14,40	14,33	13,54	12,51	13,76	12,23	13,74	12,38	11,31

расчетное содержание глинозема в спеке (значение и методику расчета см. в главе 5, 6).

R₂O, увеличение SiO₂ и летучих (п.п.п.), а в случае значительной кальцитизации (гранат, кальцит, канкринит) — разубоживание породы по содержанию Al₂O₃ и SiO₂, обогащение по CaO. Особенно четко закономерности изменения химического состава видны на примере концентратов обогащения (см. рис. 22, табл. 13); в них доля лейкокатровых минералов, и в том числе вторичных, значительно возрастает. При этом количество Al₂O₃ увеличивается в гораздо большей степени, чем R₂O (см. табл. 17, рис. 22).

На плане петрографического опробования горизонта 990 м

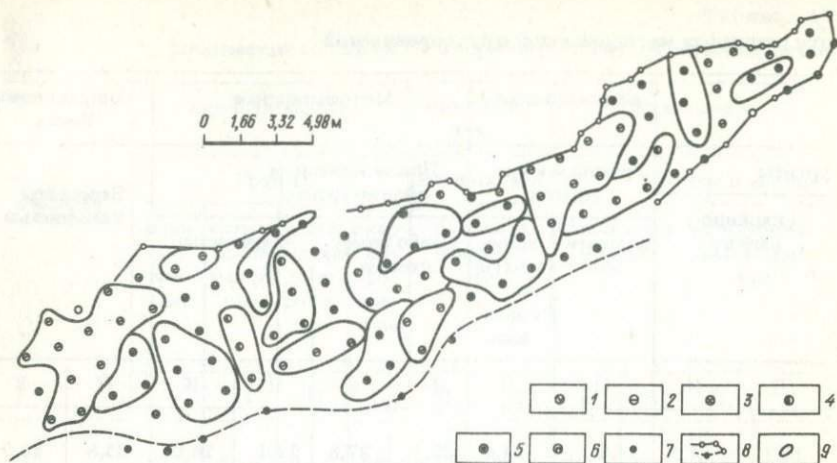


Рис. 25. План петрографического опробования горизонта 990 м Кия-Шалтырского месторождения.

1–5 — уртиты: 1 — неизмененные, 2 — частично измененные, 3 — измененные, 4 — с измененным пироксеном, 5 — скарнированные; 6 — пироксенит; 7 — габбро, ийолиты; 8 — контур рудного тела; 9 — поля развития петрографических разновидностей пород

Кия-Шалтырского месторождения (рис. 25) показано распространение всех выделяемых разновидностей, причем каких-либо четких закономерностей не наблюдается. Это свидетельствует о сложности и площадном характере метасоматических процессов. На петрографических колонках по скважинам (рис. 26) видно, что уртиты, не затронутые вторичными процессами, встречаются довольно редко. Установлено, что с глубиной несколько изменяется состав минеральных ассоциаций — увеличивается роль томсонита, канкринита, мусковита (серицита) и уменьшается шпреуштейна, натролита, содалита. Фассаит с глубиной более интенсивно замещается хлоритом, диопсид-авгитом, эгирин-салитом, биотитом, гранатом, кальцитом (см. рис. 20, з).

На Кия-Шалтырском месторождении остаточные растворы, возникшие в процессе кристаллизации магмы, имели щелочной состав, что нашло отражение в составе вторичных минералов (содалит, канкринит, натролит). Одним из самых ранних (после формирования содалита) был процесс шпреуштейнизации. Остаточные растворы концентрировались в апикальной части интрузии, в приконтактовых зонах, где температура была ниже и растворы охлаждались с большей скоростью; в результате при замещении нефелина образовались тонкозернистые агрегаты плохо индивидуализированных вторичных минералов — шпреуштейн. Этим объясняется меньшая распростра-

3644

Рис. 26. Петрографические колонки, характеризующие вариации состава уртитов Кия-Шалтырского месторождения по скважинам. 1-6 — уртит: 1 — неизменный, 2 — частично измененный, 3 — измененный, 4 — скарнированный, 5 — частично измененный скарнированный, 6 — измененный с графитом; 7 — габбро; 8 — шпировые скопления пироксена, скарнированные; 9 — ийолит.

ненность продуктов шпреуштейнизации на глубине и внутри тела. Дальнейшее поступление растворов привело к перекристаллизации шпреуштейна с укрупнением индивидов, а также к формированию на стыках зерен первичных минералов и по микротрещинам в них более крупнозернистых агрегатов и индивидов вторичных образований (см. рис. 21, в). Вероятно, процесс проникновения растворов имел преимущественно поровый характер.

Стадийность изменения нефелина исходя из характера развития вторичных минералов представлена схематически на рис. 27, а. Стадийность вторичных изменений по фассаиту (см. рис. 27, б) установить труднее из-за агрегатного характера их псевдоморфоз.

Естественно, что в зонах трещиноватости и расслаивания, возникавших во время кристаллизации массива, процессы автометасоматоза проявились особенно интенсивно. На продукты автометасоматоза накладывается послемагматический гидротермальный процесс, главным образом в зонах тектонических нарушений, катаклаза и вдоль контактов с вмещающими породами. В результате воздействия этого более позднего процесса вторичные образования ав-

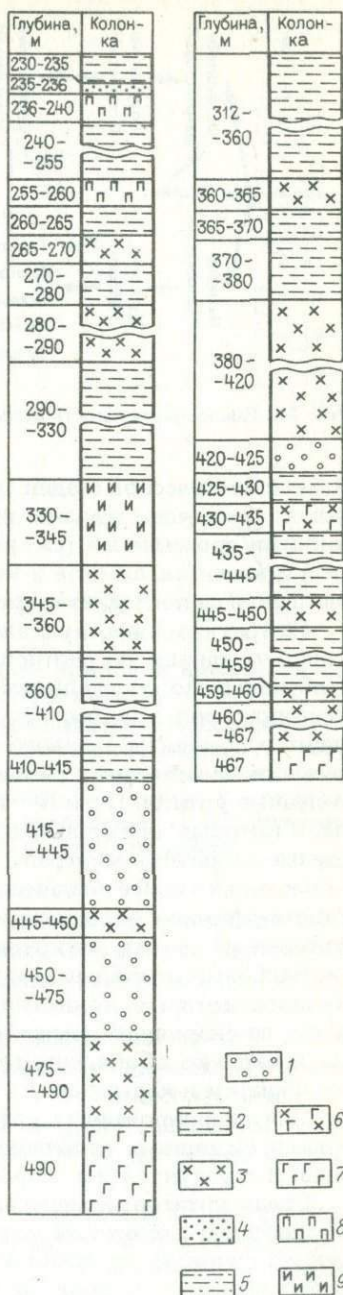




Рис. 27. Последовательность вторичных изменений нефелина (а) и фассаита (б)

тометасоматической стадии (шпреуштейн, зернистые скопления минералов) пересечены жилами значительной мощности (1–5 м), а также тонкими прожилками (см, рис. 21, е) натролита, анальцима, канкринита и кальцита, альбита и кальциевого цеолита, формировавшимися частично и на последних стадиях автотометасоматоза.

На трехкомпонентную диаграмму $Al_2O_3 - CaO - R_2O$ (рис. 28) нанесены данные по соотношению этих компонентов в 75 образцах, отобранных по определенной сети опробования на Кия-Шалтырском месторождении. На диаграмме выделяется несколько полей, отражающих особенности валового химического состава и минеральных парагенезисов отдельных разновидностей пород. Поле I — свежие, неизмененные уртиты. Поле II — измененные и частично измененные уртиты, в которых значительную роль играют натриевые и натриево-кальциевые вторичные минералы. Кальцийсодержащие продукты являются несколько более поздними, развиваются по натриевым минералам. Типоморфными минералами здесь являются натролит, содалит, кальцевый цеолит, канкринит.

Наиболее обогащены кальциевыми минералами породы, точки составов которых концентрируются в верхней части поля II, сближаясь со скарнированными ийолитами и ийолит-уртитам. Эти породы несколько обогащены темноцветными минералами, замещаемыми гранатом и кальцитом.

Для скарнированных уртитов (поле III) характерно развитие не только скарновых минералов по пироксену, но и кальциевых вторичных продуктов по нефелину — кальцита, томсонита и других.

Среди уртитов, измененных в различной степени (поле IV), преобладающим вторичным минералом является либнерит. По сравнению со свежими уртитам эти породы характеризуются относительно уменьшением роли CaO , R_2O , некоторым увеличением Al_2O_3 .

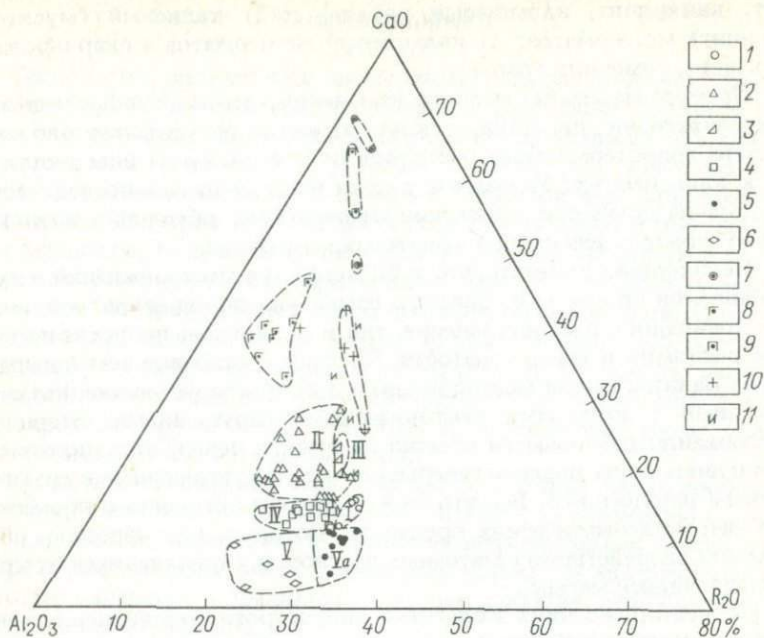


Рис. 28. Диаграмма составов разновидностей уртитов и вмещающих пород Кия-Шалтырского месторождения.

1–6 — уртиты: 1 — неизменные, 2–6 — измененные с преобладанием различных вторичных продуктов (2 — кальциевых минералов по нефелину, 3 — кальциевых минералов по фассаиту — скарнирование, 4 — слюд — мусковита, серицита, либнерита, 5 — бёмита, гиббсита, 6 — цеолитов); 7 — скарны; 8 — габбро; 9 — пироксениты; 10–11 — ийолиты: 10 — скарнированные, 11 — неизменные. I–V–Va — поля разновидностей уртитов (см. текст)

Как следует из парагенетических ассоциаций минералов, на стадию калиевого метасоматоза наложились кальциевый метасоматоз и скарнирование, приведшие к образованию канкринита, кальциевого цеолита, граната, цоизита.

На месторождении выделяют также измененные уртиты, отличающиеся незначительным распространением кальциевых минералов и низкими содержаниями CaO (поля V и Va). Типоморфными вторичными минералами для них являются натролит, альцим, содалит (поле V), а в некоторых разновидностях также бёмит и гиббсит (поле Va).

Исходя из анализа минеральных ассоциаций и характера вторичных изменений уртитов определены четыре основных этапа эволюции метасоматического процесса: 1) гидролиз и натриевый метасоматоз (натролит, содалит, бёмит, гиббсит); 2) натриево-кальциевый (аль-

бит, канкринит, кальциевый цеолит) и 3) калиевый (мусковит, серицит) метасоматоз; 4) кальциевый метасоматоз и скарнирование (кальцит, томсонит, гранат).

Процесс метасоматического изменения уртитов Кия-Шалтырского месторождения является, таким образом, результатом эволюции состава гидротермальных растворов от щелочного натриево-калиевого к кальциевому. Указанные стадии накладывались последовательно друг на друга при понижении температуры, обусловив возникновение сложных ассоциаций вторичных минералов.

Необходимо отметить, что в большинстве месторождений и рудопроявлений процессы вторичного изменения пород имеют как широкое площадное распространение, так и локальное: приурочены к зонам разломов и трещиноватости. Последнее особенно четко выражено на Баянкольском месторождении, где фиксируется мощная зона, связанная с крупными тектоническими нарушениями. Вторичные образования развиваются обычно на стыках зерен, по микротрещинам и лишь более поздние генерации — по макротрещинам и дизъюнктивным нарушениям. Все это может свидетельствовать о преобладании аутометасоматических процессов, которые, как известно, обусловлены воздействием остаточных растворов, отделяющихся от кристаллизующейся магмы.

На месторождениях Кольского полуострова проявились два процесса изменения нефелина: гидротермальный метасоматоз, сопровождавшийся образованием содалита, канкринита, гидрослюдь и цеолита, и химическое выветривание в зонах разломов, приводившее к формированию калиевой гидрослюдь, бейделита, монтмориллонита, шпреуштейна (линейные коры выветривания). Большая роль химического выветривания пород — отличительная черта массивов Кольского полуострова (гидротермальный метасоматоз характерен не только для Кия-Шалтырского, но и для большинства других изученных объектов).

Условия становления интрузий, геологическая обстановка и в значительной степени состав вмещающих пород определяют интенсивность, направленность и химизм процессов. Так, для пород Мухальского и Кия-Шалтырского массивов типично обогащение кальцием магматических породообразующих минералов (см. табл. 6, 8, 10), интенсивное развитие продуктов кальциевого метасоматоза (канкринит, кальцит — см. табл. 13), что связано, видимо, с контаминацией магмой вмещающих известняков и соответствующей ролью кальция и карбонатов на всех стадиях формирования интрузий, в том числе и гидротермального метасоматоза.

Технология переработки нефелинового сырья включает в себя ряд замкнутых циклов выщелачивания и осаждения. К концу процесса в щелочных растворах, многократно прошедших эти циклы, накапливаются соли галлия, рубидия и цезия. Это делает возможным попутное извлечение указанных металлов при производстве глинозема. Попутное извлечение галлия уже освоено в промышленном масштабе, получение солей рубидия и цезия находится в стадии освоения. Извлечение из нефелиновых руд всех остальных микроэлементов не представляет никакого промышленного интереса, но изучение их распределения может способствовать формационной типизации нефелиновых пород и их перспективной оценке. Поэтому в данной работе приводится характеристика распределения довольно широкого круга микроэлементов в нефелиновых рудах описываемых месторождений и проявлений.

Существенно нефелиновые породы вследствие их анхимоминерального состава бедны микроэлементами (по сравнению с другими щелочными породами, в частности нефелиновыми сиенитами). Относительно высоки в них содержания только тех микроэлементов, которые связаны с нефелином — галлия, рубидия, стронция, бария, иногда цезия (табл. 18).

В настоящее время глиноземной промышленностью используются только высококачественные виды нефелинового сырья — хибинские нефелиновые концентраты и уртиты Кия-Шалтырского месторождения. Первые по сравнению с другими видами нефелинового сырья содержат максимальные количества галлия, а по содержаниям рубидия уступают только синныритам. Они являются наиболее перспективным сырьем для попутного извлечения редких элементов. Характерной особенностью их являются повышенные концентрации "ювелирных" редких элементов — ниобия, тантала, циркония, а также сидерофильных элементов — хрома и ванадия. Если учесть, что концентраты содержат лишь небольшую примесь темноцветных и аксессуарных минералов, обогащенных перечисленными элементами, указанное обстоятельство отражает принадлежность хибинских нефелин-апатитовых руд к специфической агпаитовой формации щелочных пород, которой свойственны резко повышенные содержания как литофильных, так и сидерофильных редких элементов, что обусловлено глубинным происхождением материнских магм.

Уртиты Кия-Шалтырского месторождения значительно уступают хибинским концентратам по содержанию большинства микроэлементов, в том числе галлия и рубидия. Однако в процессе переработки уртитов происходит накопление этих элементов в оборотных растворах до концентраций, достаточных для их рентабельного попутного извлечения. Кия-Шалтырский и другие массивы, к которым приу-

Таблица 18

Средние содержания микроэлементов (галлия, стронция и рубидия — в усл. ед., остальных элементов — в г/т)
в нефелиновых рудах и получаемых из них нефелиновых концентратах

Месторождения, рудопроявления	Породы, материал	Ga	Li	Rb	Sr	Ba	Pb	Zn	Cr	V	Co	Ni
Хибинские	Концентрат	54	5	105	420	440	13	64	70	49	—	—
Кня-Шалтырское	Уртиты	18	13	24	770	150	15	40	26	13	13	6
Горячегорское	Руда	21	30	14	720	200	8	150	14	13	31	< 5
	Концентрат	18	36	21	330	340	15	100	5	8	5	< 5
Медведкинское	Руда	23	120	26	750	350	10	80	40	24	14	< 5
	Концентрат	20	182	27	500	460	18	30	11	4	11	< 5
Мухальское	Уртиты	24	37	66	520	170	36	40	32	6	8	7
	Концентрат	20	27	59	780	180	30	< 30	< 5	5	< 3	5
	Ййолиты	23	31	47	1000	140	30	60	20	9	12	5
	Концентрат	18	25	45	1100	170	35	30	5	7	< 3	5
Нижне-Буруль- зайское	Руда	20	51	25	1300	150	16	80	13	14	24	5
	Концентрат	17	64	28	1200	160	15	76	13	7	8	5
Баянкольское	Ювит-уртиты	25	11	54	1000	710	10	< 30	5	5	< 3	< 5
Дахунурское	Уртиты	16	22	25	1200	130	5	< 30	27	31	8	< 5
	Ййолиты	17	6	16	1400	90	7	40	22	64	8	< 5
Сынырьское	Сынырьиты	30	2,4	590	210	620	23	100	9	25	< 3	< 5

рочены описываемые месторождения (за исключением Хибинского) относятся к ряду щелочных формаций, сформировавшихся без существенного участия ювенильного (глубинно-мантийного) вещества. Следствие этого — низкие концентрации в нефелиновых рудах (и других щелочных породах) таких массивов ниобия, тантала и циркония.

Горячегорские руды, а также сходные с ними руды Медведкинского проявления довольно близки к ургитам Кия-Шалтырского месторождения по содержаниям большинства рассматриваемых элементов и отличаются лишь несколько большим количеством галлия, сидерофильных элементов и бария. Особенностью медведкинских ийолит-уртитов являются относительно повышенные содержания лития, обусловленные либениритизацией части пород.

Содержания большинства микроэлементов в нефелиновых рудах месторождений Кузнецкого Алатау и перспективных месторождений и рудопоявлений Забайкалья и Тувы близки. Ийолит-уртиты Мухальского и Нижне-Бурульзайского месторождений в целом сходны с рудами Кузнецкого Алатау, им свойственны лишь несколько пониженные содержания сидерофильных микроэлементов и повышенные — стронция. Несколько специфичны мухальские руды — в отличие от руд остальных проявлений, связанных со щелочно-габброидными формациями (Кузнецкий Алатау, Дахунурское в Туве), в них часто отмечается значительная примесь биотита, нередко доминирующего среди фемических минералов. По-видимому, этим обусловлены более высокие концентрации в них рубидия (возможно, и галлия). Баянкольские ювит-уртиты содержат больше галлия и рубидия по сравнению с рудами щелочно-габброидных формаций (за исключением Мухальского месторождения), они также богаче барием и значительно беднее сидерофильными элементами.

Специфический ультракалиевый состав псевдолейцитовых сиенитов Сыннырского массива (сынныритов) отражается в основном на содержаниях рубидия, почти в 6 раз превышающих таковые в хибинских нефелиновых концентратах. Содержания лития и стронция в сынныритах, наоборот, наиболее низкие из всех изученных видов нефелинового сырья, а содержания галлия выше, чем в баянкольских рудах и в рудах месторождений щелочно-габброидной формации. Концентрации бария примерно одинаковы в сынныритах и баянкольских ювит-уртитах — в 2—4 раза выше, чем в ийолит-уртитах щелочно-габброидных массивов. Содержания ювенильных и сидерофильных микроэлементов весьма низкие — за исключением ванадия, являющегося типоморфным элементом калиевой щелочно-сиенитовой формации [25].

Концентрации микроэлементов в нефелиновых рудах и получаемых из них нефелиновых концентратах в большинстве случаев мало отличаются друг от друга. Поэтому для выяснения характера распре-

деления этих элементов можно сопоставить их содержания в рудах, концентратах и хвостах сепарации (табл. 19), что позволит свести к минимуму влияние случайных и систематических лабораторных погрешностей.

Характер распределения микроэлементов по минеральным компонентам нефелиновых руд, как можно судить по данным табл. 19 и 20, сравнительно однообразен.

Галлий распределен весьма равномерно, но содержания его в фемических минералах немного выше (в 1,5—2 раза), чем в салических. Это явствует из сравнения его содержаний в нефелиновых рудах с различным количеством фемических минералов, а также в продуктах их обогащения и мономинеральных фракциях основных рудообразующих минералов. Таким образом, обогащение нефелиновых руд, заключающееся в сепарации большей части фемических компонентов, несколько снизит содержания галлия в сырье, поступающем в глиноземное производство.

Рубидий распределен более сложно: минералами-концентраторами его в рудах большинства месторождений являются слюды: содержание рубидия в нефелине и полевом шпате в несколько раз, а в пироксене — на 1—2 порядка ниже, чем в слюде. Нефелиновые концентраты из пироксеновых ийолит-уртитов немного обогащаются рубидием по сравнению с исходными рудами (горячегорские, медведкинские, нижнебурульзайские), а из биотитовых разновидностей, наоборот, несколько обедняются (мухальские). Только в сынныритах содержания рубидия в салических минералах, особенно в калиевом полевом шпате, выше, чем в биотите.

Содержания стронция в нефелинах выше, чем в пироксенах и биотите, однако нефелиновые концентраты обычно обеднены стронцием по сравнению с исходными рудами (за исключением мухальских руд, где соотношения обратные). Наиболее вероятным объяснением этого противоречия является высокая концентрация стронция в аксессуарном апатите, образующем обычно мелкие включения в пироксене и других темноцветных минералах. В рудах же Мухальского месторождения значительная часть стронция заключена в карбонате и вместе с ним переходит в нефелиновый концентрат.

Барий концентрируется в калиевых полевых шпатах, поэтому наиболее богаты им баянкольские и сыннырские руды. Сравнительно высокое содержание бария зафиксировано в биотите из ювит-уртитов Баянкольского месторождения. В нефелинах его содержание лишь несколько выше, чем в пироксенах, поэтому барий незначительно накапливается в нефелиновых концентратах.

Содержания свинца в нефелиновых рудах весьма невысоки. В концентратах из руд Кузнецкого Алатау он накапливается, в забайкальских же рудах в одной части технологических проб переходит в концентраты, а в другой — в хвосты сепарации. Практического инте-

Таблица 19

Содержания микроэлементов (галлия, рубидия и стронция — в усл. ед., остальных элементов — в г/т)
в нефелиновых рудах Мухальского месторождения и продуктах их обогащения

Номер пробы	Ga	Li	Rb	Sr	Ba	Pb	Zn	Cr	V	Co	Ni
Мх-5	23—25	26—31	40—47	1100—830	440—260	17—31	30—90	8—16	3—13	3—10	5—8
	31	65	65	280	170	45	260	160	26	37	25
Мх-6	23—25	28—31	47—41	1500—920	600—240	20—26	40—140	8—18	6—26	5—19	5—9
	31	44	37	240	100	30	290	81	58	42	18
Мх-7	28—27	86—140	51—78	1100—760	330—330	34—36	30—60	12—8	4—9	4—12	5—6
	48	460	230	290	300	72	270	100	44	37	52
Мх-8	23—24	24—34	47—54	910—680	400—220	18—8	40—40	7—6	4—6	3—12	5—5
	38	75	67	190	230	37	280	61	48	79	37
Мх-9	21—24	31—56	42—58	1100—850	270—220	21—27	30—40	5—7	4—6	3—8	5—5
	48	160	140	260	200	64	270	56	38	39	19

Примечание. В числителе первая цифра — содержание элемента в нефелиновых концентратах, вторая — в исходных рудах, в знаменателе — содержание в хвостах сепарации.

Таблица 20

Содержания микроэлементов (галлия, рубидия и стронция — в усл. ед., остальных — в г/т)
в рудообразующих минералах нефелиновых руд некоторых месторождений и проявлений Сибири

Месторождение, рудопоявление	Порода	Минерал	Ga	Li	Rb	Sr	Ba	V	Co	Ni	Cr
Кия-Шалтырское	Уртиты	Нефелин	17	9	19	340	180	—	—	—	—
Медведкинское	Ййолит-уртиты	”	16	7	37	740	450	—	—	—	—
Дахунурское	Уртиты	”	14	17	30	780	140	—	—	—	—
”	Ййолиты	”	17	9	19	1000	60	—	—	—	—
Баянкольское	Ювит-уртиты	”	27	7	46	420	750	—	—	—	—
Кия-Шалтырское	Уртиты	Пироксен	30	6	6	240	40	33	32	—	—
Горячегорское	Ййолит-уртиты	”	17	15	2	240	45	18	45	—	—
Дахунурское	Уртиты	”	27	2	3	200	85	100	45	—	—
”	Ййолиты	”	27	3	2	270	130	90	40	—	—
Баянкольское	Ювит-уртиты	”	23	8	31	290	290	16	22	—	—
”	”	Биотит	37	123	255	200	1600	20	35	—	—
”	”	Калиевый по- левой шпат	17	6	40	920	2000	—	—	—	—
Кия-Шалтырское	Уртиты	Магнетит	82	—	—	30	50	28	100	75	50
Горячегорское	”	”	85	—	—	—	—	60	100	35	220
”	”	”	65	—	—	—	—	30	110	8	120
Медведкинское	Плагиоклазо- вые ййолиты	”	42	—	—	—	—	720	65	85	150
”	То же	”	47	—	—	—	—	700	78	39	72
Дахунурское	Ййолиты	”	64	—	—	—	—	600	110	37	52
Баянкольское	Ювит-уртиты	”	96	—	—	—	—	84	29	47	30

реса установленный уровень содержания свинца не представляет.

Цинк и сидерофильные микроэлементы всегда концентрируются в хвостах сепарации, поэтому связь их с фемическими минералами сомнений не вызывает. Это же относится и к ювенильным элементам — ниобию, танталу, цирконию, лантаноидам: их содержания в хвостах всегда резко повышены по сравнению с содержаниями в рудах и особенно нефелиновых концентратах.

Содержания в нефелиновых рудах ряда микроэлементов зависят от формационной принадлежности соответствующих массивов. Так, в распределении микроэлементов в породах Баянкольского и Сыннырского массивов, относящихся к разным формациям щелочно-сиенитовой группы, можно проследить некоторые общие особенности, отличающие их от нефелиновых пород щелочно-габброидного типа. В рудах указанных массивов содержания галлия выше, чем в ийолит-уртитях щелочно-габброидных массивов. Это различие, видимо, устойчиво, так как в ювитах мелких проявлений щелочно-сиенитового типа в Туве содержания галлия аналогичны установленным для месторождений данной генетической группы. Подобным образом различаются содержания галлия в нефелинах из пород сопоставляемых формаций. Концентрации рубидия в баянкольских рудах несколько выше, чем в рудах щелочно-габброидного типа, но в целом они довольно строго коррелируются с содержаниями калия, и по величине калий-рубидиевого отношения между нефелиновыми рудами этих формаций не обнаруживается устойчивых различий. Особое место занимают ультракалиевые сынныриты — указанное отношение для них значительно ниже (в 2—4 раза), чем для всех остальных видов нефелинового сырья.

Наиболее четко различаются нефелиновые породы сопоставляемых формационных типов по концентрациям сидерофильных микроэлементов — хрома, ванадия, кобальта. Примечательно, что эта особенность не связана с разным количеством в рудах фемических минералов, концентрирующих сидерофильные элементы. Как видно на рис. 29, концентрации сидерофильных элементов в нефелиновых рудах щелочно-габброидных комплексов при одинаковых количествах фемических компонентов ($Fe + Mg + Ti$) заметно выше таковых в ювит-уртитях Баянкольского массива. Это подтверждается также различиями в содержаниях ванадия и кобальта в пироксенах и магнетитах из руд обоих типов (см. табл. 20). Содержания хрома и никеля в пироксенах близки к порогу чувствительности анализа (10 г/т) и неинформативны. Обнаруженные в магнетитах из ювит-уртитов Баянкольского массива низкие содержания ванадия, кобальта и хрома подтверждают различия в содержаниях этих микроэлементов в магнетитах щелочно-габброидной и щелочно-сиенитовой формаций, установленные ранее [24].

В заключение остановимся на сравнении практической ценности

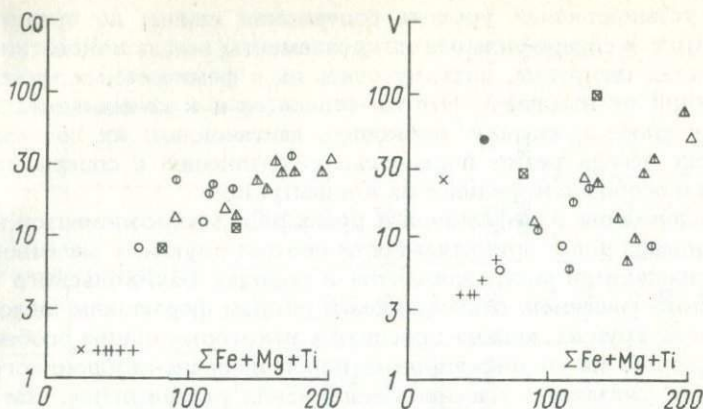


Рис. 29. Соотношение сидерофильных элементов в рудах месторождений различной формационной принадлежности.

Усл. обозначения см. на рис. 17

микроэлементов — галлия и рубидия — в нефелиновых рудах описанных месторождений. Ввод в эксплуатацию Горячегорского месторождения (резервной базы АГК) позволит сохранить тот же уровень попутного производства галлия (а также рубидия), какой возможен при переработке кия-шалтырских руд. Использование руд Мухальского месторождения даст возможность получать галлий в таких же или немного больших, а рубидий — в значительно больших количествах по сравнению с возможными на АГК. Переработка баянкольских руд также позволит извлекать галлий и рубидий на значительно более высоком уровне по сравнению с рудами месторождений Кузнецкого Алатау. Второстепенные рудопроявления Забайкалья (Нижне-Бурульзайское) и Тувы (Дахунурское) по возможному уровню производства редкометалльной продукции соответствуют Кия-Шалтырскому. Руды всех перечисленных месторождений в качестве потенциального источника редких металлов заметно уступают хибинским нефелиновым концентратам. Только сынныриты, несколько проигрывая последним как источник попутного получения галлия, могут значительно превзойти их по уровню производства рубидиевых солей.

Влияние минерального состава руд на технологический процесс переработки (качество спека, извлечение полезных компонентов)

Выяснение роли и поведения различных минеральных компонентов нефелиновых руд в процессе спекания приобрело особенную актуальность в связи с вовлечением в переработку и промышленную

оценку кроме нефелинового концентрата из хибинских апатит-нефелиновых руд также и необогащенных нефелиновых пород, особенно уртитов Кия-Шалтырского месторождения. Из вышеизложенного следует, что уртиты редко представляют собой двуминеральную породу, а чаще характеризуются многообразием минеральных ассоциаций, возникших в результате воздействия метасоматических и гидротермальных процессов.

Авторами совместно с технологической группой ВАМИ (ЛТГН) рассматривалось влияние минерального состава нефелиновых пород на процессы, происходящие при термической обработке шихт, содержащих эти породы, и на степень извлечения полезных компонентов из полученных при этом спеков. Изучался процесс спекания шихт, в состав которых наряду с известняком, а в ряде случаев и содой входили кольский нефелиновый концентрат, кия-шалтырская руда с различным соотношением минеральных составляющих, а также выделенные из них мономинеральные фракции. Оказалось, что скорости взаимодействия между компонентами в исследованных шихтах, состав получаемых спеков и их структура в значительной степени зависят от минерального состава руды. Исследовано также влияние главных минералов уртитов — нефелинов и пироксенов из руды Кия-Шалтырского месторождения и кольского нефелинового концентрата на процесс спекания шихт и извлечение полезных компонентов — Al_2O_3 и R_2O .

Минеральный и химический составы образцов, использованных для технологических исследований, приведены в табл. 6—11, 15, 17. Установлено, что кольский и кия-шалтырский нефелины отличаются по реакционной способности в процессе спекания. При термической обработке шихт, составленных из соответствующих фракций минералов и углекислого кальция и не содержащих соды, большей реакционной способностью при температурах до $1200^\circ C$ обладает кольский нефелин, меньшей — кия-шалтырский (рис. 30).

Данные опытов по спеканию шихт, в состав которых вошли в различной степени измененные уртиты и мономинеральные фракции, показали, что наибольшей реакционной способностью из исследованных минералов характеризуется канкринит, взаимодействие с которым практически заканчивается до температуры $915^\circ C$ (шихта содержит углекислый кальций и мономинеральную фракцию). Наименьшая реакционная способность в шихтах, не содержащих соды, свойственна кия-шалтырскому нефелину и натролиту. Скорость взаимодействия этих минералов резко возрастает при температурах выше 1215 и $1240^\circ C$. Введение соды в шихты, содержащие кия-шалтырский нефелин, ускоряет происходящие при спекании взаимодействия даже в области более низких температур (900 — $1000^\circ C$). Взаимодействия натролита с известняком даже в присутствии соды начинаются только при температурах около 1050 — $1100^\circ C$, а в ших-

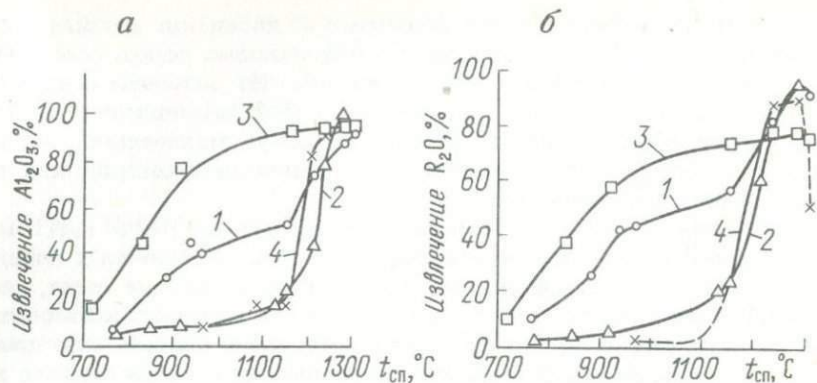


Рис. 30. Влияние входящих в шихту минералов и их количественного соотношения на степень извлечения полезных компонентов (а — оксида алюминия, б — оксидов щелочей) из спеков, полученных из шихт:

1 — с кольским нефелином; 2 — с кия-шалтырским нефелином; 3 — с канкринитом; 4 — с натролитом

тах, содержащих анальцим, при еще более высоких температурах — 1180 °С. Установлено, что на скорость взаимодействия натролита значительно влияют степень его кристаллизации, наличие в сфере реакции жидкой фазы, появляющейся при взаимодействии и плавлении других компонентов шихты, а также структурные и количественные взаимоотношения натролита и других вторичных по нефелину минералов.

При изучении процесса спекания шихт, содержащих различные разновидности уртитов Кия-Шалтырского месторождения, было установлено, что при температурах до 1150 °С взаимодействия с содой и известняком наиболее полно протекают в шихтах с максимальным количеством таких вторичных по нефелину минералов, как бёмит, каолинит, канкринит, а также с неизменным нефелином. В то же время указанные минералы не влияют на максимальное количество образующихся щелочных алюминатов в спеках, полученных при более высоких температурах (1250—1290 °С). Однако их присутствие улучшает кристаллизацию спеков; в производственных условиях это может привести к увеличению извлечения полезных компонентов, так как известно, что с улучшением кристаллизации нефелиновых спеков уменьшаются вторичные потери полезных компонентов в процессе выщелачивания.

Эгирин-салит и фассаит влияют на реакции в бессодовых шихтах только при температурах, близких к температурам плавления темноцветных минералов. Добавка соды ускоряет взаимодействие при низких температурах только в шихтах, содержащих эгирин-салит, и прак-

тически не играет роли при взаимодействии фассаита с компонентами шихты.

Результаты опытов по выявлению влияния темноцветных минералов на процесс термической обработки (спекание шихт и извлечение полезных компонентов) показывают следующее: увеличение содержания фассаита и продуктов его разложения в пробах нефелиновой руды Кия-Шалтырского месторождения от 16–17 % до 38–41 % (соответственно от 4,5 до 6,1–6,3 % в расчете на Fe_2O_3) снижает извлечение глинозема из спеков от 86–88 % до 80–81 % и щелочей от 91–92 % до 88–90 %; снижается также температура плавления спеков и возрастает их плотность, что может привести к дальнейшему уменьшению извлечения полезных компонентов в производственных условиях. В связи с этим содержание фассаита и продуктов его разложения должно быть ограничено в рудах примерно до 20 % (5 % в расчете на Fe_2O_3).

Глава 5

ПРИНЦИПЫ И ПАРАМЕТРЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА РУД И ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАК КОМПЛЕКСНОГО СЫРЬЯ

Комплексный характер нефелинового сырья обуславливает особый подход к оценке его качества как глиноземсодержащей руды и целесообразности практического использования руд конкретных месторождений. В связи с этим возникает необходимость разработки специфических критериев, отражающих своеобразие этого сырья. С содержанием основных полезных компонентов — глинозема и щелочей (натриевой и калиевой) — прямо связана рентабельность переработки руд с точки зрения условий проведения технологического процесса, а также объема и ценности конечной продукции.

Как указывалось ранее (см. гл. 2), при переработке нефелиновых и других щелочных алюмосиликатных руд по технологии спекания необходимо определенное соотношение Al_2O_3 и R_2O в шихте. В связи с этим при использовании низкощелочных глиноземсодержащих руд требуется специальное введение в шихту щелочей, что отрицательно сказывается на выпуске товарных содопродуктов и вызывает некоторые трудности в проведении технологического процесса.

Основными носителями рассматриваемых полезных компонентов являются фельдшпатоиды, но лишь в нефелине соотношение глинозема, щелочей и кремнезема обеспечивает оптимальные технологические параметры качества. Последние выражаются в виде модулей — щелочного M_{R_2O} и кремниевого M_{Si} — и отражают особенности вещественного состава руд. Для наиболее качественных нефели-

линовых руд значение M_{R_2O} должно быть около 1,0 (пониженные значения его определяют необходимость подачи части получаемых щелочных растворов в голову процесса), а $M_{Si} \sim 2,2$ — максимально близкое к таковому для нефелина. Следует отметить двоякую роль кремнезема в нефелиновых рудах. С одной стороны, он обуславливает комплексный характер сырья (переходит при переработке в попутный продукт — белитовый шлам), с другой — рост его содержания в сырье влечет за собой существенное увеличение энерго- и капиталоемкости процесса (возрастает расход известняка, топлива, других материалов) и повышение выхода шлама, что затрудняет полную утилизацию последнего. Кремниевый модуль выражает рассматриваемую особенность состава сырья и как следствие — изменение величины материального потока в процессе.

Как уже отмечалось, значения M_{R_2O} и M_{Si} определяются прежде всего особенностями минерального состава пород. В частности, интенсивное развитие ряда вторичных (по нефелину) и второстепенных (прежде всего полевых шпатов) минералов обычно приводит к заметному снижению значений M_{R_2O} и росту M_{Si} , в результате чего переработка нефелиновых руд по традиционной схеме становится экономически невыгодной.

С кремниевым модулем взаимосвязан и кальциевый модуль M_{Ca} , характеризующий уровень содержания в руде оксида кальция, связывающего при спекании часть кремнезема в двукальциевый силикат и снижающего таким образом влияние кремниевого модуля.

Наличие в нефелиновых рудах темноцветных минералов (пироксены, амфиболы и др.), носителей сидерофильных элементов (Fe_2O_3 , MgO , TiO_2), вызывает одновременно "заражение" сырья этими элементами, неблагоприятно влияющими на технологический процесс, и разубоживание руд.

Некоторые элементы-примеси (Cl, S, F и др.), в основном входящие в состав вторичных и второстепенных минералов, также оказываются нежелательными в технологическом процессе: в условиях замкнутых циклов они накапливаются, что приводит к серьезным осложнениям в производстве; эти примеси ухудшают также санитарные условия и качество получаемой продукции.

Поведение большинства элементов-примесей в процессе переработки нефелинового сырья изучено недостаточно, но известно, что воздействие их может быть как положительным, так и отрицательным. В частности, литий положительно влияет на технико-экономические показатели получения конечного продукта — алюминия. Переходя в состав глинозема и далее в криолит-глиноземный расплав, он способствует снижению расхода электроэнергии и повышению производительности электролизеров.

Галлий, накапливающийся в алюминатных растворах, переходит далее в глинозем и снижает качество алюминия, что обуславливает

необходимость вывода его из процесса, но вместе с тем высокая ценность получаемого попутно металла позволяет существенно повысить экономические показатели основного производства.

Одним из способов снижения влияния вредных примесей и повышения качества руд является их механическое обогащение (см. гл. 2) посредством сепарации железосодержащих темноцветных минералов, но применение его усложняет и удорожает производство и приводит к необходимости дополнительных капитальных вложений и эксплуатационных издержек.

Следует отметить, что существующий способ спекания, являясь высокотемпературным процессом, обеспечивает разложение всех минералов с образованием идентичных основных минеральных фаз, в некоторой степени нивелирует особенности минерального состава руд и обеспечивает извлечение полезных компонентов из руд любого состава (при ограничении содержания Fe_2O_3 — не более 5,0 %). В то же время состав минералов и их количественные соотношения влияют на параметры технологического процесса (температуру спекания, площадку спекообразования и др.), уровень извлечения полезных компонентов и, следовательно, на технико-экономические показатели. Таким образом, вещественный состав руды определяет величину указанных параметров качества (M_{Si} , M_{Ca} , M_{R_2O}) и, соответственно, ценность нефелиновых пород как руд для производства глинозема и других продуктов.

С учетом соотношения шести основных компонентов (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , Na_2O и K_2O), обуславливающих качество нефелиновых руд, разработана диаграмма, позволяющая в самой общей форме и на предварительной стадии изучения сравнивать качество нефелиновых и других алюмосиликатных пород, а также их потенциальную значимость как глиноземсодержащих руд. На этой диаграмме атомные количества полезных компонентов объединены в одну величину ($Al + Na + K$), другую составляет атомное количество суммарного железа и третью — атомное количество кремния, уменьшенное на половину количества кальция (т. е. на то количество кремния, которое будет связано в ортосиликат присутствующим в руде кальцием). Все три величины приводятся к 100 % и наносятся на треугольную диаграмму ($Si - 0,5Ca$) — $Fe - (Al + Na + K)$.

На рис. 31 приведена такая диаграмма для химических составов представительных технологических проб руд и нефелиновых концентратов основных эксплуатируемых и перспективных месторождений СССР. В ее правом углу, в максимальной близости к вершине $Al + Na + K$, расположены точки средних составов нефелиновых концентратов из двух основных типов руд Мухальского месторождения и концентрата из уртитов Нижне-Бурульзайского рудопроявления. Они заметно превосходят по качеству как уртиты Кия-Шалтырского месторождения, так и нефелиновые концентраты Хибин и представляют

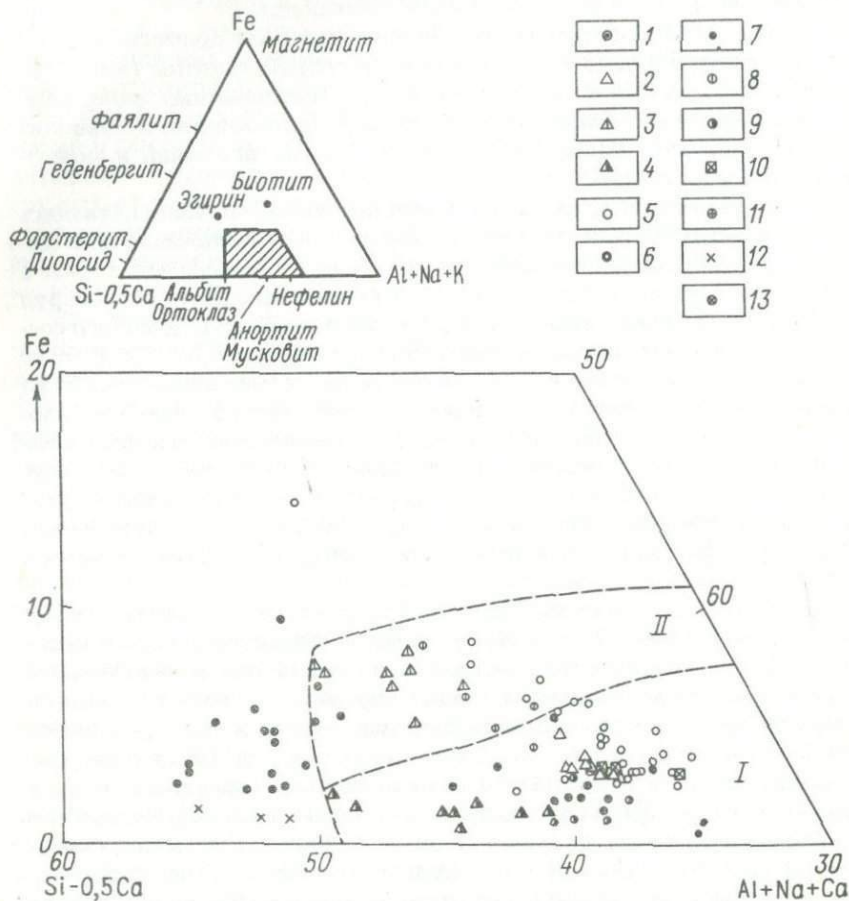


Рис. 31. Диаграмма соотношений основных химических компонентов, определяющая потенциальную ценность нефелиновых пород как глиноземсодержащих руд:

1 — Хибинские месторождения — нефелиновый концентрат (среднее); 2 — Кия-Шалтырское месторождение — уртиты; 3—4 — Горячегорское месторождение и Медведкинское рудопроявление: 3 — руды, 4 — концентраты; 5—7 — Мухальское месторождение: 5—6 — руды (5 — технологические, 6 — крупнотоннажные пробы), 7 — нефелиновые концентраты; 8—9 — Нижне-Бурульзайское рудопроявление: 8 — руды, 9 — нефелиновые концентраты; 10 — Дахунурское рудопроявление — уртиты; 11 — Байанкольское месторождение — ювит-уртиты; 12 — сынныриты; 13 — нефелиновые сиениты различных месторождений. Поле I — высококачественные руды, поле II — руды, требующие предварительного обогащения

собой наиболее выгодную (по минералого-технологическим параметрам) для производства глинозема разновидность нефелинового сырья. Левее и частично выше размещаются точки нефелиновых руд и концентратов несколько худшего качества с более высокой долей (Si — 0,5Ca) и частично Fe, но также пригодных для переработки на глинозем. В этой области концентрируются точки среднего состава хибинских нефелиновых концентратов и кия-шалтырских уртитов, а также нефелиновых концентратов из ийолит-уртитов Нижне-Бурлужайского массива и плагиоклазовых ийолит-уртитов рудопроявлений Кузнецкого Алатау. Сюда же попадают точки составов калиево-полевошпатовых уртитов и ювитов Баянкольского массива, пригодных для производства глинозема и сопутствующих продуктов без предварительного обогащения, а также значительная часть точек мухальских руд. Все это — высококачественное сырье, поступающее непосредственно в глиноземное производство (поле I).

Левее и выше этой области находятся точки более бедных нефелиновых руд проявлений Кузнецкого Алатау и Витимского плоскогорья с более высокими содержаниями темноцветных минералов и примесью плагиоклаза, не пригодных к переработке на глинозем без предварительного обогащения из-за их высокой железистости (поле II).

По взаимному расположению точек составов нефелиновых руд и получаемых из них концентратов легко заметить, что сепарация темноцветных минералов приводит не только к резкому снижению доли железа в сумме рассматриваемых элементов, но и к заметному изменению соотношений (Si — 0,5Ca) и (Al + Na + K) в пользу последних — с темноцветными минералами удаляется большое количество кремния и малое — алюминия и щелочей.

Линия, ограничивающая слева и сверху оба поля нефелиновых руд и концентратов, является приблизительной границей области химических составов нефелиновых пород, пригодных (с предварительным обогащением или без него) для переработки на глинозем и сопутствующие продукты.

Точки средних составов нефелиновых сиенитов многих массивов размещаются левее области потенциально ценных нефелиновых пород — щелочной полевошпат в их составе обычно доминирует над нефелином (при составлении диаграммы использованы литературные и частично оригинальные данные только по тем массивам, в которых нефелиновые сиениты обнажаются на площади не менее 2—3 км² и расположены в сравнительно благоприятных географо-экономических условиях). Сепарация темноцветных минералов из этих пород не может привести к существенному увеличению доли полезных компонентов в концентрате, а разделение калиевого полевошпата и нефелина в промышленных масштабах пока невозможно. Рассматриваемая диаграмма наглядно иллюстрирует вывод о нецелесообраз-

ности переработки нефелиновых сиенитов на глинозем. Единственным исключением из этого правила являются ультракалийевые породы типа сынныритов, которые при соотношениях основных компонентов, соответствующих нефелиновым сиенитам, из петрогенных щелочных металлов содержат почти исключительно калий.

Необходимо отметить, что одним из наиболее существенных параметров оценки качества руд, наиболее полно отражающим особенности вещественного состава, влияющие на извлечение полезных компонентов и величину материального потока, является расчетное содержание Al_2O_3 в спеке (способ расчета $Al_{сп. р.}$ приведен в гл. 6).

Характеристика нефелиновых руд эксплуатируемых и перспективных месторождений (табл. 21) дает возможность сравнить параметры их качества. Как видно из табл. 21, абсолютное содержание компонентов, в том числе глинозема, не может быть решающим критерием при оценке качества щелочных алюмосиликатных руд. Так, при более высоком ($\sim 28,6\%$) содержании Al_2O_3 в кольском нефелиновом концентрате расчетное содержание Al_2O_3 в спеке из него ($Al_{сп. р.}$) несколько ниже, чем в случае кия-шалтырской руды ($Al_2O_3 \sim 26,7\%$), практически совпадает с таковым для исходных мухальских руд ($Al_2O_3 - 25,8\%$) и значительно ниже, чем в концентрате обогащения последних. В то же время, несмотря на примерно тождественное содержание Al_2O_3 в кия-шалтырских уртитах и концентрате обогащения горячегорских руд, содержание глинозема в спеке из последнего значительно ниже.

Все эти "парадоксы" обусловлены различиями в содержании и количественных соотношениях других химических компонентов — оксидов щелочей, кальция, летучих (величина п.п.п.). На графиках (рис. 32) ясно видны взаимоотношения указанных параметров для руд различных месторождений. По этим основным параметрам как наиболее высококачественное нефелиновое сырье должен рассматриваться нефелиновый концентрат, получаемый из уртитов и ийолит-уртитов Мухальского месторождения.

Однако, как уже неоднократно подчеркивалось, для такого вида сырья, как нефелиновые руды, качество является главным, но не решающим фактором, обуславливающим целесообразность их промышленного использования. Большую, а иногда определяющую роль приобретают географо-экономические условия региона. Например, Мухальское и Баянкольское месторождения не могут быть освоены в ближайшей перспективе вследствие их расположения в экономически слабо освоенных районах, не имеющих связи с сетью железных дорог.

По мнению авторов, приведенные модули (M_{R_2O} , M_{Si} и M_{Ca}) должны служить показателями качества на всех стадиях геологоразведочных работ — для сравнительной оценки состава разновидностей пород и типов руд, рудных тел, участков и технологических проб.

Таблица 21

Характеристика перспективных месторождений и рудопроявлений нефелинового сырья

Регион	Месторождения, район	Руда, продукт	Выход концентрата, %	Содержание основных компонентов, %						M _{R₂O}	M _{Si}	M _{Ca}	Al _{сп.р.} , %
				Al ₂ O ₃	R ₂ O*	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	П.п.п.				
Северо-запад (Кольский полуостров)	Хибинские, Мурманская область	Нефелиновый концентрат	27	28,6	$\frac{17,8}{12,8-7,6}$	44,0	3,5	1,3	1,3	1,09	2,61	0,03	15,1
			—	26,7	$\frac{12,9}{11,0-2,8}$	40,2	4,5	7,9	4,3	0,79	2,56	0,21	15,2
Западная Сибирь (Кузнецкий Алатау)	Кия-Шалтырское, Кемеровская область	Уртиты Нефелиновый концентрат	75	30,0	$\frac{14,6}{12,5-3,2}$	39,3	1,6	6,9	4,8	0,80	2,23	0,19	17
			—	22,0	$\frac{9,8}{8,7-1,7}$	43,0	9,3	6,0	4,0	0,73	3,32	0,15	12,0
	Горячегорское, Красноярский край	Плагноклазовые ийолиты, ийолит-уртиты	—	22,0	$\frac{9,8}{8,7-1,7}$	43,0	9,3	6,0	4,0	0,73	3,32	0,15	12,0
			65	26,7	$\frac{—}{12,3}$	46,9	3,5	5,4	4,5	0,76	2,99	0,12	13,9
Восточная Сибирь (Забайкалье)	Мухальское, Бурятская АССР	Ийолит-уртиты	—	25,8	$\frac{13,1}{10,3-4,3}$	39,4	4,6	8,9	5,0	0,83	2,60	0,24	15,1

Продолжение таблицы 21

Регион	Месторождения, район	Руда, продукт	Выход концентрата, %	Содержание основных компонентов, %						M _{R₂O}	M _{Si}	M _{Ca}	Al _{сн.р.} , %
				Al ₂ O ₃	R ₂ O**	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	П.п.п.				
Восточная Сибирь (Забайкалье)	Мухальское, Бурятская АССР	Нефелиновый концентрат	75	28,0	$\frac{15,0}{12,0-4,5}$	38,6	0,5	9,2	6,2	0,88	2,34	0,26	17,1
	Сыннырское, Бурятская АССР	Сынныриты	—	22,7	$\frac{12,9}{1,0-18,0}$	54,4	1,3	0,3	0,5	0,93	4,07	0,01	10,6
	Сакунское, Читинская область	Сынныриты	—	20,7	$\frac{12,3}{0,8-17,4}$	56,8	1,95	1,0	1,6	0,97	4,66	0,02	9,5
Саяно-Тувинский	Баянокольское, Туви́нская АССР	Полевошпатовые уртиты, ювит-уртиты	—	26,4	$\frac{14,4}{11,0-5,2}$	43,1	3,3	4,0	5,4	0,89	2,81	0,10	14,4

* См. табл. 2.

Для этой же цели может применяться и такой параметр, как $Al_{сп.р.}$. Однако наибольшую значимость последний приобретает на заключительных стадиях изучения месторождений для сравнительной оценки качества средней товарной руды. Его уровень в значительной степени предопределяет целесообразность включения того или другого месторождения в сферу промышленной оценки.

Исходя из вышесказанного, были разработаны требования к качеству нефелинового сырья, поступающего в переработку (природная руда или концентрат обогащения — табл. 22), различающиеся для двух типов руд, отличающихся по соотношению оксидов натрия и калия.

Экономическая ценность глиноземсодержащего сырья определяется рядом показателей, совокупно характеризующих как минерально-технологические, так и стоимостные факторы его использования, одним из которых является общественная ценность (полезность) компонентов, извлекаемых при переработке нефелиновых руд. Наиболее простым и в достаточной мере универсальным критерием при этом служит цена получаемых продуктов. Она свидетельствует о потенциальной экономической ценности сырьевого источника. Так, при переработке 1 т кольского нефелинового концентрата может быть получена продукция (глинозем, кальцинированная сода, поташ и цемент), стоимость которой на 30 руб. выше стоимости товарной продукции (главным образом, глинозема), извлекаемой из 1 т боксита (альтернативного алюминиевого сырья). Следовательно, потенциальная общественная ценность комплексного нефелинового сырья существенно выше, чем бокситового.

В то же время показатель товарной продукции не дает возможности судить о затратах на ее получение. Наиболее употребительными критериями, позволяющими соотнести затраты по получению продук-

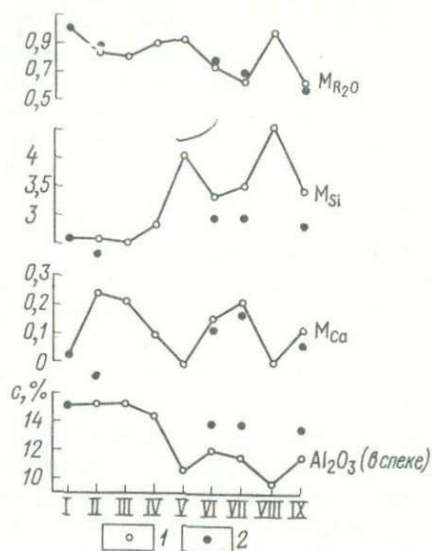


Рис. 32. Кривые вариации параметров качества руд (1) и концентратов (2) различных месторождений и рудопроявлений:

I — Хибинских, II — Мухальского, III — Кия-Шалтырского, IV — Баян-Кольского, V — Сыннырского, VI — Горячегогорского, VII — Медведкинского, VIII — Сакунского, IX — Андриюшкина Речка. с — содержания, М — модули

Таблица 22

Требования к качеству существенно натриевых (I)
и существенно калиевых (II) товарных нефелиновых руд

Показатель	I	II
Содержание, %:		
Al ₂ O ₃	≥ 26,0	—
Al ₂ O ₃ + 0,35Na ₂ O + K ₂ O	—	≥ 37,0
Fe ₂ O ₃	≤ 5,0	≤ 5,0
Al _{сп.р}	≥ 13,5	≥ 9,5
M _{R₂O}	≥ 0,75	≥ 0,9

ции с ее стоимостью, являются показатели рентабельности производства и срока окупаемости капитальных вложений. При переработке кольского нефелинового концентрата в условиях ПШГО (с учетом его расширения) рентабельность производства ожидается на 5 % выше, а срок окупаемости капитальных вложений приблизительно на 6 лет меньше, чем при использовании бокситов среднего качества.

Показатели рентабельности производства и срока окупаемости капитальных вложений свидетельствуют об экономической эффективности переработки любого сырья в целом, но вместе с тем на их основании нельзя судить о сравнительной народнохозяйственной эффективности вовлечения в промышленное использование того или иного источника сырья. Для нефелиновых руд как комплексного сырья это может быть сделано лишь путем составления затрат, связанных со строительством предприятия на их базе, с суммарными издержками, необходимыми для получения аналогичной продукции в условиях традиционного (специализированного) производства. Однако такое сопоставление позволяет судить об эффективности получения продуктов комплексной переработки нефелинового сырья в целом, а не каждого продукта (например, глинозема) в отдельности. Остается нерешенным вопрос: как соотносятся технико-экономические показатели производства глинозема из данного источника сырья с показателями его получения из всех других возможных источников. Только на этой основе могут быть установлены общая сравнительная эффективность производства и положение конкретного месторождения в общем ряду.

Ответ на поставленный вопрос может быть получен посредством исчисления затрат, относимых непосредственно на производство глинозема, путем исключения издержек, связанных с получением прочих продуктов (сода, поташа, удобрений и др.) в условиях специализированного производства.

В то же время реализация указанного подхода сопряжена с опре-

деленными трудностями. Например, рассчитанная таким образом себестоимость производства глинозема при переработке сырьевых модифицированным спекательным способом представляет собой очень низкую величину. Она является следствием значительного дефицита калийных и фосфорных удобрений в Сибири и высоких издержек на их производство. Низкая себестоимость глинозема в данном случае свидетельствует о высокой сравнительной эффективности переработки сырьевых в перспективе и несоизмерима с существующим уровнем затрат. Однако, будучи в несколько раз ниже фактических эксплуатационных затрат при производстве глинозема на действующих предприятиях, полученная себестоимость воспринимается в значительной мере как условная величина. В результате возникает определенный психологический барьер при оценке целесообразности использования комплексного сырья.

Недостатки указанных критериев выявления экономической эффективности переработки комплексных видов сырья затрудняют решение вопроса об очередности вовлечения в промышленное использование месторождений нефелиновых руд. Поэтому в современных условиях наиболее приемлем подход, заключающийся в постановке и решении на ЭВМ единой экономико-математической задачи по выявлению перспектив производства всех продуктов комплексной переработки нефелиновых руд.

Указанная задача формулируется следующим образом: определить планы развития и размещения алюминиевой промышленности, производства соды, поташа и цемента (частично), исходя из необходимости достижения минимума приведенных затрат на производство и транспортировку алюминиевого и содового сырья и получаемой продукции при условии полного обеспечения потребности народного хозяйства в алюминии, глиноземе и соде. Оцениваются практически все пригодные для промышленного использования ресурсы сырья для производства перечисленных продуктов, в том числе нефелиновые руды.

Экономико-математическая модель задачи* — минимизировать функционал:

$$\begin{aligned} & \sum_{f=1}^F C_f X_f + \sum_{q=1}^Q C_q X_q^1 + \sum_{l=1}^L C_l Y_l + \sum_{r=1}^R C_r Z_r + \sum_{g=1}^G C_g \sum_{j=3}^4 U_q^j + \\ & + \sum_{f=1}^F \sum_{q \in Q_f} C_{fq} X_{fq} + \sum_{q=1}^Q \sum_{p \in P_q} C_{pq} Z_{pq}^1 + \sum_{l=1}^L \sum_{p \in P_l} C_{pl} Y_{pl}^1 + \end{aligned}$$

* Постановка задачи и разработка модели осуществлены совместно с Г.С. Гольдом и В.Б. Ферстером.

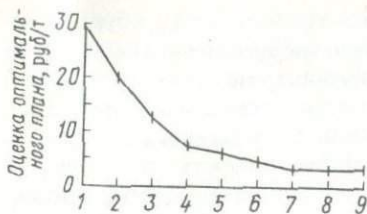


Рис. 33. Сравнительная эффективность производства глинозема из различных источников алюминиевого сырья:

1-2 — высококачественные бокситы: 1 — расширение существующих предприятий, 2 — новое строительство; 3, 5, 6, 8 — нефелиновый концентрат Кольских месторождений (различные районы размещения предприятий); 4, 7 — бокситы среднего качества; 9 — уртиты Мухальского месторождения

$$\begin{aligned}
 & + \sum_{q=1}^Q \sum_{l \in L_q} C_{ql} Y_{ql}^1 + \sum_{l=1}^L \sum_{s \in S_l} C_{ls} Y_{ls} + \sum_{r=1}^R \sum_{s \in S_r} C_{rs} Z_{rs} + \\
 & + \sum_{q \in Q_H} \sum_{s \in S_q} C_{qs}^2 Y_{qs}^2 - \sum_{j=3}^4 E^j \left(\sum_{s \in S_j} \sum_{q \in Q_s} Y_{qs}^j + \sum_{g=1}^G U_{g'}^j \right),
 \end{aligned}$$

где f, q, l, r, g, s, p — индексы соответственно рудников, глиноземных, алюминиевых, содовых и поташных заводов, потребителей и транспортных узлов; j — индекс продуктов (1 — глинозем, 2 — сода, 3, 4 — поташ); F, Q, L, R, G, S, P — множество индексов соответственно рудников, глиноземных, алюминиевых, содовых и поташных заводов, потребителей и транспортных узлов; C, E — приведенные затраты на производство и транспорт продуктов; X, Y, Z, U — объемы производства соответственно: сырья и глинозема; алюминия; соды; поташа; H — индекс глиноземного завода на базе нефелинов.

При этом должны быть соблюдены следующие условия:

- 1) производство ограничено сверху и снизу;
- 2) достигнут баланс производства и вывоза продукции;
- 3) удовлетворены потребности в алюминии, глиноземе и соде;
- 4) ограничены капитальные вложения.

На рис. 33 приведены результаты решения задачи по оптимизации перспектив развития и размещения глиноземного производства. Комплексная переработка нефелинового концентрата оценена по варианту традиционной спекательной технологии. Количественным выражением сравнительной эффективности производства 1 т глинозема из нефелиновых руд и других источников алюминиевого сырья в различных районах размещения предприятий служат оценки оптимального плана, аккумулирующие в себе все важнейшие технико-экономические параметры развития и размещения производства.

На результатах расчетов базируется научно обоснованная ранжировка перспективных глиноземных заводов, а следовательно, и источников сырья по очередности и масштабам вовлечения их в промышленное освоение.

МЕТОДИКА ИЗУЧЕНИЯ ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА
И ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА РУД

Методика, используемая для изучения вещественного состава и оценки качества нефелиновых руд как комплексного глиноземсодержащего сырья, должна обеспечивать получение данных, позволяющих определить целесообразность их промышленной переработки. С максимальной полнотой должны быть исследованы:

- 1) изменение вещественного (минерального и химического) состава по площади рудного тела и на глубину;
- 2) характер и степень проявления вторичных процессов;
- 3) уровень содержаний и распределения элементов-примесей (в минералах, разновидностях руд и в продуктах их обогащения);
- 4) состав и характер распространения нерудных включений;
- 5) закономерности корреляционной зависимости между минеральным и химическим составом;
- 6) технологические свойства основных разновидностей пород (включая их обогатимость), минералого-технологическая типизация руд и характер их распределения в рудном теле (геолого-технологическое картирование). Необходимо также произвести геолого-технологическую оценку товарной руды, отвечающей среднему составу по месторождению (с учетом горно-геологических особенностей, степени развития даек, разубоживания и т. д.) и рассматриваемой как сырье для комплексного производства, и установить исходные параметры для технико-экономических расчетов.

На каждом этапе геологоразведочных работ практически решаются все указанные задачи. Однако по мере детализации работ от поисково-оценочной стадии до детальной разведки изменяются представительность исходных материалов и масштабы проводимых исследований (лабораторные, крупнолабораторные, опытно-заводские). Соответственно возрастает степень достоверности и значимости полученных данных для определения промышленной ценности руды как сырьевого источника.

В данной главе обобщены и описаны методы и способы изучения вещественного состава, а также оценки качества* нефелиновых (и других щелочных алюмосиликатных) руд, используемые в практике исследований и учитывающие особенности и специфику пород. Методы технологических исследований в этой работе не описываются; они освещены в специальной литературе, поэтому далее приводит-

* Здесь и далее "качество" рассматривается как функция вещественного состава руд без учета экономических аспектов целесообразности их использования (см. гл. 7).

ся лишь методика расчета некоторых параметров качества, характеризующих технологические особенности руд.

Задача изучения вещественного состава включает диагностику и характеристику минералов, слагающих породу, выявление их количественного соотношения, определение химического состава породы и корреляции его с минеральным составом.

Основными методами исследований являются следующие: 1) петрографический — изучение в шлифах и препаратах, 2) минералогические; 3) физические — термо-, рентгенографический, ИК-спектроскопический, микрозондовый; 4) петрохимические пересчеты данных химического анализа на количественно-минеральный состав; 5) статистические (корреляционный, факторный и другие анализы).

Необходимо отметить, что только использование комплекса методов, дополняющих и в какой-то степени корректирующих данные друг друга, может обеспечить достаточно полную характеристику вещественного состава нефелиновых руд.

Материалом исследований служат образцы основных разновидностей пород, которые вошли в частные пробы по интервалам химического и технологического опробования.

В результате петрографического изучения могут быть получены данные о минеральном составе структурных и текстурных особенностях пород, что особенно важно в случае их обогащения, составе некоторых минералов.

Именно результаты петрографического анализа обуславливают и направление дальнейших исследований (необходимость разделения на фракции, рентгено-, термографического и др.). Однако этот метод требует определенной квалификации исследователя и весьма трудоемок, особенно подсчет количественно-минерального состава породы, применение которого часто осложняется неоднородностью, изменчивостью структурных и текстурных взаимоотношений минералов (шлировое распределение, взаимосрастание, агрегатный характер развития), что не позволяет достичь необходимой достоверности. Кроме того, выражение результатов подсчета в объемных долях (процентах) затрудняет установление корреляционной зависимости с химическим составом руд и некоторыми технологическими параметрами.

Оптические константы минералов также не дают достаточно точной характеристики их состава. Большое значение поэтому приобретают методы минералогического анализа, позволяющие уточнить диагностику минералов и особенно их состав; это выделение магнитной и электромагнитной фракций с использованием магнитных сепараторов и последующие их изучение, разделение в тяжелых жидкостях. Последний метод довольно сложен, требует специальных условий и для нефелиновых руд мало эффективен в связи с близкими величинами плотности у большинства слагающих их минералов (не-

фелин, полевые шпаты, вторичные минералы — 2,3—2,6 г/см³). Фазово-химический анализ, являющийся разновидностью минералогического, позволяет выявить как соотношение основных минеральных компонентов, так и баланс распределения оксида алюминия. Он приобретает характер экспресс-метода в силу относительной простоты и быстроты, а также возможности получения сравнительных данных по большому числу проб.

На ПО "Апатит" при опробовании руды, хвостов обогащения и нефелиновых концентратов наряду с другими компонентами определяется и содержание кислоторастворимого глинозема ($Al_2O_{3к.р}$) по методике, разработанной в Кольском филиале АН СССР; обработка проб 5%-ным раствором азотной кислоты в течение 5 мин при температуре кипения; в растворе определяют оксид алюминия, входящий в состав нефелина и других фельдшпатоидов; оксид алюминия нерастворимого остатка относят к полевым шпатам и темноцветным минералам.

Отношение содержания $Al_2O_{3к.р}$ к общему содержанию Al_2O_3 в пробе ($Al_2O_{3общ}$) позволяет судить о соотношении фельдшпатоидных минералов и остальных минеральных компонентов (в сумме). На основе статистической обработки большого числа полученных результатов сделан вывод, что высококачественный нефелиновый концентрат (содержание $Al_2O_3 \geq 29\%$) может быть получен с вероятностью 75% при отношении в хвостах обогащения $Al_2O_{3к.р}/Al_2O_{3общ} \geq 0,9$ (коэффициент фельдшпатоидности).

Исследования по изучению обогатимости ийолит-уртитов, извлекаемых попутно при добыче апатит-нефелиновых руд, и результаты обработки полученных данных показывают, что в этом случае нефелиновый концентрат с содержанием Al_2O_3 28—29% может быть получен при отношении $Al_2O_{3к.р}/Al_2O_{3общ} \geq 0,92$. Этот показатель может быть принят для предварительной оценки качества нефелиновых руд, особенно руд II сорта, требующих обогащения. При этом содержание оксида алюминия в нефелиновом концентрате из меланократовых пород с невысоким содержанием полевых шпатов (типа ийолитов) зависит главным образом от глубины их обогащения.

Более точен и информативен метод фазово-химического анализа, разработанный в институте "Механобр" [30], но он должен использоваться на более поздних этапах оценки руд — в силу большей сложности. Этот метод позволяет установить баланс распределения оксида алюминия между фельдшпатоидами, бесцветными слюдами (гидрослюдами), полевыми шпатами и цветными минералами, а также соотношение основных минеральных составляющих нефелиновых руд. Методика основана на изучении растворимости монофракций минералов в различных реагентах:

1. Минералы группы фельдшпатоидов легко растворимы даже в разбавленных кислотах, а в 5%-ном растворе азотной кислоты все

Таблица 23

Результаты фазово-химического анализа по методике
института "Механобр"

Место- рождения	Материал	Al ₂ O ₃ общ	Содержание Al ₂ O ₃ (в %) в форме		
			фельдшпа- тоидов	слюд	полевых шпатов и пи- роксенов
Хибинские	Нефелиновый кон- центрат	27,71	25,08	0,64	1,99*
Мухальское	То же	29,07	23,97	3,55	1,45
	Ийолит-уртит	25,04	22,17	0,88	1,99

* Содержание Al₂O₃ в форме пироксенов — 0,03 %.

они растворяются с одинаковой скоростью, поэтому разделить их в этом растворителе практически невозможно.

2. Слюды* по химической активности занимают промежуточное положение между фельдшпатоидами и полевыми шпатами. При использовании 5%-ного раствора азотной кислоты содержание оксида алюминия в нерастворимом остатке будет соответствовать его суммарному содержанию в слюдах, полевых шпатах и цветных минералах. Обработав полученный нерастворимый остаток серной кислотой (концентрация 1:1), при нагревании (для растворения слюд) можно отделить полевые шпаты, цветные компоненты и акцессорные минералы.

3. Полевые шпаты и темноцветные минералы (пироксены, амфиболы, биотиты и др.) — химически самые инертные в нефелиновых рудах. По ходу анализа они концентрируются в нерастворимом остатке (после обработки серной кислотой), а затем их можно разделить путем магнитной сепарации или в тяжелой жидкости плотностью 2,8 г/см³.

Разработанная методика фазового анализа (см. приложение) успешно опробована на большом числе проб Хибинских месторождений и продуктов их обогащения, а также руд других проявлений нефелинового сырья. В табл. 23 приведены примеры результатов фазово-химического анализа нескольких проб нефелинового концентрата и исходной руды. Нерастворимые остатки, получаемые в процессе прове-

* Здесь и далее подразумеваются бесцветные слюды — мусковит, серицит, либнерит.

дения фазово-химического анализа, могут изучаться различными методами с целью более точной диагностики минералов.

Следует отметить, что растворимость минералов при принятых условиях в значительной степени зависит от их вскрываемости (т. е. структурных и текстурных особенностей руд). Для породы практически каждого рудопоявления необходимо подбирать определенный режим измельчения. В таком случае проведение фазово-химического анализа осложнится и потеряет ряд преимуществ как экспресс-метод. Поэтому, допустив некоторые погрешности в результатах, его можно использовать в основном для сравнительной характеристики разновидностей руд одного месторождения.

Одним из основных методов диагностики и количественной оценки содержания вторичных минералов (или степени изменения руд) является термографический анализ. Он основан на том, что нефелин и полевой шпат термоинертны, а вторичные по нефелину минералы проявляют ряд термических эффектов, связанных с их дегидратацией, диссоциацией и фазовыми превращениями. Термический метод позволяет также установить в породах наличие темноцветных (пироксены, биотит и ряд амфиболов) и рудных (пирит, титаномagnetит, magnetит, гётит) минералов по эффектам окисления Fe^{2+} , дегидратации гётита, амфиболов, сложной диссоциации пирита и новых соединений, образующихся при его окислении. Кроме этого, термографический анализ дает возможность диагностировать тонкодисперсные образования (например, шпреуштейн), определять температуру плавления легкоплавких минералов.

Термограммы некоторых минералов и образцов нефелиновых пород, приведенные на рис. 34, записаны на фоторегистрирующем пиromетре Курнакова и венгерском дериватографе. Скорость нагрева $10^\circ C/мин$, навеска 0,8—1,0 г. В качестве эталона применялся α -глинозем.

Кривая ДТА используется в первую очередь для оценки фазового состава изучаемой породы, но, определив площадь, амплитуду и температурный интервал полученных эффектов, можно выявить количественные соотношения отдельных термоактивных минералов.

Более ценными являются выводы, сделанные путем сравнения кривой ДТА с кривыми ДТГ и ТГ, отражающими изменения массы. Данные этих кривых (рис. 35) применяются для расчета количественно-минерального состава пород. Тепловые эффекты минералов интерпретированы в табл. 24. По ранее опубликованным материалам и результатам проведенных исследований охарактеризованы тепловые эффекты типичных минералов и отдельных минеральных образований нефелиновых пород. Из табл. 24 следует, что температурные интервалы тепловых эффектов у некоторых минералов имеют близкие значения и нередко перекрываются, что мешает однозначной диагностике этих минералов и особенно определению их количества в

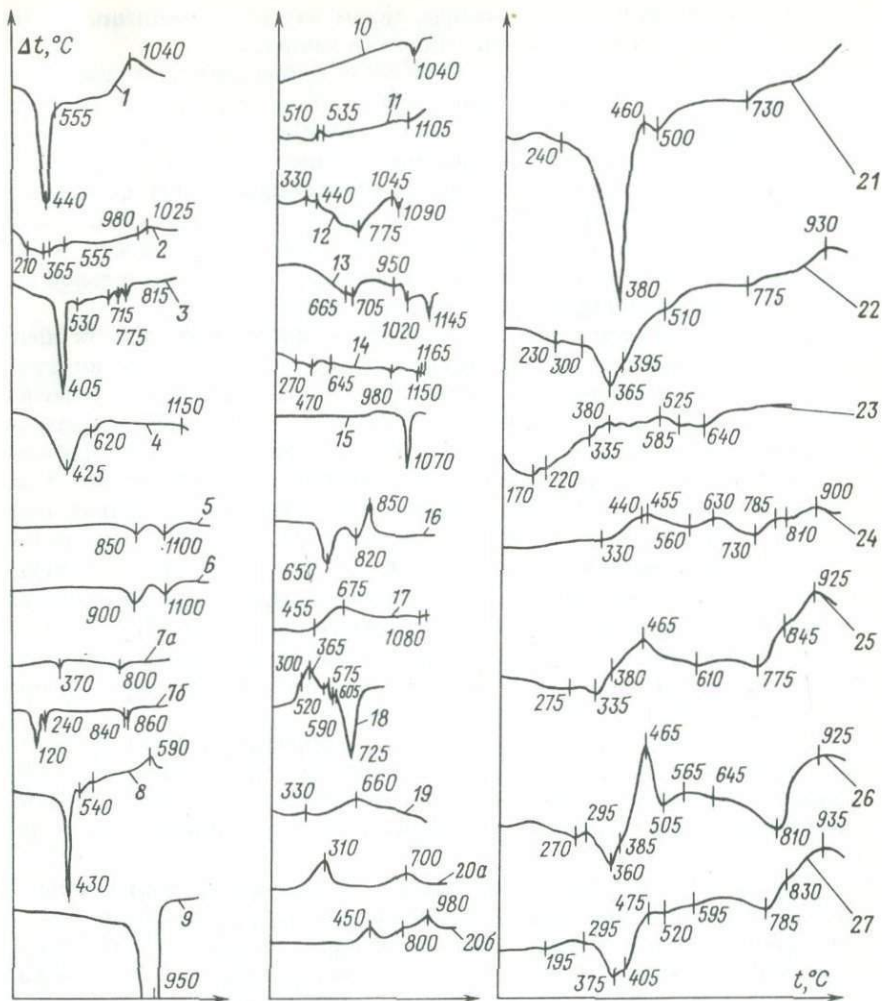


Рис. 34. Термограммы минералов-стандартов (1-20) и пород (21-27)

Минералы: 1 — натролит, 2 — содалит, 3 — карбонат — канкринит, 4 — анальцим, 5 — мусковит, 6 — серицит, 7 — шпреуштейн (а — натролитовый, б — кальциевый), 8 — томсонит, 9 — кальцит, 10 — эгирин, 11 — эгирин-авгит, 12 — титанавгит, 13 — роговая обманка, 14 — актинолит, 15 — гастингсит, 16 — пеннин, 17 — биотит, 18 — пирит, 19 — титаномагнетит, 20 — магнетит (а, б — разновидности). Породы, обогащенные: 21 — натролитом, 22 — натролитом и анальцимом, 23 — десмином, 24, 25 — отдельными разновидностями гидрослюда; 26—27 — шпреуштейном (26 — цеолит-слюдисто-кальцитового состава, 27 — слудисто-цеолитового состава)

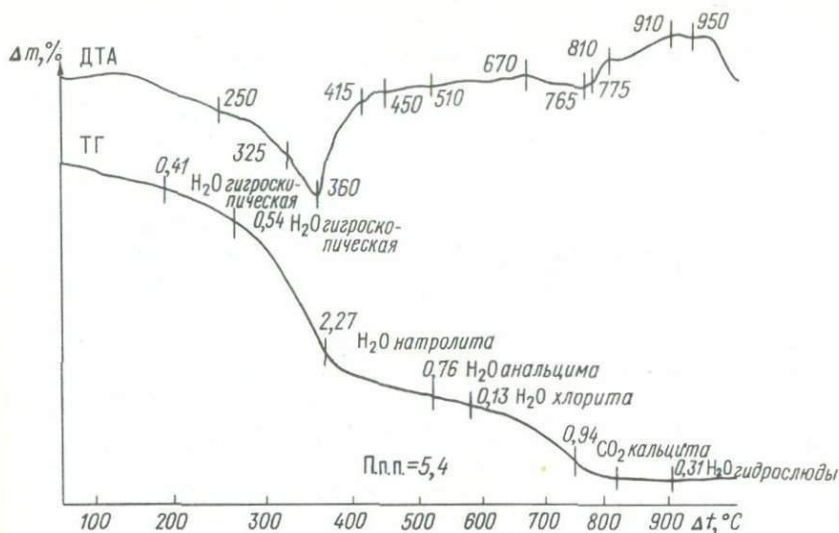


Рис. 35. Термограмма нефелиновой породы. Расчет распределения летучих компонентов (п.п.п.) по минеральным фазам при помощи кривых ДТА и ТГ (изменение массы Δm)

изучаемой породе. Поэтому полученные результаты необходимо корректировать, используя другие методы анализов. Следует подчеркнуть, что с помощью метода термографии, благодаря простоте его применения, можно оценить степень и характер вторичного изменения породы.

Этой же цели может служить и метод инфракрасной спектроскопии (ИКС), позволяющий четко фиксировать минералы с гидроксильной группой OH (рис. 36). Во фракциях, обогащенных полевыми шпатами, этим методом устанавливается также степень упорядоченности — разупорядоченности последних.

Химический состав проб определяется различными методами (рентгеноспектральный, пламенная фотометрия, химический, нейтронно-активационный, газовая хроматография и др.) в соответствии с существующими ГОСТами.

Химическое опробование горных выработок должно предусматривать определение следующих компонентов в поинтервальных частных пробах [5]: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , п.п.п. В групповых пробах (~10% от общего числа проб) проводится полный силикатный анализ, включающий также определение Cl , S , F , CO_2 , Ga , Rb , Cs . Средний состав нефелиновых руд в подсчитанных запасах характеризуется содержаниями основных компонентов, указанных для частных проб, а в некоторых случаях также содержаниями TiO_2 , P_2O_5 , Cl , S , F , CO_2 , Ga , Rb , Cs .

Таблица 24

Термографические характеристики минералов нефелиновых руд

Минерал	Максимумы проявления тепловых эффектов, °С						Природа тепловых превращений
	1	2	3	4	5	6	
Анальцим	120 425	590 620	— 1150	— —	— —	— —	1, 2 — дегидратация (эндо)*; 3 — плавление (эндо)
Амфиболы (роговая обманка)	370	705	925	987	1135	—	1—5 — дегидратация (эндо)
Биотит	455 675	1025 1080	— —	— —	— —	— —	1 — окисление Fe ²⁺ (экзо)**; 2 — удаление конституционной воды (эндо)
Гематит	672	—	—	—	—	—	1 — полиморфное превращение (эндо)
Гётит	300 360	— —	— —	— —	— —	— —	1 — дегидратация
Десмин	210 440	830 865	— —	— —	— —	— —	1 — дегидратация (эндо); 2 — образование нового вещества (экзо)
Ильменит	160 240	330	570 675	860	1000	—	1 — окисление (экзо); 2—4 — магнетитовые (экзо); 5 — окисление Fe ²⁺ (экзо)
Кальцит	720 950	—	—	—	—	—	1 — диссоциация на CaO и CO ₂ (эндо)
Канкринит-карбонат	315 405	485 530	— —	760 775	795 815	1250	1,2 — дегидратация (эндо); 4,5 — диссоциация (эндо); 6 — плавление (эндо)
Магнетит	200 300	380	550 600	800	—	—	1—4 — окисление Fe ²⁺ (экзо)
Мусковит	750 850	1020 1090	— —	— —	— —	— —	1 — дегидратация (эндо); 2 — разрушение решетки (эндо)
Натролит	330 400	550	1040	—	—	—	1,2 — дегидратация (эндо); 3 — образование нового вещества (экзо)
Пирит	215 590	605 725	— —	— —	— —	— —	1 — окисление Fe ²⁺ (экзо); 2 — диссоциация сульфата железа
Содалит	210	365	430	555	1025	—	1, 2 — дегидратация цеолитов; 4 — выделение хлора (эндо); 5 — образование новых веществ (экзо)
Титан-авгит	330 —	440 —	775 —	1095 1090	— —	— —	1 — окисление Fe ²⁺ (экзо); 3 — следы кальцита (эндо); 4 — плавление (эндо)
Титаномагнетит	280 330	660	—	—	—	—	1, 2 — окисление Fe ²⁺ (экзо)
Томсонит	330 400	490 515	990	—	—	—	1, 2 — дегидратация (эндо); 3 — образование нового вещества (экзо)

Минерал	Максимумы проявления тепловых эффектов, °С						Природа тепловых превращений
	1	2	3	4	5	6	
Циркон	850	—	—	—	—	—	1 — перестройка решетки метамиктного циркона (экзо)
Шабазит	190	800	—	—	—	—	1 — дегидратация (эндо); 2 — образование нового вещества (экзо)
	—	840	—	—	—	—	
Шпреуштейн (натролит-либнеритового типа)	325	805	960	—	—	—	1 — дегидратация натролита (эндо); 2, 3 — дегидратация либнерита (эндо)
	375	810	1045	—	—	—	
Эгирин	989	—	—	—	—	—	1 — плавление (эндо)
	1045	—	—	—	—	—	
Эгирин-авгит	510	535	1075	—	—	—	1, 2 — окисление Fe^{2+} (экзо); 3 — плавление (эндо)
	515	—	1105	—	—	—	

Примечание. Апатит, нефелин, полевой шпат, сфен и флюорит — термостойки.

* Эндотермический эффект, связанный с поглощением тепла.

**Экзотермический эффект, связанный с выделением тепла.

Для расчета количественно-минерального состава руды используются результаты химических анализов частных, средних, технологических проб, характеристика минералов, полученная различными методами, их химический состав (данные анализов монофракций или стехиометрические соотношения оксидов), результаты термографического анализа (кривая ТГ) с распределением летучих компонентов по минеральным фазам (см. рис. 35), а также фазово-химического анализа по балансу распределения оксида алюминия между минеральными составляющими. При этом за базисный принимается химический компонент, свойственный лишь данному минералу или входящий в его состав в преобладающем количестве: P_2O_5 — для апатита, CO_2 — для кальцита, а также для канкринита (в соответствии с содержанием воды, определяемым по кривой потери массы), кислоторастворимый Al_2O_3 связывается с Na_2O и K_2O в фельдшпатоиды, остаток их от общего содержания в пробе — в полевые шпаты, слюды и цветные минералы: K_2O — в слюды (в соответствии с количеством H_2O), остаток — в калиевые полевые шпаты и т. д.

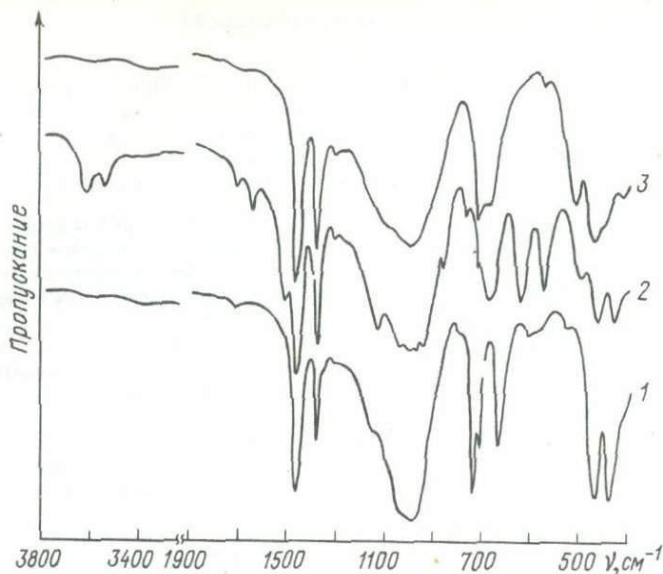


Рис. 36. Инфракрасные спектры фракций, обогащенных содалитом (1), канкринитом (2), нефелином (3)

Этот метод довольно сложен, поэтому требуется разработать соответствующие программы для ЭВМ.

Статистический метод целесообразно применять при наличии большого количества данных, в частности, для установления корреляционных связей компонентов по результатам химического опробования горных выработок, а также для анализа и контроля состава руды, поступающей на действующие предприятия. Примером может служить работа, выполненная в ВАМИ в связи с проблемой снижения качества нефелинового концентрата, получаемого на ПО "Апатит".

Статистическая обработка на ЭВМ (с применением корреляционного и факторного анализов) данных большого числа химических (сменных, среднесменных, среднегодовых) и минералогических анализов за период с 1960 г. показала, что содержание глинозема в нефелиновом концентрате ($Al_2O_{3\text{конц}}$) имеет значимую отрицательную связь с содержанием полевого шпата, лепидомелана и шлама — тонкоизмельченного материала, обогащенного вторичными минералами.

Подсчитанные уравнения регрессии для этих параметров свидетельствуют о том, что наиболее надежна модель $Al_2O_{3\text{конц}} = f$, где f — содержание полевого шпата и лепидомелана, %, а содержание Al_2O_3 в концентрате с вероятностью 80 % может быть определено

3844

по уравнению $y = 24,53 + 1,57x_1 + 1,13x_2 - 0,36x_1x_2$, где: y , x_1 и x_2 содержания (в %) соответственно $Al_2O_3_{\text{конц}}$, Al_2O_3 в полевом шпате и шламе. Значимые положительные коэффициенты корреляции $Al_2O_3_{\text{конц}}$ имеет с содержанием в руде $Al_2O_3_{\text{к.р}}$ и с содержанием его и $Al_2O_3_{\text{общ}}$ в хвостах апатитовой флотации. Наиболее надежными являются две модели:

$$Al_2O_3_{\text{конц}} = f(Al_2O_3_{\text{к.р.р}} + Al_2O_3_{\text{к.р.х}});$$

$$Al_2O_3_{\text{конц}} = f(Al_2O_3_{\text{общ.х}} + Al_2O_3_{\text{к.р.х}}),$$

где $Al_2O_3_{\text{к.р.р}}$ и $Al_2O_3_{\text{к.р.х}}$ — содержание кислоторастворимого глинозема соответственно в руде и хвостах; $Al_2O_3_{\text{общ.х}}$ — общее содержание этого компонента в хвостах. Для первой модели уравнение регрессии таково: $y = 33,80 - 0,966x_2 - 0,293x_3 + 0,052x_2x_3$, где: x_2 — $Al_2O_3_{\text{к.р.р}}$; x_3 — $Al_2O_3_{\text{к.р.х}}$. Таким образом, по теоретическому графику, зная содержание $Al_2O_3_{\text{к.р.р}}$ и $Al_2O_3_{\text{к.р.х}}$, можно с вероятностью 72,6 % определить количество $Al_2O_3_{\text{конц}}$.

Уравнение регрессии для второй модели следующее: $y = 33,80 - 0,451x_1 - 0,475x_3 + 0,033x_1x_3$, где x_1 — содержание $Al_2O_3_{\text{общ.х}}$, x_3 — $Al_2O_3_{\text{к.р.х}}$; оно позволяет выявить содержание $Al_2O_3_{\text{конц}}$ с вероятностью 81,6 %.

Указанные параметры и методы оценки качества апатит-нефелиновой руды и хвостов могут быть использованы в процессе эксплуатации Хибинских месторождений и переработки добываемых руд.

Как уже указывалось, для оценки качества нефелиновых пород как комплексных глиноземсодержащих руд применяются такие параметры, как модули — щелочной (M_{R_2O}), кремниевый (M_{Si}), кальциевый (M_{Ca}), а также расчетное содержание глинозема в спеке ($Al_{\text{сп.р}}$), характеризующие технологические особенности руд и косвенно экономическую эффективность их переработки.

Расчет модулей производится по следующим формулам*:

$$M_{R_2O} = 1,64(Na_2O + 0,66K_2O) / Al_2O_3;$$

$$M_{Si} = 1,70SiO_2 / Al_2O_3;$$

$$M_{Ca} = 1,07CaO / SiO_2.$$

Для упрощенного расчета $Al_{\text{сп.р}}$ П.Я. Киселевым предложена методика, выраженная в формулах (1—3):

$$Al_{\text{сп.р}} = \frac{100Al_2O_3_{\text{р.}}}{\Sigma_{\text{п.р}} + 1,04CaO_{\text{н}} + Na_2O_{\text{об}}}, \quad (1)$$

где $Al_2O_3_{\text{р}}$ — содержание глинозема в руде, %; $\Sigma_{\text{п.р}}$ — суммарное содержание компонентов в прокаленной руде [$\Sigma_{\text{п.р}} = 100 - (\text{п.п.п} +$

* Коэффициенты выражают молярное отношение компонентов; содержание последних — в процентах.

+ H₂O)], %; CaO_и — количество оксида кальция, вводимого в шихту с известняком; Na₂O_{об} — количество оборотного оксида натрия в шихте.

$$\text{CaO}_{\text{и}} = 2,02\text{SiO}_{2\text{р}} - 1,08\text{CaO}_{\text{р}}, \quad (2)$$

где SiO_{2р} и CaO_р — содержание соответственно оксидов кремния и кальция в руде, %. Данная формула получена исходя из допущений, что в спеке M_{Ca} = 2,00, а в известняке соотношение (по массе) CaO:SiO₂ = 25:1, т. е.

$$\begin{aligned} 1,07(\text{CaO}_{\text{р}} + \text{CaO}_{\text{и}}) / (\text{SiO}_{2\text{р}} + 0,04\text{CaO}_{\text{и}}) &= 2,00. \\ \text{Na}_2\text{O}_{\text{об}} &= 0,61\text{Al}_2\text{O}_{3\text{р}} - \text{Na}_2\text{O}_{\text{р}} - 0,66\text{K}_2\text{O}_{\text{р}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где Na₂O_р и K₂O_р — содержания в руде соответственно оксидов натрия и калия.

При выводе последней формулы принято, что в спеке щелочной модуль равен 1,00, а шихтовка производится чистой содой, т. е.:

$$1,645(\text{Na}_2\text{O}_{\text{р}} + 0,66\text{K}_2\text{O}_{\text{р}} + \text{Na}_2\text{O}_{\text{об}}) / \text{Al}_2\text{O}_{3\text{р}} = 1,00.$$

В расчете не учитываются оборот белого шлама на спекание, расход щелочей на связывание сульфатов и избирательный вынос щелочей при спекании.

Глава 7

ПРЕДПОСЫЛКИ И ПРОБЛЕМЫ РАСШИРЕНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФЕЛИНОВОГО СЫРЬЯ

Дальнейшее развитие производства глинозема в СССР предполагает все более широкое использование нефелинового сырья и рост его доли в общем объеме получаемой продукции. Это обусловлено ограниченностью в стране запасов высококачественных бокситов и наличием крупных ресурсов качественного нефелинового сырья, многолетним положительным опытом и значительными преимуществами промышленной переработки нефелиновых пород [3].

О высокой экономической эффективности производства глинозема, кальцинированной соды, поташа, цемента, галлия и других продуктов комплексной переработки нефелинового сырья свидетельствует практика работы ВАЗа, ППГО, АГК. За время существования этих предприятий технологическая схема была существенно усовершенствована и ныне представляет собой хорошо отработанную высокоэффективную технологию.

Экономическая целесообразность расширения масштабов использования нефелинового сырья неоднократно подтверждена расчетами [20]: сооружение на базе этого сырья новых комплексных предпри-

ятий по сравнению с аналогичными по мощности специализированными заводами позволит получить экономию до 20 % капитальных вложений и около 15 % эксплуатационных затрат [21].

Однако указанный экономический эффект не в полной мере отражает положительные аспекты промышленного использования нефелинового сырья. Так, специализированное производство кальцинированной соды на основе поваренной соли и известняка по традиционной аммиачной технологии по существу не имеет перспектив, поскольку вызывает крайне неблагоприятные экологические последствия. Производство 1 т соды сопряжено с получением около 10 м³ жидких хлоридных отходов, которые оказывают пагубное влияние на окружающую среду. В то же время производство соды из нефелинового сырья практически полностью безотходно. К тому же "нефелиновая" сода характеризуется повышенной (~ в 2—2,5 раза) насыпной плотностью, что обеспечивает экономию затрат на тару, хранение, перевозку и повышает эффективность ее использования. Существенный рост потребности в соде и возрастающие ограничения по защите окружающей среды диктуют необходимость увеличения в ближайшие 10—15 лет масштабов комплексной переработки нефелинового сырья в несколько раз.

Получение другого продукта комплексной переработки — поташа — в условиях СССР также может быть наиболее эффективным на базе нефелинового сырья. Существенное расширение масштабов использования поташа сдерживается недостатком этого продукта. Одним из наиболее перспективных может явиться применение поташа как для нужд сельского хозяйства в виде самостоятельного эффективного бесхлорного калийного удобрения, так и для производства новых ценных форм комплексных калийно-фосфорных удобрений. Из других возможных направлений следует отметить строительство, где этот продукт может с успехом использоваться в качестве противоморозных добавок в бетоны и растворы.

Дальнейшее совершенствование цементного производства на базе белитового шлама также служит фактором повышения технико-экономических показателей комплексной переработки нефелинового сырья. Реализация его сводится к следующему: 1) совмещению процессов размола и сушки сырьевой смеси; 2) повышению доли белитового шлама в составе сырьевых смесей (вплоть до выпуска бездобавочных нефелиновых цементов); 3) получению высокоглиноземистых и других ценных видов цемента, включая дефицитные белые, цветные сорта и др.

Вместе с тем в последние годы возникли некоторые трудности с реализацией белитового шлама на нужды цементного производства во многих районах возможного размещения новых комплексных предприятий. Поэтому большее внимание следует уделять другим направлениям его использования [33]. К ним относятся (рис. 37):



Рис. 37. Основные направления использования белитового шлама

1) производство силикатного (шламового) кирпича, стеновых блоков, нефелин-керамзит-газобетонных панелей, асбоцементных и других изделий автоклавного твердения; 2) получение легких, тяжелых и гидротехнических бетонов; 3) приготовление строительных и штукатурных растворов; 4) получение закладочных смесей; 5) дорожное строительство. Применение белитового шлама в перечисленных направлениях проверено в производственных условиях (на стандартном оборудовании) и дает значительный экономический эффект. Весьма перспективно также потребление белитового шлама для известкования кислых почв (25 % всех обрабатываемых угодий страны), для производства белитовых огнеупоров, ситаллов, строительной керамики, синтетических цеолитов, белой сажи и других материалов.

Дополнительный экономический эффект при комплексной переработке нефелинового сырья может быть получен и за счет попутного извлечения помимо галлия также рубидия и цезия. Технология получения последних проверена в опытно-заводском масштабе. Если галлий может быть произведен из других видов глиноземсодержащих руд, то попутное извлечение рубидия и цезия возможно лишь из нефелинового сырья. Это производство существенно экономичнее, чем на базе традиционного редкометалльного сырья.

Проблема увеличения масштабов комплексной переработки нефелиновых пород является общесоюзной в силу наличия их в различных районах страны. Но особенно остро она стоит на северо-западе СССР, где попутно получают большие количества нефелинового сырья, и в Сибири, испытывающей дефицит в глиноземе.

Как уже отмечалось (см. гл. 1), апатит-нефелиновые руды Хибинской группы месторождений на Кольском полуострове — основной и наиболее экономичный источник нефелинового сырья.

Так как по используемой на ПО "Апатит" методике калькулирования затрат расходы по добыче, транспортировке и измельчению руды полностью относятся на апатитовое производство, действующая ныне цена на нефелиновый концентрат невысока и составляет 3,5 руб/т (франко-обогащительная фабрика) или около 7 руб/т (франко-глиноземный завод); это способствует благоприятным показателям комплексной переработки нефелинового концентрата. Однако лишь незначительная часть хвостов апатитовой флотации используется на производстве нефелинового концентрата. Большая их часть сбрасывается в хвостохранилища.

Потери от складирования хвостов не ограничиваются весьма крупными затратами на создание хвостохранилищ и ущербом, наносимым окружающей среде. При длительном хранении флотационные свойства тонкоизмельченного нефелина изменяются, что может затруднить дальнейшее его использование.

Несмотря на благоприятные предпосылки для многократного увеличения производства кольского нефелинового концентрата (все возрастающее количество хвостов апатитовой флотации, относительно невысокие капитальные вложения на создание мощностей по обогащению, экономия затрат и уменьшение загрязнения окружающей среды в связи с сокращением сброса отходов и др.), в последние годы не отмечается тенденции к его росту. Основные причины — крайне незначительное увеличение потребности в концентрате в связи с оставанием строительства предприятий по комплексной его переработке.

Между тем только на основе хвостов апатитовой флотации действующего производства на ПО "Апатит" могут быть обеспечены нефелиновым концентратом несколько новых комплексных предприятий. С учетом же получения концентрата из ийолит-уртитов попутной

добычи суммарные потенциальные масштабы производства концентрата из нефелиновых руд Хибинского массива еще более возрастут.

Наращивание мощностей глиноземных заводов, базирующихся на переработке кольского нефелинового концентрата, сопряжено со значительными трудностями. Важнейшая из них заключается в необходимости очень крупных единовременных затрат на строительство комплексных предприятий в условиях межотраслевой структуры получаемой на этих предприятиях продукции. Так, капитальные вложения на сооружение среднего по мощности нефелинового комплекса приблизительно в 2 раза превосходят затраты на создание аналогичного по мощности, но специализированного глиноземного завода на базе бокситов, в 3—4 раза — предприятия по выпуску эквивалентного количества содопродуктов и в 2,5—3 раза — цементного завода той же мощности.

Сдерживающими факторами в развитии комплексной переработки нефелинового сырья являются также его относительно высокая энергоемкость и все возрастающий дефицит европейской части страны в топливно-энергетических ресурсах и прежде всего в качественном газомазутном топливе. Суммарные затраты энергии на производство 1 т глинозема и соответствующего количества попутных продуктов из нефелиновых руд составляют около 4 т условного топлива, в то время как из специализированного сырья (бокситов и др.) — 2,9—3,2 т. В дальнейшем в европейских районах стоимость газа и мазута, вероятно, возрастет, соответственно увеличатся общие энергетические расходы при производстве глинозема из кольского нефелинового концентрата по сравнению с таковыми при переработке бокситов среднего качества, что повлечет за собой снижение сравнительной эффективности переработки нефелинового сырья. Для предотвращения этого необходимо ускорить исследования и реализацию менее энергоемких процессов переработки нефелинового сырья: сухого способа спекания (в случае ориентации на спекательную технологию), новых гидрохимической, азотнокислотной и других технологий.

В целях выработки объективного народнохозяйственного подхода к проблеме расширения масштабов промышленного использования кольского нефелинового концентрата ВАМИ совместно со специализированными организациями выполнили расчеты сбалансированных оптимальных перспективных планов развития и размещения глиноземной, содовой и цементной промышленности. Критерием оптимальности, на основе которого принимается решение об очередности строительства предприятий на базе как нефелинового, так и традиционного сырья (бокситы, поваренная соль, известняки и др.), служит при этом минимум приведенных затрат, связанных с удовлетворением потребности страны в глиноземе, соде кальцинированной, поташе и цементе. Разрабатываемая на основе результатов этих рас-

четов схема развития и размещения алюминиевой промышленности на долгосрочную перспективу предусматривает резкое увеличение мощностей по переработке кольского нефелинового концентрата.

Крупными ресурсами нефелинового сырья помимо Кольского полуострова располагают также восточные районы страны. Наибольший интерес представляют источники этого сырья, расположенные в Восточной Сибири. Это объясняется следующими обстоятельствами.

1. Восточная Сибирь в силу наличия крупных и высокоэкономических источников энергии специализируется в межрайонном разделении труда на производстве энергоемкой продукции, в том числе алюминия. Однако потребность алюминиевого производства в основном сырье — глиноземе — лишь частично удовлетворяется за счет его получения на единственном в регионе Ачинском глиноземном комбинате. По расчетам авторов, для обеспечения перевозок глинозема из европейских районов страны и Урала только в объеме потребности среднего по мощности алюминиевого завода необходимо около 100 млн. руб. капитальных вложений на развитие железнодорожной сети, создание подвижного состава и свыше 10 млн. руб. ежегодных эксплуатационных затрат. Намечаемое наращивание в Восточной Сибири мощностей по производству алюминия делает проблему обеспечения местным сырьем еще более актуальной.

2. Развитие в Сибири глиноземного производства будет способствовать смягчению напряженности топливно-энергетического баланса европейских районов страны. Перемещение на восток только одного глиноземного завода средней мощности позволит уменьшить дефицит европейской части страны примерно на 4 млн. т условного топлива в год и сэкономить таким образом около 150 млн. руб. капитальных вложений и 17 млн. руб. эксплуатационных затрат, связанных с перевозкой его из восточных районов.

3. Несмотря на многолетние геологоразведочные работы на бокситы в районах Сибири и Дальнего Востока до настоящего времени не выявлены пригодные для промышленного использования месторождения этого сырья. По общему мнению специалистов, отсутствуют благоприятные предпосылки для обнаружения их и в перспективе. В этих условиях проблема создания собственной сырьевой базы алюминиевой промышленности Сибири может быть решена лишь на основе вовлечения в эксплуатацию перспективных видов небокситового алюминиевого сырья. К их числу в первую очередь должны быть отнесены высококачественные нефелиновые, а также другие щелочные алюмосиликатные породы. Многолетний опыт промышленного использования такого сырья в СССР и последние достижения в технологии его обогащения и комплексной переработки свидетельствуют о возможности создания эффективной и стабильной сырьевой базы алюминиевого производства Сибири.

4. Комплексная переработка нефелинового сырья позволяет получать помимо глинозема большие количества необходимых для народного хозяйства Сибири и Дальнего Востока продуктов. Особенно остра проблема обеспечения указанных районов калийными удобрениями, собственное производство которых здесь отсутствует, а потребность удовлетворяется только на 10 % и уже в ближайшей перспективе составит около 1 млн. т K_2O .

К настоящему времени помимо эксплуатируемого Ачинским глиноземным комбинатом Кия-Шалтырского и служащего его резервной базой Горячегорского месторождения нефелиновых руд в Сибири выявлены и включены в сферу промышленной оценки крупные месторождения и рудопроявления щелочных алюмосиликатных пород и в первую очередь — Мухальское и Баянкольское уртитов, Сыннырское и Сакунское сынныритов.

Технологические испытания руд, проведенные по традиционной схеме спекания, и технико-экономические расчеты показали, что наиболее благоприятными показателями характеризуется переработка сынныритов. Приведенные затраты на производство глинозема и попутной продукции из этого сырья на 10–15 % ниже, чем из руд Мухальского и Баянкольского массивов. Повышенное содержание в сынныритах K_2O (18 % против 3–7 % в других рудах) и более высокий (в 3 раза) выход дорогостоящего поташа дают эффект, позволяющий в значительной мере компенсировать воздействие неблагоприятных факторов, связанных с переработкой сынныритов, среди которых прежде всего необходимо отметить повышенный материальный поток (22 т против 13 т при переработке кольского нефелинового концентрата и уртитов), более высокую энерго- и трудоемкость процесса, повышенный (в 1,5 раза) выход белитового шлама, сложные экономико-географические условия.

Тем не менее переработка сынныритов на базе промышленно освоенной спекательной технологии уступает по основным технико-экономическим показателям переработке кольского нефелинового концентрата в европейских районах страны: ожидается, что приведенные затраты на производство глинозема, соды, поташа, и цемента будут выше примерно на 20 %. Это вызвано прежде всего дополнительными капитальными вложениями, связанными со строительством объектов инфраструктуры, высокой материалоемкостью и энергоемкостью процесса.

Длительная эксплуатация предприятий по переработке нефелинового сырья и результаты технико-экономических расчетов свидетельствуют о том, что вовлечение в промышленное использование новых месторождений нефелиновых пород Сибири при ориентации на традиционную спекательную технологию с выпуском в качестве товарных продуктов глинозема, соды, поташа и цемента нецелесообразно, по крайней мере, до того, как будут исчерпаны запасы кондиционного

Таблица 25

Химический состав новых форм бесхлорных комплексных удобрений, %

№ пробы	K ₂ O	P ₂ O ₅		CaO	MgO	SiO ₂	B	Mo
		общее	усвояемое					
1	19,0	24,1	24,0	37,4	2,1	4,7	—	—
2	35,5	17,4	16,4	23,1	0,1	9,8	—	—
3	27,0	25,6	25,3	39,5	0,6	0,3	—	—
4	21,6	23,1	22,9	30,7	8,7	1,7	0,31	0,18
5	43,5	—	—	11,7	8,7	28,7	—	—

нефелинового сырья Кольского полуострова. Поэтому была предпринята попытка совершенствования технологии переработки небокситового сырья Сибири для реализации преимуществ, заключающихся в повышенном содержании в нем калия. При этом учитывалось, что сельское хозяйство восточных районов нуждается не только в калии, но и в другом главном питательном элементе растений — фосфоре (около 3 млн. т P₂O₅), потребность в котором обеспечивается лишь в небольшой степени путем поставок из других районов страны. Полное обеспечение районов Сибири и Дальнего Востока удобрениями позволит примерно на 40 % увеличить производство сельскохозяйственной продукции, что эквивалентно получению ежегодно около 10 млн. т зерна, 1 млн. т картофеля и т. д. [8].

Проведенными исследованиями доказана возможность получения при переработке нефелинового сырья (путем модификации традиционной спекательной технологии) вместо поташа более ценного и дефицитного продукта — комплексных калийно-фосфорных удобрений (см. гл. 2). Удобрения содержат около 50 % питательных веществ (K₂O + P₂O₅) в усвояемой растениями, но невымываемой из почв форме (табл. 25), что обеспечивает более длительный срок их действия и предотвращает загрязнение окружающей среды. Около 40 % состава удобрений приходится на оксид кальция, что обуславливает их повышенную нейтрализующую способность и доводит содержание полезных компонентов до 90 %.

Сложные комплексные формы удобрений являются наиболее перспективными. Их применение позволяет повысить урожайность (примерно на 10 %) и качество сельскохозяйственной продукции, снизить (примерно на 50 %) затраты по внесению в почву. Последнее особенно важно для районов Сибири и Дальнего Востока, что обусловлено дефицитом трудовых ресурсов, сложными условиями хране-

ния и транспортировки удобрений, значительными расстояниями перевозок.

По результатам технологических исследований и испытаний опытных образцов удобрений в ВАМИ выполнена технико-экономическая оценка целесообразности комплексной переработки нефелинового сырья по модифицированной технологии спекания; при этом оценивались не только перспективные проявления нефелиновых пород Сибири (Мухальское, Баянкольское, Калиумное и Сакунское), но также и кольский нефелиновый концентрат. Было установлено, что и европейские и восточные районы страны располагают предпосылками для организации производства калийно-фосфорных удобрений вместо поташа: в их пределах отмечается дефицит в фосфорных и особенно в бесхлорных калийных удобрениях (потребность в последних только в районах Нечерноземной зоны РСФСР — около 500 тыс. т K_2O).

Результаты технико-экономических расчетов в сводном виде и в сопоставлении с показателями переработки на глинозем замыкающего в перспективе источника традиционного бокситового сырья приведены в табл. 26. При этом основной результирующий показатель в виде приведенных затрат в расчете на 1 т глинозема получен путем исключения из суммарных издержек по комплексу в целом эксплуатационных и капитальных затрат, необходимых для производства прочих продуктов на перспективных предприятиях в условиях традиционного (специализированного) производства.

Анализ результатов расчетов показывает следующее:

1. Нефелиновый концентрат, являющийся единственным источником нефелинового сырья, использование которого экономически эффективно как по традиционной, так и по модифицированной технологии.

2. Реализация модифицированной технологии позволяет улучшить (по сравнению с традиционной) технико-экономические показатели комплексной переработки нефелиновых пород: Кольского полуострова (эксплуатируемые месторождения) — в 1,5 раза, Сибири — в 1,5—2,8 раза.

3. По сравнению с глиноземным заводом на базе замыкающего источника бокситового сырья сооружение предприятий по переработке кольского нефелинового концентрата и сыньиритов на основе модифицированной технологии является более предпочтительным, а по переработке мухальских и баянкольских уртитов — практически равноэкономичным.

4. Первоочередное значение имеет Сакунское месторождение сыньиритов, где не требуется в отличие от Сыньирского больших затрат на строительство железной дороги. Из месторождений уртитов предпочтение должно быть отдано Мухальскому, поскольку приведенные технико-экономические показатели по переработке баянколь-

Таблица 26

Сравнительные технико-экономические показатели комплексной переработки щелочных алюмосиликатных пород по рекомендуемой технологии

Показатель	Комплексные предприятия по переработке					Глиноземный завод по переработке бокситов*
	кольско-го нефелинового концентрата	сынныритов		уртитов		
		сакунских	сыннырских	мухальских	баян-кольских	
1. Расход в расчете на 1 т глинозема:						
нефелиновой руды (концентрата), т	3,98	5,7	5,19	4,09	4,34	0,46
боксита, т	—	0,17	0,17	0,17	0,17	2,14
известняка, т	7,3	13,6	12,4	7,9	8,64	2,65
апатитового концентрата, т	0,7	2,0	1,96	0,34	0,43	—
топлива технологического условного, 10 ³ т	2,2	3,39	3,2	2,18	2,28	0,92
электроэнергии, 10 ³ кВт·ч	1,55	2,17	1,98	1,65	1,85	0,61
пара, ГДж	16,93	23,65	23,18	13,73	15,20	10,50
2. Выход на 1 т глинозема, т:						
калийно-фосфорных удобрений	0,93	2,88	2,8	0,50	0,57	—
соды кальцинированной	0,71	—	—	0,70	0,73	—
цемента	7,0	5,1	5,1	5,1	5,1	0,79
товарного шлама	6,54	4,8	4,1	2,21	2,92	1,54
3. Рентабельность производства, %	14,9	19,4	16,0	10,4	10,2	7,8
4. Срок окупаемости капитальных вложений, лет	6,4	4,9	6,0	9,1	9,3	12,7
5. Приведенные затраты, относимые на производство глинозема, млн. руб.	88	45	62	144	142	149
То же, при использовании традиционной технологии, млн. руб.	140	130	155	197	195	149
6. Приведенные затраты с учетом транспорта глинозема до потребителя, млн. руб.	104	50	67	147	147	164
То же, по сравнению с переработкой бокситов, %	63	30	41	90	90	100

* При компенсации потерь щелочи вводом в процесс нефелинового концентрата.

ских уртигов не учитывают затраты на сооружение железнодорожной линии.

Улучшение показателей комплексной переработки нефелинового сырья по модифицированной технологии — результат исключительно высокой стоимости получаемых при этом сложных калийно-фосфорных удобрений. Исходя из существующих цен на аналогичные простые формы удобрений, эта стоимость определена в размере свыше 200 руб. за 1 т удобрения (при переработке кольского нефелинового концентрата также 200 руб. в расчете на 1 т глинозема против 60 руб., относящихся на поташ по варианту традиционной технологии). Дополнительные капитальные вложения на строительство цеха по производству комплексных удобрений окупятся менее чем за 0,5 года.

Полученные технико-экономические показатели переработки нефелиновых пород по модифицированной технологии при этом не учитывают ряд дополнительных преимуществ, заключающихся в основном в следующем:

- 1) ориентации предложенной технологии на уже используемые промышленностью процессы и серийно выпускаемое оборудование;
- 2) высвобождении ограниченных сырьевых и материальных ресурсов, в том числе дефицитных фосфорной и серной кислот, необходимых для получения стандартных форм удобрений;
- 3) вовлечении в промышленное использование низкокачественного фосфатного сырья, не пригодного для получения из него фосфатных удобрений по обычным кислотным схемам;
- 4) возможности создать полностью безотходное производство и избежать существенного загрязнения окружающей среды, свойственного традиционному производству глинозема и особенно удобрений.

Таким образом, при определении очередности сооружения новых глиноземных заводов на базе различных видов нефелинового сырья предпочтение должно быть отдано предприятиям по переработке кольского нефелинового концентрата и сынныритов. Первостепенной задачей является расширение производства на базе нефелинового концентрата, хотя по совокупным технико-экономическим показателям оно уступает таковому при использовании сынныритов. Подобный вывод обосновывается следующими главными факторами:

- 1) необходимостью повышения степени промышленного использования попутно получаемого нефелинового сырья Кольского полуострова;
- 2) возможностью производства при его переработке значительных количеств кальцинированной соды, получение которой традиционным способом затруднено;
- 3) необходимостью более крупных (приблизительно в 2 раза) капитальных вложений при переработке сынныритов (по сравнению с переработкой кольского нефелинового концентрата) и трудностей

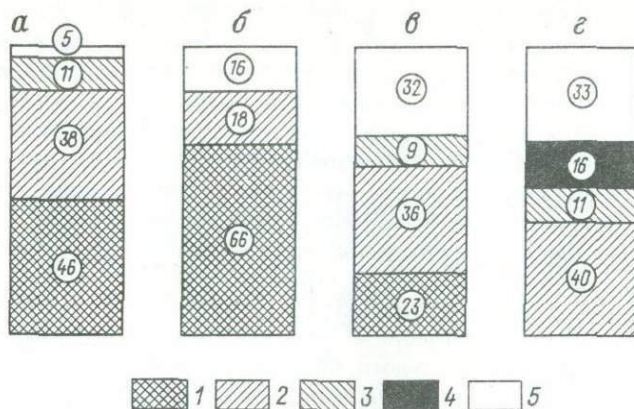


Рис. 38. Структура товарной продукции предприятий по комплексной переработке нефелинового сырья:

а-в — модифицированные технологии переработки (а — нефелинового концентрата Кольских (Хибинских) месторождений, б — сынныритов, в — уртитов Мухальского месторождения); г — традиционная технология переработки нефелинового концентрата Кольских месторождений. 1 — удобрения; 2 — глинозем; 3 — сода кацинированная; 4 — поташ; 5 — цемент; цифры в кружках — доля стоимости продукта (в %) от общей стоимости

ми их разработки в слабо освоенных районах Восточной Сибири.

Однако возможно вовлечение сынныритов в хозяйственный оборот и одновременно с сооружением первоочередных предприятий на базе кольского нефелинового концентрата (в случае усугубления неблагоприятных тенденций развития производства калийных и фосфорных удобрений в Сибири).

Промышленное освоение других источников нефелинового сырья Сибири, в том числе мухальских и баянкольских уртитов, может быть рекомендовано лишь после исчерпания ресурсов нефелинового сырья, попутно получаемого на действующем ПО "Апатит". В случае сокращения объемов производства нефелинового концентрата на ПО "Апатит", ухудшения его качества и увеличения относимой на него доли общекорпоративных затрат вовлечение в хозяйственный оборот уртитов Сибири может оказаться более предпочтительным.

Показатели комплексной переработки нефелиновых руд по модифицированной технологии служат убедительным свидетельством неправомерности традиционного подхода к ним как сырью лишь для глиноземного производства. Высокий удельный вес минеральных удобрений в стоимости товарной продукции комплексных предприятий (при переработке сынныритов ~ 65 % — рис. 38), указывает на то, что рассматриваемое сырье следует квалифицировать как глиноземное и агрохимическое, а сынныриты — в первую очередь как агро-

химическое. Таким образом, проблема расширения сырьевой базы алюминиевой промышленности за счет увеличения масштабов использования нефелиновых руд приобретает в еще большей мере межотраслевой характер. Решение ее требует более тесных, скоординированных усилий заинтересованных министерств (Минцветмета, Минхимпрома, Минудобрений, Минстройматериалов и др.). Оно возможно лишь путем комплексного, межотраслевого подхода. Наиболее реальными представляются следующие пути его реализации:

1) выделение в народнохозяйственных планах (как перспективных, так и годовых) проблемы строительства комплексных предприятий в качестве самостоятельной позиции с соответствующим финансированием, обеспечением лимитами строительно-монтажных работ, материальными ресурсами, оборудованием и т. д.;

2) доленое участие основных заинтересованных министерств в финансировании строительства комплексных предприятий (по мнению авторов, последний путь — менее действенный и эффективный).

Глава 8

ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЩЕЛОЧНЫХ АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ РУД ЗАРУБЕЖНЫХ РУДОПРОЯВЛЕНИЙ

Ограниченность ресурсов высококачественных бокситов, неравномерность их размещения, наличие в прогнозных запасах бокситов значительной доли низкокачественных обуславливают растущий интерес ряда стран к перспективам вовлечения в переработку небокситового (прежде всего нефелинового) сырья. Он связан с возможностью попутного получения содопродуктов и цемента, потребности в которых во многих странах нередко превышают спрос на глинозем, а также с ростом требований к защите окружающей среды (количество отходов — более 1 т красных шламов на 1 т глинозема и ~ 10 м³ солевых отходов на 1 т соды при получении их традиционным способом).

Результаты выполненной в ВАМИ технологической оценки различных видов алюмосиликатного сырья отечественных и зарубежных месторождений показывают, что технология спекания двух- и трехкомпонентной шихты (при условии ее модернизации и совершенствования в каждом конкретном случае) применима практически для любого вида таких руд. Опыт изучения и технологического опробования (в лабораторном и опытно-заводском масштабах) различных видов алюмосиликатных руд зарубежных месторождений позволяет предложить их классификацию в соответствии с составом, технологическими особенностями и технико-экономическими показателями переработки (табл. 27).

Отметим некоторые особенности щелочных алюмосиликатных пород зарубежных стран, главным образом на основе результатов их геолого-технологического изучения и отчасти по литературным данным [4].

Тип I. Существенно нефелиновые руды

Сведения о зарубежных проявлениях существенно нефелиновых пород, имеющих наибольшую ценность как глиноземсодержащее сырье, в настоящее время весьма ограничены, и среди технологически изученных разновидностей подобные руды пока отсутствуют. Это обусловлено относительной редкостью крупных месторождений таких руд, а главное — слабой степенью изученности большинства зарубежных массивов нефелиновых пород с точки зрения оценки их в качестве глиноземсодержащего сырья. Вместе с тем опыт проведенного в последние годы изучения щелочных массивов Монгольской Народной Республики показывает возможность выявления в пределах ранее известных площадей участков, сложенных существенно нефелиновыми породами.

Как уже указывалось, к перерабатываемым в СССР богатым нефелиновым рудам (уртитам) тесно примыкают разновидности нефелиновых пород щелочно-габброидной формации (ийолит-уртиты, ийолиты, нефелин-плаггиоклазовые породы) с повышенным количеством темноцветных минералов; промышленное использование их возможно при условии предварительного обогащения, позволяющего получать высококачественные нефелиновые концентраты. Такие породы распространены в ряде районов мира гораздо шире, чем уртиты.

Интересными примерами существенно нефелиновых руд являются породы Дучингольского, Бэлтэсингольских и Овэрмаратгольского массивов, расположенных в северо-западной части Монгольской Народной Республики в районе Юго-Западного Прихубсугуля. Эти массивы тяготеют к зоне Уджигингольского глубинного разлома и локализируются в карбонатных толщах протерозойского и позднекембрийского возраста [35].

Дучингольский массив ийолит-уртитов расположен в 82 км от пос. Алаг-Эрдэнэ, в 7,5 км от устья ручья Дучин-Гол — левого притока р. Бэлтэсин-Гол. Здесь среди окварцованных и скарнированных мраморов отмечаются два тела овальной формы (площадь 0,6 и 1,2—1,5 км²), сложенных нефелин-пироксеновыми породами, состав которых неоднороден — от ийолитов (~35 % нефелина) до уртитов (до 90 % нефелина). Содержания основных компонентов в породах таковы (в %): Al₂O₃ — 24—28; Na₂O — 6,3—10,7; K₂O — 3,3—3,5; Fe₂O₃ — 2,8—8,0.

Бэлтэсингольские щелочные массивы, размещающиеся к северо-западу от описанных выше, представлены группой тел (площадь

руд			
II. Фельдшпатоидно-полевошпатовые		III. Безнефелиновые	
IIА. Нефелиновые руды — нефелиновые, анальцимовые, содалитовые, канкринитовые сиениты, ювиты, фонолиты	IIБ. Кальсилит-лейцитовые руды — нефелин-псевдолейцитовые сиениты, сынныриты, лейцититы, лейцит-порфиры, фонолиты	IIIА. Полевошпатовые (щелочные) руды — трахиандезиты (болгариты), полевошпатовые концентраты	IIIБ. Глинисто-слюдистые руды — продукты коры выветривания щелочных сиенитов, хвосты обогащения (дешламации)
Существенно калиево-полевошпатовые		Плагиоклаз-калиево-полевошпатовые (щелочные)	Каолинит-гидрослюдистые
Низкоглиноземистые, щелочные, высококремнистые		Малоглиноземистые, низкощелочные, высококремнистые	Глиноземистые, низкощелочные, высококремнистые
≥ 20	> 15*	—	—
< 20	< 15	≤ 10	≤ 10
≤ 70	> 40 или < 15	> 40	> 80**
< 5	Ед. зн. < 10	> 20 (щелочные) < 5	< 10
20—28	20—28	17—20	≥ 23
> 45	> 50	> 50	> 50
< 5	< 5	< 5	< 5
> 1,0	1—2	> 1	< 1
> 10 (Na ₂ O ≥ K ₂ O)	> 12 (K ₂ O ≥ Na ₂ O)	12 (K ₂ O ≥ Na ₂ O)	< 10 (K ₂ O > Na ₂ O)
4,2—4,3 0,9—1,0	4,2—4,5 0,93—1,0	5,77 0,92	4,0—4,3 0,3—0,5

Характеристика	Типы		
	I. Существенно нефелиновые		
Расходный коэффициент на 1 т Al_2O_3 , т: руды известняка	4,1 7,6	4,1—4,3 5,5—6,5	4,3—4,6 6,1—6,3
Содержание глинозема в спеке, %	14,8	14,0—17,0	14,4—15,2
Примеры месторождений и массивов	Хибинские, Ловозерский (СССР)	Горячегорское, Мухальское (СССР)	Кия-Шалтырьское, Баянкольское (СССР); Дучингольский, Бэлтэсингольский, Овэрмаратгольский (МНР)

* Лейцит, псевдолейцит составляют ~80 %.

** Учтены каолинит и гидрослюда.

до 6,2 км²), заметно различающихся по составу слагающих их пород. Северное тело, пересекаемое долиной р. Бэлтэсин-Гол, залегает среди мраморов; оно образовано преимущественно ийолитами, характеризующимися неоднородным такситовым сложением. Местами в породах отмечаются амфиболизация и калишпатизация.

Южное тело, имеющее штокообразную форму (слегка вытянуто к северо-западу), в северной части сложено трахитоидными тералитами, а с юга и востока окаймляется в виде полукольца нефелин-пироксеновыми породами (площадь ~4,2 км²). Южный контакт его с вмещающими мраморами тектонический, сопровождающийся многочисленными инъекциями щелочных пород.

Нефелиновые породы неоднородны по составу и структурам. По количеству нефелина (38—74 %) выделяются разновидности от ийолитов до уртитов. Среди цветных минералов главную роль играют фassaит, амфиболы, реже встречаются лепидомелан и гранат, нередки канкринит, кальцит, альбит.

В пределах наиболее крупного Овэрмаратгольского массива

руд			
II. Фельдшпатоидно-полевошпатовые		III. Безнефелиновые	
5,3—5,7 9,8—11,2	5,5—5,7 10,3—11,2	7,3 14,8	5,5 11,2
9,9—10,7	9,7—11,8	7,9	10,8
Сан-Карлос, Чина (Мексика); Джебел-Абу-Хруг (АРЕ); Вали-Дитрэу (СРР); Шиссинду, Конгуно (Мозамбик); Пхёнгансан (КНДР); Среднегорье (ЧССР)	Сьннырский (СССР); Сомма — Везувий (Италия)	Болгарово (НРБ)	Португалия

(среднее течение р. Уджигин-Гол) как потенциальное комплексное глиноземсодержащее сырье представляют интерес ювиты, слагающие приконтактовую зону протяженностью более 5 км при видимой ширине до 1,5 км. По особенностям химического состава (среднее содержание $Al_2O_3 > 26\%$; $Fe_2O_3 < 5\%$; $Na_2O > 12\%$) они довольно близки рудам типа IB (см. табл. 27), отличаются лишь более высоким содержанием полевых шпатов и кремнезема, что обуславливает их как бы промежуточное положение между рудами типа IB и IIA. Ювиты описываемого массива имеют крупнозернистую (до пегматоидной) структуру и состоят в основном из нефелина и вторичных по нему минералов, агрегатов микроклина и альбита, а также пироксена и амфибола. Вблизи контакта ювитов с габбро-пироксенитами отмечаются разновидности, близкие к ийолит-уртитам.

Значительное количество SiO_2 наряду с малым количеством CaO (1,3—2,1 %) снижает качество пород как комплексных глиноземсодержащих руд. Неблагоприятным фактором является также широкое распространение среди пород массива даек гранитоидов.

Анализ наиболее крупных сводных работ по геологии щелочных массивов [1, 18, 34] показывает, что существенно нефелиновые породы типа I (ийолит-уртитовой серии) встречаются почти на всех континентах. Вместе с тем таких крупных массивов, как Хибинский и Ловозерский в СССР, со значительным распространением лейкократовых нефелиновых пород (уртитов) за рубежом не выявлено. Породы же ийолитовой серии достаточно широко представлены в большинстве регионов мира.

В Европе породы ийолитового состава широко распространены в странах Скандинавии (комплексы Альне в Швеции, Фён в Норвегии, Ййваара, Лехиярви, Куусамо — в Финляндии). В составе карбонатитовых комплексов Альне и Фён наряду с ийолитами присутствуют уртиты. Ийолиты известны также в Богемском массиве ЧССР.

На территории Азии, кроме МНР, ийолиты отмечаются в КНДР (район Фукушинцан) и Бирме (район Могок). Весьма вероятно присутствие ийолитов и в многочисленных карбонатитовых комплексах Индии и Пакистана.

Широкое развитие существенно нефелиновых пород (преимущественно ийолитового состава) характерно для Африканского континента. Здесь они тесно ассоциируют с нефелинитами и карбонатитами, преобладают в составе нефелиновых комплексов (карбонатитовые массивы Шава, Дорова, Чизанья в Зимбабве; массив Шпицкон в ЮАР) или слагают крупные по размерам самостоятельные участки (массивы Пилансберг в ЮАР; Напак, Морото, Тороро, Йелеле, Будеда в Уганде; Чивира в Анголе; Рангва, Кавирондо в Кении; Чилва в Малави; Олдоньо-Ленгаи в Танзании; Тальзаст в Марокко). В ряде случаев отмечаются и уртиты (массивы Усака-Кавирондо в Кении; Окорузу в Намибии; Напак, Торо, Йелеле в Уганде; район островов Лос в Гвинеи; Франтспурт, Лейвфонтейн, Нойтгедахт в ЮАР).

Ийолиты обнаружены также на островах Зеленого Мыса.

В Южной Америке щелочные массивы с участками распространения существенно нефелиновых пород — ийолитов — известны на территории Бразилии — массивы Анитополис, Серроте, Якупиранга. В последнем площадь развития ийолитов весьма значительна (2х3,5 км).

В Северной Америке ийолиты, малиниты, реже уртиты выявлены в ряде массивов на территории Канады (Лекнер-Лейк, Прейри-Лейк, Ока, Каминак, Пуба, Айс-Ривер) и США (Магнет-Коув, Айрон-Хилл, Паудерхорн); они тесно ассоциируют с карбонатитами, несущими промышленное редкоземельное оруденение. Имеются указания на присутствие ийолитов в Мексике (массивы Сан-Карлос и Тамаулипас), в Западно-Аляскинской щелочной провинции, а также в Гренландии (массивы Греннедаль-Ика, Гардинер).

Руды подтипа А данного типа представлены породами массивов Сан-Карлос и Чина (Мексика), Джебель-Абу-Хруг (АРЕ), Вали-Дитрэу (СРР) и др. (см. табл. 27).

Массив Сан-Карлос расположен в 20 км севернее г. Сьюдад-Виктория (шт. Тамаулипас). Большая часть массива, имеющего длину 10 км и ширину 2,5—4 км, сложена нефелиновыми сиенитами. Содержание основных компонентов в породах разведенного участка колеблется в следующих пределах (в %): Al_2O_3 — 21—25; Na_2O — 6—11; K_2O — 5—7,5; SiO_2 — 51—55; Fe_2O_3 — 3,4—4,5. Нефелиновые сиениты в целом довольно однородны по минеральному составу: они сложены в основном полевыми шпатами (микроклин и альбит), нефелином, темноцветными (эгирин, эгирин-авгит) и вторичными минералами. Некоторые различия в составе пород связаны преимущественно с разной степенью замещения нефелина. Среди вторичных (по нефелину) минералов наибольшую роль играют анальцим и содалит, что является характерной особенностью изученных пород Мексики (табл. 28). В породах массива Чина анальцим является одним из основных минералов (содержание его достигает 18 %).

Эти особенности состава в значительной степени снижают качество таких пород по сравнению с рудами типа I. Но существенная удельная роль оксида калия в составе щелочей улучшает технико-экономические показатели использования пород массива Сан-Карлос.

Достаточно близки к описанным по вещественному составу связанные с резкодифференцированным щелочным массивом нефелин-анальцимовые сиениты месторождения Джебель-Абу-Хруг, находящегося в юго-восточной части Египта, в 150 км северо-восточнее г. Асуан.

Технологически изученные породы Северного участка (площадь 0,7 км²) характеризуются значительным проявлением наложенных процессов, приводящих к замещению не только нефелина (анальцимом, содалитом и шпреуштейном), но также и калиевого полевого шпата (пелитизация и др.). Нефелиновые сиениты описываемого месторождения отличаются также большим количеством темноцветных минералов и полевых шпатов (с резким преобладанием микроклина над альбитом) и меньшим — нефелина, что обуславливает меньшее содержание в них полезных (Al_2O_3 , R_2O) и большее вредных (Fe_2O_3 , SiO_2) компонентов по сравнению с породами массива Сан-Карлос.

Массив щелочных пород Вали-Дитрэу (площадь ~19x14 км) расположен на территории Социалистической Республики Румыния, в Восточных Карпатах, в долине р. Муреш. Он имеет концентрически-зональное строение и сложен в центральной части нефелиновыми сиенитами, окаймленными дитро-эссекситами, сменяющимися к периферии щелочными сиенитами и гранитами. Нефелиновые сиениты

центральной части массива (дитроиты) значительно изменены наложенными процессами и секутся дайками различного состава. Особенностью вещественного состава средней технологической пробы, включавшей и дайковые породы (табл. 28), является повышенное количество цветных (биотит, реже эгирин-авгит и роговая обманка) и вторичных по нефелину (канкринит, реже либнерит, содалит, кальцит) минералов; процессы изменения захватывают и калиевый полевой шпат (серицитизация, альбитизация), что определяет основные черты химизма — повышенное содержание в дитроитах оксидов железа и титана ($> 1\%$) и пониженное — глинозема и особенно щелочей.

Массивы нефелиновых и щелочных сиенитов Шиссинду и Конгуно находятся в западной части округа Замбезия (Мозамбик). Массив Шиссинду (площадь ~ 14 км²) сложен в основном нефелиновыми сиенитами, окаймленными в северной части щелочными сиенитами. Нефелиновые сиениты характеризуются изменчивым составом.

Массив Конгуно (площадь $\sim 1,6$ км²) сложен более лейкократовыми нефелиновыми сиенитами с большим количеством пегматоидных разностей. Минеральный состав изученных технологических проб обоих массивов в целом достаточно близок (см. табл. 28).

Породы массива Шиссинду отличаются повышенным (\sim в 1,5 раза) количеством цветных и вторичных по нефелину (канкринит, анальцит, содалит, либнерит) минералов и соответственно большим (на 0,7—0,9 %) содержанием Fe_2O_3 и K_2O , меньшим — Na_2O .

Месторождение Пхёнгансан, расположенное в районе г. Пхёнган (КНДР), связано с одноименным массивом нефелиновых сиенитов. По химическому составу породы этого месторождения довольно близки к породам массивов Мозамбика, отличаясь несколько меньшим содержанием глинозема и большим — кремнезема, что обусловлено особенностями их минерального состава (больше калиевого полевого шпата и слабо измененного нефелина, меньше — плагиоклаза). В состав пород входят также биотит ($\sim 10\%$), пироксен (1—2 %) и небольшое количество граната, титаномagnetита, пирита, апатита, сфена и флюорита. Вторичные по нефелину минералы немногочисленны — это канкринит, либнерит и содалит. Основные качественные характеристики изученной пробы сходны с таковыми пород массива Конгуно; отличия заключаются в более высоких значениях щелочного и кремниевого модулей.

Эффузивные аналоги нефелиновых сиенитов — фонолиты — представлены пробой из района Среднегорья (ЧССР). Главными силикатными минералами этих пород являются калиевый полевой шпат ($\sim 45\%$) и нефелин (32 %). Иногда присутствуют вторичные минералы — анальцит (16 %), гидрослюда, кальцит. Невелико в этих породах и количество цветных минералов (эгирин-авгит и гранат) —

Вещественный состав зарубежных алюмосиликатных руд различных типов

Подтип руд	Месторождение, рудопроявление	Породы (руды)	Количественно-минеральный состав, %			
			нефелин (лейцит, псевдолейцит)	вторичные минералы по нефелину	полевые шпаты	
					щелочные	плагиоклазы
1	2	3	4	5	6	7
IV	Дучингольское (МНР)	Уртиты, ийолит-уртиты	45—90	0—20	—	—
IV	Бэлтэсингольское (МНР)	То же	45—70	5—15	—	5—10
IV	Овэрмаратгольское (МНР)	Ювиты	40—60	5—25	10—40	—
IIA	Сан-Карлос (Мексика)	Содалит-анальцимовые нефелиновые сиениты	21	17	38	12
IIA	Джебель-Абу-Хруг (АРЕ)	Нефелин-анальцимовые сиениты	12	8	10	3
IIA	Вали-Дитрэу (СРР)	Измененные биотитовые нефелиновые сиениты — дитроиты	8	19	33	18
IIA	Шиссинду (Мозамбик)	Биотитовые нефелиновые сиениты — миаскиты	18	5,8	26,9	40,1
IIA	Конгуно (Мозамбик)	То же	18,9	3	28,2	42,5
IIA	Пхёнгансан (КНДР)	—'—	20	2	50	15
IIA	Среднегорье (ЧССР)	Фонолиты	32	18	45	—
IIБ	Сомма-Везувий (Италия)	Италиты	82	1	8	6
IIIA	Болгарово (НРБ)	Болгариты	—	—	44	36
IIIB	Португалия	Порода коры выветривания щелочных сиенитов	—	—		57

Продолжение таблицы 28

Под-тип руд	Количественно-минеральный состав, %			Содержание основных компонентов, %					
	темноцветные минералы	глинистые, гидрослюды	прочие минералы	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
	8	9	10	11	12	13	14	15	16
IV	10-50	—	10-15	24-28	38-40	3,6-8,5	8,0-11,0	6,5-10,7	3,2-3,4
IV	20-50	—	—	23,4-28	43-45	3,5-7,5	7,0-10,6	6,7-11,6	3,5-5,5
IV	5-10	—	—	25,6-27,5	48,8-50,6	1,5-4,9	1,3-2,5	10,4-12,4	3,3-4,4
IIA	6	2	4	21,8	54,5	3,3	2,2	9,4	6,6
IIA	9	41	—	20,6	55,4	4,7	1,2	9,2	4,8
IIA	18	—	4	20,0	51,9	5,1	3,7	7,5	4,0
IIA	8,3	—	0,9	22,09	56,6	3,4	0,8	9,3	4,7
IIA	5,9	—	1,5	21,9	57,0	3,6	0,7	8,4	5,6
IIA	12	—	1	21,2	58,0	1,7	0,5	9,1	5,2
IIA	3	—	2	22,8	55,0	1,8	0,9	10,6	5,6
IIБ	3	—	—	22,4	55,0	1,0	1,5	1,3	17,8
IIIA	11	6	3	17,4	59,1	4,2	2,0	5,4	6,6
IIБ	10	32	1	23,3	54,8	3,8	0,6	2,7	6,7

около 5 %. По качественным характеристикам фонолиты несколько превосходят другие зарубежные нефелиновые руды II типа.

Нефелинсодержащие фельдшпатоидно-полевошпатовые руды II типа (подтип А) распространены широко и известны на всех континентах (табл. 29). Значительное развитие имеют также эффузивные аналоги нефелиновых сиенитов — нефелиновые фонолиты, встречающиеся во многих областях проявления вулканической деятельности — в Африке, на островах Тихого и Атлантического океанов, в Европе (массивы Богемский, Центрально-Французский, Кайзерштуль и др.), Америке (США — Свит Грасс Хиллс, Краунест, Девилс-Маунтин; Бразилия — Тапира) и других районах мира. Они отличаются по химизму от пород подтипа А некоторым преобладанием K_2O над Na_2O , занимая, таким образом, промежуточное положение между подтипами А и В II типа.

Характерным примером руд подтипа Б являются лейцитовые породы массива Сомма-Везувий (Италия), приуроченные к одноименным действующим вулканам. Лейцитовые породы связаны с различными образованиями: пирокластитами, лавовыми покровами, субвулканическими телами. Последние сложены плутоническими аналогами излившихся лейцитовых пород, получивших собственные названия (италиты, соммаиты и др.).

Породы, вошедшие в технологическую пробу, содержат свыше 80 % лейцита (связаны ~85 % глинозема и 90 % щелочей) и характеризуются исключительно высокой (~18 %) концентрацией оксида калия при относительно низкой (~22,5 %) глинозема. В состав пород входят щелочной полевой шпат и плагиоклаз — лабрадор (до 10 %, иногда и более в сумме), вулканическое стекло, содалит, авгит, биотит и рудные минералы.

Подобно аналогичным по химизму ультракалиевым алюмосиликатным рудам СССР (сынныриты) лейцитовые породы являются ценным видом комплексного сырья для производства калийных и комплексных удобрений с попутным получением глинозема и других продуктов. Характерная особенность лейцитовых пород — возможность их кислотного разложения без предварительной щелочной обработки, что позволяет непосредственно перерабатывать их не только по традиционным щелочным схемам, но и с применением кислотных методов. Учитывая большую практическую значимость руд этого типа (в связи с большим количеством K_2O) и крайне низкую степень изученности массивов лейцитсодержащих (и псевдолейцитовых) пород более подробно рассмотрим размещение их в различных регионах мира.

Породы данного подтипа известны в ряде районов Европы. К ним относятся Римская и Неаполитанская провинции на западе Италии с прилегающими островами (в первую очередь районы Везувия, Альбани, Флегрейских полей, где распространены лейкократовые лей-

Размещение рудопроявлений алюмосиликатных руд II типа

Страна	Подтип руд	
	А — нефелиновые	Б — кальсилит-лейцитовые
	<i>Европа</i>	
Великобритания	Айршир, Сквэа-Топ, Нандл	Лох-Боролан
Греция	—	Вардар-Палагонийская область
Дания	+	—
о. Гренландия	Илимауссак, Греннедаль-Ика, Игалико, Игдлерфигссалик, Кангердлугссуак, Лангесук-фьорд	Восток острова
Испания	Пиренеи	Юго-восток страны, Хумилья, Канкарикс
Италия	—	Сомма-Везувий, Умбрия, Сан-Венанцо, Альбани, Флегрейские поля
Норвегия	Нордкап, Сёрей, Стъерней	—
НРБ	Вырли Бряг	Бургасский район
Португалия	Сьерра-Мончика, Корбейе, Фито, Очела, Севадеш	—
СРР	Вали-Дитрэу	—
СФРЮ	Голубчики	Вардар-Палагонийская область
Финляндия	Куолаярви, Ийваара, Ахенваара, Пеникенваара, Каарехсланди, Сокли	Саехарью
Франция	Центрально-Французский массив — Мон-Дор, Канталь, Орданшит	О-в Корсика
ФРГ	Кайзерштуль	Кайзерштуль
ЧССР	Богемский массив	Дуповские горы, Богемский массив
Швеция	Серна, Альмунге, Норра, Кёрр	—
	<i>Азия</i>	
Афганистан	Саресан	Юг страны
Индия	Каралут, Хаммель, Пиккили, Тамил-Коду, Язят, Маунт-Гирнер, Элуру, Кхаммам, Ориса, Кишингарх, Барандангуа, Сивамалай, Гуят, Дженканал, Джавхар, Коратти	—
Индонезия	Марос	—
КНДР	Пхёнгансан, Покчинсан, Фукушинсан, Синсонсан, Такталли, Килчжу	—
КНР	Саймачи, Линсиен	Юго-восток страны

Страна	Подтип руд	
	А — нефелиновые	Б — кальсилит-лейцитовые
МНР	Доотхемгок, Уджига, Каскан-гол, Яматуин, Сэрхэульские, Бурэн-Хан-Обо, Барун-Манхан-Ула, Харганайгол, Ихээрцигул	Мушугай Худак, Лугин-Гол, Баян-Хушу
Пакистан	Кога	—
СРВ	Пиа-Ма	Пу-Сам-Кап
Турция		Район г. Трабзон
Япония	+	—
<i>Австралия</i>		
Австралия	Новый Южный Уэльс, Минамура	Фицрой
<i>Северная Америка</i>		
Канада	Халибертон-Банкрофт, Блу-Маунтин, Сил-Лейк, Альбаниль-Лейк, Айс-Ривер (Британская Колумбия) и др.	Калландер-Бей, Каминак, Пуба, район Споттид-Фаун-Крик
Мексика	Сан-Карлос, Чина, Тамаулипас	—
США	Магнет-Коув, Бемервилль, Айрон-Хилл, Личфилд, Роки-Бой, Крипл-Крик, Шонкин-Саг, Западно-Аляскинская провинция — Гранит-Маунтин и др.	Лейцит-Хилс, Магнет-Коув, Хидвуд-Маунтин, Бруквиль, область Навахо, Западно-Аляскинская провинция, горы Хайвуд, Берпо
<i>Южная Америка</i>		
Аргентина	Эль-Пунго, Камаронес	—
Боливия	Ла-Пас, Церо, Сапо	—
Бразилия	Тапира, Араша, Серроте, Посус-ди-Калдас, Итапирапуана, Анитаполис и др.	Посус-ди-Калдас, Фернандо-Нороне
Парагвай	+	—
<i>Африка</i>		
Ангола	Чивира, Сьерра-да-Неви, Колонго, Альто	—
Бенин	—	+
Гана	Юго-восток страны	—
Гвинея	Лос	—
Египет	Джебел-Абу-Хруг, Эль-Кахфа, Эль-Факани, Мишбех, Эль-Нага	—
Заир	Луэш	Ньямалагира, Торо-Анколе, Бирунга-Бифумбира, Форт-Портал, Букаву
Зимбабве	—	Марангудзи
Камерун	Румпи, Бамбуто, Маненгумба	Камерун, Этинде
Кения	Кавирондо, Сусва, Ньянза	—
Конго	Ниирагонго	—
Ливия	Гебель-Ауэнт	—

Страна	Подтип руд	
	А — нефелиновые	Б — кальсилит-лейцитовые
Мадагаскар	Морафенобе, Макараингоб	+
Малави	Нчед, Чикала, Монголови	—
Марокко	Тамазерт	—
Мозамбик	Шиперони, Дерри, Шиссианду, Конгуно	—
Намибия	Мессум, Окорузу, Калькфельд	—
Нигерия	Джос, Аир, Хоггар	—
Острова Зеленого Мыса	Браво, Гранди	—
Сомали	Каркайин, Даркайинл	—
Судан	Дарфур	—
Танзания	Лунголо, Рунгве, Мзоби	—
Уганда	Морото, Рангва, Рури, Соколо, Хома, Кизингири и др.	—
Чад	Тибести	—
ЮАР	Шпицкоп, Пилансберг, Франтспурт, Лейвкрааль, Лейвфонтейн и др.	—

Примечание: "+" — названия конкретных массивов не известны; "—" — массивы не выявлены или нет сведений.

цитовые породы типа италитов), районы Центрально-Французского массива, Кайзерштуля, Богемского массива (лейцититы, лейцитовые трахиты), Македоно-Родопско-Эгейская вулканическая область и Бургасский синклиорий (лейцитсодержащие вулканиты), районы на юго-востоке Испании и о-ва Корсика (калиевые ультраосновные лейцитсодержащие породы), Шотландия (бороланиты). Имеются данные о наличии лейцитсодержащих пород на востоке о-ва Гренландия.

В Северной Америке существенно калиевые породы выявлены в районах Западной Аляски (Гранит-Маунтин и др.), где под названием "ювита" Кононовой В.А. описана порода следующего состава (в %): K_2O — 16,6; Na_2O — 1,3; Al_2O_3 — 21,6; SiO_2 — 55,4; Fe_2O_3 — 1,7. В пределах Канады псевдолейцитовые породы встречаются в районе Споттид-Фаун-Крик, в массивах Каминак и Пуба. На территории США псевдолейцитовые сиениты отмечаются в массивах Бруквиль, Магнет-Коув, Лейцит-Хилс, а лейцитовые породы (миссуриты) — в горах Хайвуд (шт. Монтана).

На территории Южной Америки лейцит- и псевдолейцитсодержащие породы были выявлены в основном на территории Бразилии —

массивы Посуо-ди-Калдас, Фернандо-Нороне и др. Содержание K_2O в породах первого массива достигает 13 %.

Достаточно широко распространены породы этого подтипа и в Африке. Здесь в ряде районов лейцитсодержащие разновидности пространственно тесно ассоциируют с нефелинитами и нефелиновыми феолитами. Они развиты в северо-восточной части Сахары и Бенине (калиевые щелочно-ультраосновные породы), вдоль "линии Камеруна" — массивы Этинде, Камерун, Бамбуто (лейцититы), в вулканических полях Западной ветви зоны Великих Африканских рифтов — Торо-Анколе, Бирунга-Бифумбира, Форт-Портал, Букаву и др. В Южной Африке псевдолейцитовые породы присутствуют в составе магматического комплекса Марангудзи (Зимбабве), слагающей значительные по площади участки в центральной части массива.

В Азии существенно калиевые породы имеются на территории Турции (район г. Трабзон), на юге Афганистана, в южной части МНР (массив Лугин-Гол и др.), на юго-востоке КНР, в КНДР, Малайзии и Индонезии.

Лейцитсодержащие промышленно алмазоносные ультраосновные породы (до 60 % лейцита и более) распространены в Западной Австралии (район Фицрой).

Ограниченность сведений о составе и масштабах развития пород описанного подтипа крайне осложняет оценку их практической значимости в каждом конкретном случае.

Тип III. Безнефелиновые щелочно-алюмосиликатные руды

К технологически оцененным рудам такого типа, не содержащим нефелина и сложенным в основном щелочными полевыми шпатами и продуктами их изменения, относятся трахиандезиты — болгариты (НРБ) и измененные щелочные сиениты (Португалия). По вещественному составу они близки к рудам II типа, однако существенно калиевый состав щелочей в некоторой степени компенсирует отрицательное влияние пониженного количества глинозема на экономические показатели их переработки.

Месторождение Болгарово, находящееся на территории НРБ, в 20 км к северу от г. Бургас, в настоящее время разведано, а руды его технологически опробованы в лабораторном и опытно-заводском масштабах. Район месторождения (площадь 6—7 км²) сложен андезитовыми туфами и лавобрекчиями трахиандезитов (болгаритов) с характерной сферической текстурой. Сферолиты сцементированы вулканическим стеклом, в значительной степени измененным. Химический состав разновидностей болгаритов (см. табл. 28) варьирует незначительно, содержания основных компонентов таковы (в %): Al_2O_3 — 17,7—18,0; K_2O — 6,7—7,5; SiO_2 — 57,6—61,0. Вулканическое стекло отличается повышенным содержанием MgO (до 3 %) и заметно меньшим (на 3 %) — щелочей, а также кремнезема.

Основными минералами болгаритов (~80 % породы) являются калиево-натриевые полевые шпаты и альбит, реже андезин (см. табл. 28). Темноцветные минералы представлены в основном хлоритом и рудными (магнетит, гематит, гётит). Среди вторичных образований (по полевому шпату) преобладают гидрослюда и глинистые минералы.

Породы месторождения в Португалии (подтип Б) по существу представляют собой в значительной степени измененные щелочные сиениты (реликтовые минералы — калиевый полевой шпат, альбит, биотит — см. табл. 28). Проба отобрана, видимо, из коры выветривания этих пород.

Наиболее существенную роль в их составе играют полевые шпаты (57 %) и глинистые высокоглиноземистые (30—35 % Al_2O_3) минералы — каолинит, монтмориллонит, за счет чего общее содержание глинозема в руде превосходит оптимальное, характерное для подтипа А, к которому, возможно, относятся коренные породы. В наименее измененной разности концентрация глинозема составляет ~ 21 %.

Безнефелиновые породы подтипа А данного типа (трахиты, трахиандезиты) широко распространены на всех континентах, но вследствие низкого содержания глинозема и щелочей ценность их как комплексного сырья невелика и во многом определяется конкретными геолого-экономическими условиями. Несмотря на большее количество глинозема и меньшее содержание кремнезема в породах подтипа Б, низкое качество их усугубляется значительно меньшим содержанием щелочей.

Опыт широкого хозяйственного применения в СССР небокситового (особенно нефелинового) алюминиевого сырья, накопленный в последние десятилетия, успехи в совершенствовании технологии переработки и обогащения нефелиновых руд, а также результаты работ по поискам и геолого-промышленной оценке многочисленных рудопроявлений щелочных алюмосиликатных пород обусловили целесообразность и необходимость анализа и обобщения всех имеющихся данных. Значимость и перспективы дальнейшего расширения масштабов использования небокситового сырья определяются рядом факторов:

1) наличием в различных регионах СССР промышленных ресурсов высококачественного нефелинового сырья;

2) комплексным характером технологии переработки, обеспечивающей использование всех основных полезных компонентов сырья с получением весьма ценных (нередко — дефицитных) продуктов;

3) полностью безотходным производством и одновременно возможностью решения комплекса народнохозяйственных проблем: обеспечения алюминиевых заводов Сибири местным глиноземом, удовлетворения потребностей народного хозяйства в содопродуктах (сода, поташ) и сырье для получения цемента и различных строительных материалов и др.

Промышленно освоенной технологией является технология спекания руды с известняком. Новые варианты указанной технологии (сухого спекания, гидрохимический способ Пономарева — Сажина, спекания с предварительным химическим обогащением и др.) и разработка эффективных способов механического обогащения позволяют расширить сырьевую базу нефелиновых руд за счет более высокожелезистых и высококремнеземистых разновидностей, но для их внедрения требуется решить ряд дополнительных задач.

Наибольшее практическое значение могут иметь азотнокислотный метод (главным образом, для хвостов апатитовой флотации хибинских руд), а также модернизированная технология спекания. Последняя особенно эффективна для высококалийевых пород и может способствовать удовлетворению потребностей сельского хозяйства в бесхлорных комплексных (калийно-фосфорных и др.) удобрениях.

Разновидности нефелиновых пород, представляющие наибольший интерес как комплексное щелочное алюмосиликатное сырье, связаны с массивами щелочных пород, относящихся к различным формациям — щелочно-габброидной, щелочно-салической и калиевых щелоч-

ных фельдшпатоидных сиенитов. В первых двух наибольшее практическое значение имеют нефелиновые породы уртит-якупирангитового ряда, в последней — ультракалиевые лейкократовые разности (кальсилит-калиево-полевошпатовые или нефелин-кальсилит-калиево-полевошпатовые).

Ценность нефелиновых пород определяется особенностями их вещественного состава. Основными носителями полезных компонентов (глинозем, щелочи) являются фельдшпатоиды — нефелин и вторичные по нему минералы, однако последние во многих случаях содержат меньшее количество щелочей и повышенное — кремнезема, а также ряд вредных компонентов (SO_3 , Cl и др.).

Полевые шпаты, играющие роль как породообразующих, так и второстепенных минералов, обуславливают избыток кремнезема в нефелиновых рудах и одновременно дефицит глинозема, что заметно влияет на технико-экономические показатели переработки нефелинового сырья и их промышленную значимость. Темноцветные и акцессорные минералы (пироксены, амфиболы, биотит, гранат, рудные и др.) являются носителями вредных для глиноземного производства компонентов (Fe, Ti, P, S и др.) и разубоживают руды по количеству полезных компонентов. При повышенном содержании этих минералов необходимо применять механическое обогащение руд.

Существенное влияние (преимущественно отрицательное) на состав и свойства нефелиновых пород как комплексных руд оказывают вторичные наложенные процессы. Помимо вышеперечисленного они обычно ухудшают обогатимость руд (особенно в случае вторичных изменений цветных минералов). Однако развитие в породах канкринита и кальцита приводит к заметному повышению количества в них полезного компонента — CaO. К тому же канкринит — легкоразлагаемый (в процессе спекания) минерал — может несколько облегчать переработку руд. Наряду с основными полезными компонентами (Al_2O_3 , R_2O) при переработке нефелиновых руд возможно попутное извлечение ряда элементов-примесей (Ga, Rb, Cs).

Основными предпосылками расширения глиноземного производства на базе нефелиновых и других щелочных алюмосиликатных руд наряду с уже упомянутыми являются следующие: 1) перспективы значительного увеличения выпуска нефелинового концентрата на ПО "Апатит"; 2) развернутое широкое хозяйственное освоение районов Сибири, способствующее промышленному использованию ресурсов нефелинового сырья этого региона.

Проведенные технико-экономические расчеты показали, что первоочередными сырьевыми объектами для изучения, оценки и освоения должны служить ресурсы нефелиновых руд Хибинских месторождений и сынныриты Сакунского месторождения. Проблема расширения масштабов комплексной переработки нефелинового сырья должна рассматриваться как важнейшая народнохозяйственная задача, требующая для решения межотраслевого подхода.

1. *Бородин Л.С.* Геохимия главных серий изверженных пород. — М., Недра, 1981.
2. *Буссен И.В., Сахаров А.С.* Петрология Ловозерского щелочного массива. Л., Наука, 1972.
3. *Геолого-минералогические предпосылки использования новых месторождений и видов глиноземсодержащего сырья Сибири и Дальнего Востока / С.Я. Данциг, Е.Д. Андреева, В.В. Пивоваров и др.* — В кн.: Новые небокситовые виды глиноземсодержащего сырья. — М., Наука, 1982, с. 219—227.
4. *Данциг С.Я., Пивоварова В.В., Туголесов Л.Д.* Мировые сырьевые ресурсы небокситовых руд. — В кн.: Новые небокситовые виды глиноземсодержащего сырья. — М., Наука, 1982, с. 25—37.
5. *Данциг С.Я., Шморгуленко Н.С.* Критерии оценки качества нефелиновых пород как комплексного глиноземсодержащего сырья. В кн.: Нефелиновое сырье. М., Наука, 1978, с. 172—177.
6. *Ефимов А.Ф.* Типохимизм породообразующих темноцветных минералов щелочных пород. М., Наука, 1983.
7. *Жидков А.Я.* Качественные особенности сэнныритов и типохимизм слагающих минералов. — Геол. и геоф., 1985, № 2, с. 31—38.
8. *Жуков Г.А.* Направление и эффективность химизации земледелия. — В кн.: Вопросы рационального использования производительных ресурсов сельского хозяйства Сибири. Новосибирск, 1977, с. 59—63.
9. *Заварицкий А.Н.* Изверженные горные породы. М., Изд-во АН СССР, 1956.
10. *Классификация и номенклатура магматических горных пород / Е.Д. Андреева, О.А. Богатиков, М.Б. Бородаевская и др.* М., Недра, 1981.
11. *Коваленко В.И.* Петрология и геохимия редкометалльных гранитоидов. Новосибирск. Наука, 1977.
12. *Конев А.А.* Нефелиновые породы Саяно-Байкальской горной области. Новосибирск, Наука, 1982.
13. *Конев А.А., Сизых Ю.И., Бондарева Г.В.* Титан-фассаиты — широко распространенная разновидность титанистых клинопироксенов — В кн.: Материалы XI съезда ММА. М., Наука, 1981, с. 61—70.
14. *Кононова В.А.* Якупиранигит-уртитовая серия щелочных пород. М., Наука, 1976.
15. *Костюк В.П.* Минералогия и проблемы генезиса щелочных изверженных пород Сибири. Новосибирск, Наука, 1974.
16. *Мазаренков В.Г.* Распространенность щелочных пород в океанах и на континентах — Докл. АН СССР, т. 274, 1984, № 5, с. 1206—1207.
17. *Лайнер Ю.А.* Комплексная переработка алюминийсодержащего сырья кислотными способами. М., Наука, 1982, с. 66—67.
18. *Магматические горные породы. Т. 2. Щелочные породы / Е.Д. Андреева, В.А. Кононова, Е.В. Свешникова и Р.М. Яшина.* М., Наука, 1984.
19. *Минералогия Хибинского массива (минералы). Т. 2 / Е.Е. Костылева-Лабунцова, Б.Е. Борущий, М.К. Соколова и др.* М., Наука, 1978.
20. *Небокситовая сырьевая база алюминиевой промышленности Сибири и Дальнего Востока — Экономика минерального сырья и геологоразведочных работ: Обзор / В.В. Пивоваров, С.Я. Данциг, Э.А. Аман, Б.Н. Одокий.* — М., Изд. ВИЭМСа, 1980.

21. *Новые направления комплексной переработки щелочного алюмосиликатного сырья* / Н.С. Шморгуненко, В.В. Пивоваров, Э.А. Аман и др. — Цветные металлы, 1984, № 11, с. 31—33.

22. *Орлова М.П., Краснов В.И.* Классификация щелочных магматических формаций и особенности их размещения на территории СССР — Сов. геология, 1977, № 1, с. 70—80.

23. *Производство глинозема* / А.И. Лайнер, Н.И. Еремин, Ю.А. Лайнер и др. М., Металлургия, 1978.

24. *Сажин В.С.* Новые гидрохимические способы получения глинозема. Киев, Наукова думка, 1979.

25. *Самсонова Н.С.* Минералы группы нефелина. М., Наука, 1973.

26. А. с. 925865 (СССР). *Способ переработки сыныритов на нитрат калия и глинозем* / И.Д. Соколов, Ю.С. Сафрыгин, Ю.И. Гержберг, Г.В. Шемерянкина, И.В. Иванова. — Заявл. 22.07.80 № 2666067/22—02. Опубл. в Б.И., 1982, № 17.

27. *Тихоненкова Р.П.* Содержание элементов-примесей в аксессуарных минералах щелочных пород как индикатор их формационной принадлежности. — В кн.: Прикладная геохимия и минералогия. — М., изд. ИМГРЭ, 1977, с. 45—47.

28. *Туголесов Л.Д., Осокин Е.Д.* Распределение редких элементов в главных формационных типах нефелиновых сиенитов СССР. — Геохимия. 1981, № 6, с. 904—910.

29. *Формационная типизация и вопросы комплексного изучения месторождения нефелиновых руд* / Л.С. Бородин, Е.Д. Осокин, А.А. Ганзеев и др. — В кн.: Нефелиновое сырье. М., Наука, 1978, с. 15—20.

30. *Химический фазовый анализ алюминиевого сырья и неметаллических полезных ископаемых* / Н.Н. Масленицкий, М.Н. Федорова, Р.С. Мильнер и др. М., Недра, 1983.

31. *Шаракшинов А.О.* Щелочной магматизм Витимского плоскогорья (Западное Забайкалье). Новосибирск, Наука, 1984.

32. *Шаракшинов А.О.* Мухальское месторождение — новый генетический тип нефелиновых руд. — Геол. рудн. месторождений, 1984, № 1, с. 89—92.

33. *Шморгуненко Н.С., Корнеев В.И.* Комплексная переработка и использование отвальных шламов глиноземного производства. М., Металлургия, 1982.

34. *Щелочные породы* / Под ред. Х. Серенсена. М., Мир, 1976.

35. *Яшина Р.М., Гарам Д.* Щелочные породы Северной Монголии как возможный источник нефелинового и нефелин-полевошпатового сырья. — В кн.: Нефелиновое сырье. — М., Наука, 1978, с. 143—152.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	4
<i>Глава 1. Нефелиновые руды — комплексное сырье для производства глинозема и других продуктов.</i>	<i>11</i>
<i>Глава 2. Способы переработки и обогащения нефелинового сырья.</i>	<i>42</i>
<i>Глава 3. Формационная принадлежность и петрографо-технологическая классификация руд.</i>	<i>56</i>
<i>Глава 4. Вещественный состав руд</i>	<i>60</i>
Минеральный состав	60
Минеральный состав и качество	100
Петрохимические особенности	107
Вторичные процессы — их роль, характер и особенности (на примере Кия-Шалтырского месторождения)	111
Элементы-примеси	121
Влияние минерального состава руд на технологический процесс переработки (качество спека, извлечение полезных компонентов)	128
<i>Глава 5. Принципы и параметры оценки качества руд и целесообразности их использования как комплексного сырья.</i>	<i>131</i>
<i>Глава 6. Методика изучения вещественного состава и оценки качества руд.</i>	<i>143</i>
<i>Глава 7. Предпосылки и проблемы расширения комплексной переработки нефелинового сырья</i>	<i>154</i>
<i>Глава 8. Основные особенности щелочных алюмосиликатных руд зарубежных рудопроявлений.</i>	<i>166</i>
Заключение	183
Список литературы	185
Приложение. Методики фазового анализа нефелинового сырья	188

МЕТОДИКИ ФАЗОВОГО АНАЛИЗА НЕФЕЛИНОВОГО СЫРЬЯ

Нефелин-полевошпатовые руды

Ускоренное определение нефелина. Навеску пробы массой 1 г, измельченную до -74 мкм и высушенную при $105-110^{\circ}\text{C}$, обрабатывают 50 мл 5%-ной соляной кислоты при нагревании в течение 10 мин, фильтруют. Нерастворимый остаток промывают сначала 2 раза водой, затем 3 раза 5%-ным раствором гидроксида натрия (для растворения образующегося геля кремнекислоты) и снова водой. Промытый остаток высушивают при $105-110^{\circ}\text{C}$ и определяют его выход (в %). По разности между взятой навеской, принятой за 100 %, и выходом нерастворимого остатка определяют количество нефелина (в %).

Эту методику рекомендуется применять для руд, практически не содержащих карбонатов и фосфатов.

Определение оксида алюминия нефелина. Навеску массой 0,5–1 г крупностью $-0,15$ мм помещают в колбу вместимостью 150 мл, заливают 50 мл горячей 5%-ного раствора азотной или соляной кислоты, нагревают до кипения и кипятят в течение 5 мин. После разложения навески содержимое переносят в мерную колбу вместимостью 250 мл, охлаждают до комнатной температуры, доводят до метки водой и тщательно перемешивают. Отбирают 50 мл полученного раствора, нейтрализуют его 20%-ным раствором гидроксида натрия (по конго красному) до изменения окраски (синей в серовато-розовую) и добавляют 20 мл избытка щелочи. Стакан ставят на плиту, нагревают до кипения и кипятят в течение 5 мин. Раствор фильтруют в колбу, промывают горячей водой. К фильтрату добавляют 25 мл раствора комплексона III (концентрация раствора 0,05 моль/л) и далее определяют содержание оксида алюминия солянокислым методом [30].

Оксид алюминия азотнокислой вытяжки соответствует нефелину, а оксид алюминия нерастворимого остатка относят на полевые шпаты. Содержание оксида алюминия пироксенов в нерастворимом остатке не учитывают, поскольку общее содержание оксида алюминия в данных минералах, как правило, не превышает 0,5–1,0 %.

Окисленные нефелиновые руды

Ускоренное определение оксида алюминия фельдшпатоидов, гидрослюд и полевых шпатов производится из двух навесок. Первую навеску — 0,5 г концентрата, хвостов апатитовой флотации или 1 г руды — разлагают 50 мл азотной кислоты. Анализ выполняют как и при определении нефелина. Количество оксида алюминия азотнокислой вытяжки соответствует суммарному содержанию оксидов алюминия фельдшпатоидных минералов — нефелина, альцима, канкринита и цеолита (А, %).

Вторую навеску анализируемого продукта массой 0,5–1 г помещают в стакан, увлажняют несколькими каплями воды, добавляют 20–25 мл раствора серной кислоты (1:1) и быстро перемешивают содержимое стеклянной палочкой для того, чтобы избежать цементации и прилипания материала ко дну стакана. Стакан ставят на плиту и нагревают до начала выделения паров серной кислоты, затем охлаждают, добавляют 70 мл воды, вновь ставят на горячую плиту для растворения солей, охлаждают и переносят в мерную колбу вместимостью 250 мл, доводят до метки водой и тщательно перемешивают. Отбирают 50 мл полученного раствора в стакан, доливают 50 мл воды и 25 мл раствора комплексона III (концентрация 0,05 моль/л), нагревают, нейтрализуют 20%-ным раствором гидроксида натрия (по универсальной бумаге), добавляют 20 мл избыт-

ка, фильтруют и далее анализ ведут по солянокислому методу [30]. Полученное количество оксида алюминия соответствует суммарному содержанию его в фельдшпатоидных минералах, гидрослюдах, каолините, монтмориллоните (B , %).

По разности двух определений ($B-A$) находят содержание оксида алюминия гидрослуд, каолинита, монтмориллонита. Количество оксида алюминия полевых шпатов определяется по разности между общим содержанием оксида алюминия и содержанием его в сернокислой вытяжке.

Контрольное определение содержания полевых шпатов и пироксенов. Навеску массой 5–10 г и крупностью —0,15 мм помещают в колбу или стакан вместимостью 500–700 мл, заливают 300 мл 10%-ного раствора азотной кислоты, ставят на магнитную мешалку или ротатор и перемешивают в течение 1 ч при 20 °С. Быстро отфильтровывают раствор от нерастворимого остатка, промывают сначала 3 раза горячим 10%-ным раствором гидроксида натрия с целью удаления свежевывапавшего геля кремнекислоты, а затем 3 раза горячей водой. В фильтрате, если это необходимо, определяют содержание оксида алюминия, соответствующее суммарному содержанию его в фельдшпатоидных минералах. Для этого фильтрат переносят в мерную колбу вместимостью 500 мл, доводят до метки, берут аликвотную часть 25–50 мл и определяют оксид алюминия комплексометрическим методом.

Нерастворимый остаток сушат, взвешивают и делят на две равные части. Одну половину оставляют для анализа физическими методами (микроскопическим, рентгенометрическим и др.), а другую помещают в стакан, наливают 30 мл серной кислоты (1:1), ставят на плиту и нагревают до начала выделения паров кислоты. Стакан снимают с плиты, охлаждают, добавляют 50 мл воды, вновь нагревают до растворения солей, фильтруют через беззольный фильтр. Нерастворимый остаток промывают 2 раза горячей водой и, не высушивая, сразу же помещают в кипящую водяную баню, в которой, время от времени перемешивая, выдерживают в течение 1 ч. При фильтрации раствора фильтр оставляют в стакане. Затем его промывают водой и выбрасывают.

Нерастворимый остаток сушат и делят его ручным магнитом на магнитную (пироксены) и немагнитную (полевой шпат) фракции, причем магнитную фракцию перечищают 2–3 раза. Выделить полевые шпаты в легкую фракцию можно также делением остатка в тяжелой жидкости плотностью 2,8 г/см³. Фракции взвешивают и рассчитывают содержание полевых шпата и пироксенов. В сернокислом фильтрате определяют содержание оксида алюминия, которое соответствует суммарному содержанию его в гидрослуде, каолините и монтмориллоните.

Определение содержания неизмененного нефелина. Навески (масса 0,5–1 г) исходного продукта и нерастворимого остатка, полученного после удаления фельдшпатоидных минералов путем обработки 10%-ной азотной кислотой, помещают в фарфоровые тигли, ставят в муфельную печь и обжигают в течение 1 ч при 450–500 °С. Тигли взвешивают до и после обжига.

Содержание воды C_{H_2O} (в %), соответствующее суммарному содержанию ее во всех вторичных по нефелину минералах, рассчитывают по формуле

$$C_{H_2O} = 100 \Pi / m,$$

где Π — потеря массы навески при обжиге, г; m — масса навески, г.

Содержание воды в нерастворимом остатке, отвечающее содержанию ее в гидрослюдах, определяют по следующей формуле:

$$C_{H_2O} = B \Pi / m,$$

где B — выход всего нерастворимого остатка, %; m — масса навески нерастворимого остатка, г.

По разности между общим содержанием воды в исходном продукте и содер-

жанием ее в нерастворимом остатке определяют содержание воды во вторичных фельдшпатоидных минералах: анальдиге, канкрините, натролите. Умножая величину содержания воды в фельдшпатоидных вторичных минералах на коэффициент 3,18, получают содержание оксида алюминия в фельдшпатоидных вторичных минералах.

Содержание оксида алюминия в неизмененном нефелине определяют по разности между его количеством, установленным в азотнокислой вытяжке, и содержанием в фельдшпатоидных вторичных минералах.

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Светлана Яковлевна Данциг, Евдокия Даниловна Андреева,
Валерий Витальевич Пивоваров и др.

НЕФЕЛИНОВЫЕ ПОРОДЫ — КОМПЛЕКСНОЕ
АЛЮМИНИЕВОЕ СЫРЬЕ

Редактор издательства *Т.П. Мыскина*

Обложка художника *В.П. Христинина*

Художественный редактор *Г.Н. Юрчевская*

Технический редактор *Л.Д. Агафонова*

Корректор *В.Т. Юдович*

Оператор *И.В. Волкова*

ИБ 6502

Подписано в печать 20.10.87. Т-02080. Формат 60x84¹/₁₆. Бумага офсетная № 1.
Набор выполнен на наборно-пишущей машине. Гарнитура "Сенчури". Печать оф-
сетная. Усл. печ. л. 11.16. Усл. кр.-отт. 11,39. Уч.-изд. л. 13,60. Тираж 720 экз.
Заказ 3644 /772—2. Цена 2 руб.

Ордена "Знак Почета" издательство "Недра",
125047, Москва, пл. Белорусского вокзала, 3.

Московская типография № 9 НПО "Всесоюзная книжная палата" Госкомиздата
109033, Москва, Волочаевская ул., 40.

ВНИМАНИЮ СПЕЦИАЛИСТОВ!

ИЗДАТЕЛЬСТВО "НЕДРА" ГОТОВИТ К ВЫПУСКУ
В 1988 ГОДУ НОВЫЕ КНИГИ

АСАНАЛИЕВ У., ПОПОВ В.В., ТУРДУКЕЕВ И.Д.

Месторождения цветных и редких металлов в карбонатных формациях.
15, л. 2 р. 30 к.

Рассмотрены происхождение и закономерности размещения месторождений свинца, цинка, меди, ртути, сурьмы, вольфрама, а также барита, флюорита и целестина в карбонатных формациях, распространенных в различных регионах земного шара. Описаны минерало-текстурные, морфологические особенности и стадии преобразования месторождений. Охарактеризованы геотектонические позиции, формационные, палеоклиматические, фашиально-палеогеографические, палеогеогеологические факторы контроля оруденения и влияние структурных, метаморфических процессов на рудообразование. Приведена классификация месторождений цветных и редких металлов на формационной основе.

Для научных работников, занимающихся изучением, поисками и разведкой полезных ископаемых.

План 1988 г., № 65

ЩЕГЛОВ А.Д.

Основные проблемы современной металлогении. 17 л. 2 р. 90 к.

Рассмотрены общие закономерности проявления месторождений в пространстве и во времени в различных структурах земной коры и эволюции рудных процессов во времени. Изложены представления о рудных формациях и показано их значение для прикладной металлогении. Разобраны проблемы нелинейной металлогении, указано место этих процессов в общей схеме проявления рудных месторождений в литосфере. Освещены вопросы глобальной металлогении, основанной на идеях тектоники плит. Рассмотрены главные законы металлогении и общие тенденции проявления рудных процессов в земной коре.

Для научных работников — геологов, занимающихся изучением закономерностей размещения, прогнозированием и поисками рудных месторождений.

План 1988 г., № 77

Интересующие Вас книги можно приобрести или заказать в магазинах книготорга, распространяющих научно-техническую литературу, и в магазинах — опорных пунктах издательства "Недра", адреса которых приведены в аннотированном плане, а также через отдел "Книга — почтой" (г. Ленинград, магазин № 17)

Адреса центральных магазинов:

№ 115 — 117334, Москва, Ленинский проспект, 40. Дом научно-технической книги;

№ 17 — 199178, Ленинград, В.О., Средний проспект, 61.

ИЗДАТЕЛЬСТВО "НЕДРА"

2 руб.

4963

НЕДРА